



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**PRODUCCIÓN DE HIDROCARBONIZADOS PARA SU
UTILIZACIÓN COMO ENERGÉTICOS A PARTIR DE TRONCOS
FLOTANTES PROCEDENTES DEL RÍO CAUCA**

Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Químico

Por:

Juan Fernando Rojas Salamanca

Jesús Alfonso Arcos Villacriz

Director:

Juan Manuel Barraza Burgos, Ingeniero Químico, M.Sc., PhD.

Co-director

Juan Sebastián Guerrero Pérez, Ingeniero Químico., M.Sc., PhD.

Santiago de Cali, junio de 2025

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por dar la fuerza de voluntad para afrontar los retos surgidos a lo largo del camino y por aportar el conocimiento para vivir una vida llena de plenitud y con valiosas experiencias que nos han formado.

Expresamos también nuestra gratitud a la Universidad del Valle por su patrocinio y respaldo en el desarrollo de este trabajo de investigación, en el marco del proyecto CI 25254: “Evaluación del proceso de hidrotratamiento térmico aplicado a residuos de troncos de árboles encontrados en las orillas de los ríos Magdalena y Cauca como una estrategia sostenible para la producción de bioenergía”. Su apoyo fue fundamental para la ejecución de este estudio y el fortalecimiento de nuestra formación académica y profesional.

Nuestro sincero reconocimiento al Dr. Juan Manuel Barraza Burgos, director de tesis, y al Dr. Juan Sebastián Guerrero, codirector, quienes no solo confiaron en nosotros y siguieron de cerca cada avance, sino que también, con su amplia experiencia, nos guiaron y nos abrieron las puertas del Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología del Carbono; gracias a ellos, este estudio pudo materializarse.

Agradecemos igualmente al Dr. Jorge Luis Piñeres, coinvestigador del proyecto por parte de la Universidad del Atlántico, por aportar sus valiosos conocimientos y tiempo; al Dr. Alexander Portilla por sus valiosas observaciones como evaluador y consultor de tesis; a Rosxana Torres, Yeison Arrieta y Sebastián Lozano por su dedicación y apoyo brindado en el proyecto de hidrotratamiento térmico al que pertenece esta tesis; y a todos los tesisistas del Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología del Carbono por compartir generosamente sus conocimientos y fomentar un ambiente colaborativo en el laboratorio.

Yo, Jesús Alfonso Arcos Villacriz, de manera personal deseo expresar mi más profunda gratitud a mis padres Luis Martín Arcos y Lidia Lucy Villacriz, por su apoyo incondicional y constante en cada etapa de mi formación, así como por haber creído siempre en mí. A mi hermana, Diana Natalia Arcos, por su invaluable ánimo, estímulo permanente y compañía en todo momento.

Agradezco a todos mis compañeros de estudio por los aprendizajes compartidos durante esta etapa. De manera especial, a Juan Fernando Rojas Salamanca, por su colaboración constante desde los

inicios de mi formación, su invaluable apoyo académico y por ser un aliado fundamental durante las etapas críticas de este proceso.

Yo, Juan Fernando Rojas Salamanca, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, Arbey Rojas Varón y María Fernanda Salamanca, por su apoyo incondicional y por haberme inculcado valores fundamentales que me han permitido enfrentar cada reto con determinación y confianza en mis decisiones. Su amor y guía han sido el cimiento de mi crecimiento personal y académico.

A toda mi familia, extendiendo mi profundo reconocimiento por su constante acompañamiento durante mi formación. Su presencia y aliento en los momentos clave fueron un soporte invaluable que me brindó fortaleza y motivación para seguir adelante, incluso en las circunstancias más desafiantes.

De manera especial, quiero agradecer a mis compañeros de estudio, con quienes compartí experiencias enriquecedoras que marcaron mi trayectoria. En particular, a Jesús Alfonso Arcos Villacriz, cuyo compañerismo y colaboración fueron esenciales desde los inicios de mi formación profesional. Su perspectiva innovadora y su apoyo en cada proyecto, incluyendo este trabajo de investigación, contribuyeron significativamente a mi desarrollo integral. Su amistad y dedicación han dejado una huella imborrable en este proceso.

Finalmente, nuestro más sentido agradecimiento a todas las personas que enriquecieron nuestra experiencia en la Universidad del Valle. A quienes nos enseñaron, nos apoyaron y creyeron en nosotros; su contribución ha sido fundamental para este logro académico.

Resumen

El objetivo de este proyecto fue evaluar la producción de hidrocarbonizados mediante carbonización hidrotérmica (HTC), transformando los troncos flotantes del río Cauca, un contaminante de ecosistemas de alta humedad, en un recurso energético y funcional.

Se recolectaron muestras de troncos flotantes en la ribera del río Cauca y se caracterizaron mediante análisis por longitud de tamaños, humedad intrínseca/extrínseca, densidad aparente y análisis próximo y último. Los resultados revelaron alta humedad y baja densidad energética.

La carbonización hidrotérmica se realizó en reactores con y sin agitación bajo condiciones controladas: temperaturas de 200–220°C (con dos ensayos adicionales a 253°C y 220°C en reactor agitado), tiempo de residencia de 1–2 h (30 min a 253°C y 220°C), relaciones agua/tronco de 5:1 y 10:1, y velocidad de calentamiento de 4 °C/min (6°C/min). Se evidenció que la temperatura y el tiempo de residencia influyeron significativamente en la calidad de los hidrocarbonizados, mientras la relación agua/tronco tuvo un menor impacto. Se presentaron cambios en el poder calorífico superior (HHV por sus siglas en inglés) y por ende en la composición química.

En el reactor con agitación usando 253°C y 30 min se obtuvo el hidrocarbonizado con mayor HHV con características de carbono fijo de 41.0% y materia volátil 53.5%. En reactores sin agitación, las mejores condiciones fueron 220°C, 2 h y una relación 5:1 obteniéndose muestras con carbono fijo de 18.3% y materia volátil de 77.4%, mientras el máximo rendimiento energético de 98.2% se alcanzó a 220°C, 1 h y relación 10:1, lo que indica mejora en la calidad como biocombustible.

Posteriormente, los hidrocarbonizados se densificaron para producir briquetas usando 10 kN y 10% de humedad, superando todas las briquetas el Índice de Resistencia al Impacto (IRI) mínimo de 100. Las briquetas mezcladas con tronco original pasante malla 8 mostraron mayor resistencia a la compresión, mientras que los hidrocarbonizados 100% exhibieron la mayor durabilidad.

En conclusión, el presente estudio aportó en la ampliación del conocimiento sobre el aprovechamiento energético de residuos orgánicos no convencionales en ecosistemas acuáticos, y propone una ruta tecnológica aplicable a contextos similares, contribuyendo así a la gestión integral de residuos y a la generación de energía renovable.

ABSTRACT

The objective of this project was to evaluate the production of hydrochars through hydrothermal carbonization (HTC), transforming floating logs from the Cauca River, a pollutant in high-moisture ecosystems, into an energetic and functional resource.

Floating log samples were collected from the Cauca River banks and characterized through granulometric analysis, intrinsic/extrinsic moisture, bulk density, and higher heating value (HHV) via proximate analysis. Results revealed high moisture content and low energy density.

Hydrothermal carbonization was conducted in reactors with/without agitation under controlled conditions: temperatures of 200–220°C (with two additional trials at 253°C and 220°C in an agitated reactor), residence times of 1–2 h (30 min at 253°C and 220°C), water/log ratios of 5:1 and 10:1, and heating rates of 4°C/min (6°C/min). Temperature and residence time significantly influenced hydrochar quality, while the water/log ratio had lesser impact. Notable changes occurred in HHV and chemical composition.

The agitated reactor at 253°C and 30 min yielded hydrochar with the highest HHV, featuring 41.0% fixed carbon and 53.5% volatile matter. In non-agitated reactors, best operation conditions (220°C, 2 h, 5:1 ratio) produced samples with 18.3% fixed carbon and 77.4% volatile matter. Maximum energy yield (98.2%) was achieved at 220°C, 1 h, and 10:1 ratio, confirming enhanced biofuel quality.

Hydrochars were subsequently densified into briquettes at 10 kN compaction force and 10% moisture. All briquettes exceeded the minimum Impact Resistance Index (IRI) of 100. Blended briquettes (hydrochar + biomass passing mesh #8) showed higher compressive strength, while 100% hydrochar briquettes exhibited greater durability.

In conclusion, this study advances knowledge on energy recovery from non-conventional organic waste in aquatic ecosystems and proposes a replicable technological pathway, contributing to integrated waste management and renewable energy generation.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	iv
ABSTRACT	v
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Revisión de literatura	4
2.1 Marco teórico-conceptual.....	4
2.1.1 Biomasa y biocombustibles	4
2.1.2 Tipos de Biomasa	4
2.1.3 Composición de la biomasa y los troncos flotantes	5
2.1.4 Elementos mayores y trazas	7
2.1.5 Conversión de biomasa residual	7
2.1.6 Carbonización hidrotérmica o torrefacción húmeda	8
2.2 Clasificación fisicoquímica de los biocombustibles sólidos	10
2.2.1 Análisis próximo y último	10
2.2.2 Poder calorífico	10
2.2.3 Rendimiento másico	12
2.2.4 Densidad energética y rendimiento energético	12
2.3 Densificación de los hidrocarbonizados	13
2.3.1 Resistencia al impacto	13
2.3.2 Resistencia a la compresión.....	14
2.3.3 Densidad de los hidrocarbonizados	14
2.3.4 Durabilidad.....	15
2.4 Antecedentes.....	15
Capítulo 3. Metodología experimental	18
3.1 Revisión bibliográfica	18
3.2 Obtención y preparación de muestras.....	18
3.2.1 Recolección, muestreo y almacenamiento	18
3.2.2 Molienda y cuarteo	19
3.3 Caracterización de muestras.....	21
3.3.1 Análisis de humedad	21
3.3.2 Densidad aparente	22

3.3.3	Análisis próximo y último	22
3.3.4	Determinación de poder calorífico	22
3.4	Reactores usados para experimentación HTC	22
3.4.1	Filtración de hidrocarbonizados	24
3.4.2	Secado de hidrocarbonizados	25
3.5	Carbonización hidrotérmica en un reactor <i>batch</i> con agitación	25
3.6	Diseño experimental para el proceso HTC con reactor <i>batch</i> sin agitación	26
3.7	Análisis de hidrocarbonizados.....	27
3.7.1	Análisis último	27
3.7.2	Análisis próximo	27
3.7.3	Poder calorífico	27
3.7.4	Rendimiento másico y energético de hidrocarbonizados	28
3.8	Tratamiento estadístico de los resultados	28
3.9	Densificación de troncos originales e hidrocarbonizados	28
3.9.1	Densidad de briquetas	29
3.9.2	Resistencia al impacto	29
3.9.3	Resistencia a la compresión.....	30
3.9.4	Durabilidad.....	31
Capítulo 4. Resultados y Análisis de Resultados.		32
4.1	Caracterización de los troncos flotantes originales.....	32
4.1.1	Análisis de tamaño de troncos	32
4.1.2	Humedad de los troncos flotantes originales.....	33
4.1.3	Análisis próximo y HHV del tronco original	33
4.2	Caracterización de los hidrocarbonizados	34
4.2.1	Análisis próximo de hidrocarbonizados.....	34
4.2.2	Análisis último de TO e hidrocarbonizados	36
4.2.3	Poder calorífico y densidad energética de los hidrocarbonizados	38
4.2.4	Rendimiento másico y energético de hidrocarbonizados	41
4.2.5	Significancia estadística de los factores del proceso	42
4.3	Densificación de los hidrocarbonizados.	44
4.3.1	Morfología de las briquetas	44

4.3.2	Densidad de muestras sin densificar y briquetas.....	45
4.3.3	Resistencia al impacto	47
4.3.4	Resistencia a la compresión.....	47
4.3.5	Durabilidad de las briquetas	49
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones		51
5.1	Conclusiones.....	51
5.2	Recomendaciones	52
Capítulo 6. Referencias Bibliográficas		54
Capítulo 7. Anexos.....		60
7.1	ANEXO A: Control de rampa en mufla	60
7.2	ANEXO B: Algunas imágenes de los hidrocarbonizados.....	60
7.3	ANEXO C: Imágenes complementarias de las briquetas.....	61
7.4	ANEXO D: Producción académica derivada de este estudio.....	62

Lista de Tablas

Tabla 1. Composición polimérica de diferentes biomásas lignocelulosas	6
Tabla 2. Composición macromolecular de troncos flotantes de Génissiat dam, bs	7
Tabla 3. Correlaciones comunes para estimación del poder calorífico superior	11
Tabla 4. Diseño de experimentos para reactor batch sin agitación.	27
Tabla 5. Análisis próximo de tronco original, bs.	33
Tabla 6. Densidad de muestras TO, HTC y briquetas	46
Tabla 7. IRI de las briquetas	47
Tabla 8. Expansión de las briquetas sometidas a compresión	48
Tabla 9. Durabilidad de las briquetas.....	49

Lista de Figuras

Figura 1. Métodos de conversión de biomasa (Portilla-Amaguaña et al., 2024)	8
Figura 2. Evolución térmica de la torrefacción	9
Figura 3. Pilas de troncos flotantes en las riberas del Rio Cauca.	19
Figura 4. Troncos húmedos y secos.	19
Figura 5. Orden de troncos por longitud.	20
Figura 6. Clasificación de troncos por tamaño de partícula y peso.	20
Figura 7. Molino forrajero de martillo de biomasa utilizado.....	21
Figura 8. Muestras representativas molidas y almacenadas.	21
Figura 9. Reactor HTC y piezas que lo componen.....	23
Figura 10. Horno tipo mufla con controlador de temperatura	23
Figura 11. Curva de calibración de la temperatura del horno mufla.....	24
Figura 12. Perfil de temperatura en reactor (a) con agitación y (b) sin agitación	24
Figura 13. Sistema para el filtrado de hidrocarbonizados	25
Figura 14. Estufa de secado	25
Figura 15. Reactor Parr utilizado, fuente:(Camacho Daza & Valencia García, 2024).....	26
Figura 16. Diagrama reactor Parr, fuente: (Camacho Daza & Valencia García, 2024)	26
Figura 17. Imagen de prensa y molde usado para la densificación.....	28
Figura 18. Ejemplificación de briqueta sometida a carga en prensa hidráulica manual....	30
Figura 19. Tamizador eléctrico.....	31
Figura 20. Distribución de peso en función de las longitudes de troncos original.....	32
Figura 21. Análisis próximo de TO e hidrocarbonizados, bs.	35
Figura 22. Análisis último de TO e hidrocarbonizados.....	36

Figura 23. Diagrama de Van Krevelen para TO e hidrocarbonizados.	38
Figura 24. HHV y densidad energética de TO e hidrocarbonizados, bs.	39
Figura 25. Rendimientos másicos y energéticos de los hidrocarbonizados, bs.	41
Figura 26. Probabilidad normal de los rendimientos másicos (ANOVA)	42
Figura 27. Residuos vs. Valores ajustados de los rendimientos másicos (ANOVA)	43
Figura 28. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados sobre rendimiento másico	43
Figura 29. Imágenes de briquetas usando diferentes proporciones de mezclas	45
Figura 30. Tukey para comparación de pruebas durabilidad	50

Capítulo 1. Introducción

Los ríos constituyen ejes fundamentales para el desarrollo económico, ecológico y social de las regiones que atraviesan, especialmente en Colombia, donde el río Magdalena y su principal afluente, el río Cauca, juegan un papel estratégico. El río Cauca recorre más de 1.200 km y drena una cuenca de 63.300 km², abarcando siete departamentos y abasteciendo actividades agrícolas, domésticas, industriales y energéticas (Duque Escobar, 2024). Sin embargo, este recurso enfrenta una problemática creciente: la acumulación de troncos flotantes en sus márgenes y cauces, originada por la tala, la deforestación ribereña y eventos naturales. Esta acumulación representa un riesgo ambiental y operativo, especialmente para infraestructuras hidráulicas como las hidroeléctricas.

Un caso paradigmático fue lo ocurrido en la central hidroeléctrica de El Quimbo, donde la presencia de residuos leñosos no gestionados adecuadamente generó problemas de calidad del agua y liberación de gases como el metano (Andrade Navia et al., 2024). Además, estos materiales modifican la dinámica hidráulica de los ríos, incrementando la probabilidad de inundaciones y provocando alteraciones ecológicas. La descomposición de troncos en el agua puede también generar riesgos sanitarios, como se ha documentado con la proliferación de leishmaniasis visceral en el Alto Cauca (Sanchez et al., 2020), una enfermedad mortal sin tratamiento oportuno. Esta problemática es especialmente relevante en zonas densamente pobladas como Santiago de Cali, donde el río Cauca y la represa de Salvajina son infraestructuras clave.

A pesar de estos impactos, los troncos flotantes representan una biomasa rica en carbono que, adecuadamente valorizada, puede convertirse en una fuente energética renovable. Sin embargo, su alto contenido de humedad limita su aprovechamiento directo mediante combustión. En este contexto, la carbonización hidrotérmica (HTC, por sus siglas en inglés) emerge como una tecnología prometedora. Este proceso transforma biomasa húmeda en un sólido carbonoso (hidrocarbonizado) bajo condiciones de temperatura moderada (180–250 °C) y presión autógena en medio acuoso, sin necesidad de secado previo.

La HTC ha sido ampliamente evaluada para residuos agrícolas, forestales y urbanos, mostrando mejoras significativas en densidad energética, estabilidad, y comportamiento térmico del material resultante (Libra et al., 2011; Reza et al., 2015). Sin embargo, la literatura científica carece de

estudios enfocados específicamente en biomasa flotante de origen fluvial, como los troncos acumulados en el río Cauca. Además, no se ha explorado suficientemente la briquetización posterior de los hidrocarbonizados como una estrategia para mejorar sus propiedades físicas y facilitar su uso y transporte.

Desde un enfoque de gestión ambiental y valorización de residuos, esta investigación plantea como hipótesis que los troncos flotantes del río Cauca pueden convertirse en un recurso energético valioso si se someten a un proceso de HTC, seguido de densificación por compresión. El aprovechamiento de esta biomasa permitiría no solo mitigar su impacto negativo en los cuerpos de agua, sino también generar productos con valor agregado, tales como combustibles sólidos, bioadsorbentes o enmiendas de suelo (Inkoua et al., 2024; Xu et al., 2023).

El objetivo general de este trabajo fue producir hidrocarbonizados para su utilización como energéticos a partir de troncos flotantes procedentes del río Cauca.

Los objetivos específicos alcanzados fueron los siguientes:

1. Determinar el efecto de parámetros de operación (temperatura, tiempo de reacción, relación agua/tronco) sobre el rendimiento másico del hidrocarbonizado.
2. Evaluar las propiedades energéticas de los hidrocarbonizados generados bajo diferentes condiciones de operación.
3. Evaluar el efecto de la HTC sobre el proceso de densificación física (briquetización) y la calidad de las briquetas obtenidas.

Este estudio contribuye a resolver un problema ambiental crítico mediante una solución tecnológica sostenible, convirtiendo residuos flotantes en hidrocarbonizados sólidos de alto valor. La HTC ofrece una alternativa viable frente a otras tecnologías térmicas como la pirólisis, ya que opera en medio húmedo y permite el procesamiento directo de materiales con alto contenido de agua, como los troncos en cuestión. Al evaluar tanto la carbonización como la briquetización, este trabajo propone una ruta integral de valorización que va desde la recolección de los troncos hasta la generación de productos energéticos densificados y estables.

Este documento se organiza en siete capítulos. El Capítulo 1 introduce los antecedentes, objetivos y estructura del estudio. El Capítulo 2 revisa la literatura sobre la conversión de biomasa en

bioproductos, analizando métodos termoquímicos, con un enfoque particular en HTC y sus aplicaciones como biocombustible. El Capítulo 3 describe la metodología experimental, detallando los procedimientos y fundamentos teóricos empleados. En el Capítulo 4, se presentan y analizan los resultados, abordando la caracterización fisicoquímica de los troncos flotantes, los efectos de las variables de HTC sobre el rendimiento y propiedades del hidrocarbonizado. El Capítulo 5 muestra las conclusiones y recomendaciones para futuros estudios, mientras que el Capítulo 6 presenta las referencias bibliográficas. Finalmente, el Capítulo 7 con los anexos incluyen resultados adicionales y artículo científico y presentación en congreso nacional productos de esta investigación.

Palabras clave: Carbonización hidrotérmica (HTC), Valorización de residuos lignocelulósicos, Energía renovable, Briquetización.

Capítulo 2. Revisión de literatura

2.1 Marco teórico-conceptual

2.1.1 Biomasa y biocombustibles

La biomasa es un material vegetal generado mediante fotosíntesis, proceso que fija CO_2 y H_2O usando energía lumínica para sintetizar compuestos orgánicos complejos (ej. carbohidratos), liberando O_2 . Esta energía química, almacenada en enlaces de moléculas ricas en carbono, hidrógeno y oxígeno, puede liberarse mediante combustión o descomposición (Zhuang et al., 2018).

Estructuralmente, la biomasa es un sistema polimérico compuesto por agua y tres biopolímeros principales: celulosa, la cual es un polisacárido lineal de monómeros de glucosa $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ con alta cristalinidad que dificulta su hidrólisis; Hemicelulosa es un complejo de azúcares de 6 carbonos y 5 carbonos principalmente compuesto de arabinosa, xilosa $(\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4)_m$, manosa, galactosa y glucosa; y lignina polímero amorfo o polímero reticulado complejo con variedad de fenoles, de unidades fenilpropanoides (alcoholes p-cumarílicos, coniferílicos y sinapílicos), derivados del alcohol cinamílico que confiere rigidez estructural (Park et al., 2023).

Los biocombustibles sólidos derivados de biomasa pueden contribuir a ciclos de carbono cercanos a la neutralidad, ya que el CO_2 emitido en su uso es reabsorbido por nuevas plantas durante el crecimiento. Procesos como pirólisis o carbonización hidrotérmica transforman residuos agrícolas/forestales en recursos energéticos, evitando su quema incontrolada y reduciendo emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes. Además, cuando el biocarbón resultante se aplica al suelo, secuestra carbono durante décadas y mejora la fertilidad. Así, estos procesos promueven sistemas energéticos circulares, gestionan residuos eficientemente y mitigan el cambio climático (Anand et al., 2022).

2.1.2 Tipos de Biomasa

La clasificación de la biomasa puede basarse en su origen y composición, factores que determinan su poder calorífico y aplicabilidad energética. Una categorización ampliamente adoptada distingue tres grupos (Lin et al., 2025).

- Biomasa primaria: Residuos generados directamente en actividades de cosecha o manejo forestal/agrícola sin procesamiento industrial, como podas, rastrojos, troncos no comerciales y residuos de tala.
- Biomasa secundaria: Subproductos derivados del procesamiento industrial de materia prima biótica, incluyendo residuos agroindustriales (bagazo, cáscaras), de transformación de madera (aserrín, cortezas) y de producción animal (estiércol, camas de aves).
- Biomasa terciaria: Residuos post-consumo de productos de base biológica, como la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (RSU) o aceites usados.

Estos grupos presentan diferencias composicionales (humedad, lignina, cenizas) que condicionan su eficiencia en procesos termoquímicos y bioquímicos. Por ejemplo, la biomasa primaria suele ser usada para pirólisis por su baja contaminación, mientras que la terciaria requiere pretratamientos debido a sus impurezas.

2.1.3 Composición de la biomasa y los troncos flotantes

La composición de la biomasa vegetal se fundamenta en cuatro elementos clave: agua, celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa (40-50% del peso seco en biomasa leñosa) forma microfibrillas cristalinas insolubles en agua, unidas covalentemente a hemicelulosas para constituir la matriz primaria de la pared celular. La lignina, es un polímero aromático amorfo que confiere rigidez, representa el 15-30% en residuos leñosos como troncos flotantes, con mayores concentraciones en maderas duras (frondosas) que en blandas (coníferas).

Como evidencia la Tabla 1, la resistencia mecánica ("dureza") de la biomasa correlaciona directamente con su contenido de lignina. En mezclas de maderas heterogéneas, este contenido es particularmente elevado debido a interacciones estructurales no homogéneas entre fibras de celulosa de distintas especies, sin variación significativa por tamaño de partícula, entre el roble y las mezclas de maderas (Pradeep et al., 2025). Esta abundancia de lignina favorece la producción de biocombustibles sólidos, ya que actúa como agente aglomerante durante la densificación y su estructura poliaromática incrementa el rendimiento de carbono fijo durante procesos termoquímicos como la carbonización hidrotérmica.

Tabla 1. Composición polimérica de diferentes biomásas lignocelulosas

Tipo de biomasa	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Cáscara de arroz	36.06	21.34	21.16
Caña de azúcar	36.90	26.30	19.20
Residuo de café	27.38	40.10	6.00
Paja de trigo	30.00	22.00	17.00
Paja de arroz	26.00	24.00	3.80
Tusa de maíz	38.24	43.09	10.64
Hojas de maíz	45.70	35.80	4.03
Cáscara de maíz	15.30	40.40	2.87
Tallo de maíz	10.80	60.30	1.98
Cáscara de maní	42.40	27.80	13.00
Mezcla de maderas	37.20	23.80	27.00
Madera de roble	38.30	25.50	22.00
Miscanthus	41.40	19.70	22.60
Lúpulo	42.20	—	26.20

Fuentes: (Ivanovski et al., 2022) (Pradeep et al., 2025).

Ya que los troncos flotantes tienen su composición alterada por la descomposición bioquímica y heterogeneidad de especies, invalida correlaciones estándar de biomasa para estimar composición (Park et al., 2023), además es posible que disten de las composiciones en biomasa fresca de la Tabla 1. Es por ello, que en la Tabla 2 se toman en cuenta las composiciones reportadas por Qatarneh et al., (2021), que evidencia el cambio en celulosa, hemicelulosa y lignina, en los troncos flotantes.

En el estudio comparativo de Qatarneh et al., (2021) entre madera fresca y flotante, la composición de la madera sólida (sin corteza) mostró valores dentro de rangos típicos para especies forestales: celulosa (40-45%), hemicelulosa (20-35%) y lignina (15-45%), sin diferencias significativas atribuibles al tiempo en el río. Sin embargo, la corteza presentó alteraciones composicionales notables como el aumento de lignina (34-45% vs 25% en madera), hemicelulosa (15-21% vs 23-27%), y con reducción correspondiente en celulosa (15-18% vs 44%).

Tabla 2. Composición macromolecular de troncos flotantes de Génissiat dam, bs

Genero	Celulosa, %	Hemicelulosa; %	Lignina. %
Conífera	40.4	29.3	27.7
Fraxinus	41.0	26.5	26.8
Populus	43.9	22.5	25.1
Salix	39.6	21.4	29.2
Alnus	43.9	26.7	24.9
Corteza de Alnus	16.3	20.6	44.8
Corteza de Populus	17.5	15.1	34.2

El análisis de azúcares constituyentes de hemicelulosa (xilosa, manosa, glucosa) en la corteza no reveló cambios significativos en sus proporciones relativas. Esto sugiere que los procesos mecánicos durante el transporte fluvial (arrastre, abrasión) afectan principalmente los componentes estructurales externos, pero no causan degradación biológica extensiva de los polisacáridos en la biomasa leñosa.

2.1.4 Elementos mayores y trazas

Los materiales lignocelulósicos contienen especies alcalinas como sodio, potasio y calcio, las cuales generan ensuciamiento en los procesos térmicos. Estos elementos, junto con otros metales inorgánicos, disminuyen la eficiencia de las calderas durante la combustión y pueden formar cloruros que dañan el acero inoxidable. Además, contribuyen a la formación de cenizas, que son residuos indeseables en estos procesos. Debido al proceso de disociación de compuestos disueltos, la carbonización hidrotérmica es capaz de reducir estos compuestos y aumentar en cierta manera la eficiencia de las calderas y la disminución de corrosión (Madanayake et al., 2017).

2.1.5 Conversión de biomasa residual

La biomasa se utiliza como combustible desde la antigüedad, pero su voluminosidad, baja densidad energética y dificultades de manejo/almacenamiento limitan su aplicación. Para superar esto se emplean métodos de conversión (Figura 1) que incrementan su densidad energética, destacando dos enfoques:

Conversión bioquímica: Emplea microorganismos o enzimas para descomponer macromoléculas. Aunque eficaz para biomasas ricas en almidones o azúcares (ej: caña de azúcar), presenta baja eficiencia en materiales lignocelulósicos —como troncos flotantes— debido a la recalcitrancia de

la lignina. Además, requiere largos tiempos de procesamiento (días a semanas) y bajo consumo energético con respecto a métodos termoquímicos (Basu, 2018a).

Conversión termoquímica: Utiliza calor para transformar integralmente la biomasa (incluyendo lignocelulosa) en combustibles densificados. Sus principales variantes son:

Pirólisis: Descomposición térmica en ausencia de oxígeno (400-600°C) que produce biocarbón, bioaceite y gas.

Gasificación: Oxidación parcial (800-1100°C) que genera gas de síntesis (CO/H₂), en el caso de realizarse con humedad, se denomina gasificación hidrotérmica (175-767 °C).

Torrefacción: Pretratamiento leve (200-300°C) que mejora propiedades para procesos posteriores.

Carbonización hidrotérmica (HTC): Hace parte de los procesos hidrotérmicos (180-300°C) ideal para biomasa húmedas, produce hidrocarbonizado con alta densidad energética y posee un manejo optimizado (Huezo et al., 2021).

Licuación hidrotérmica (HTL): Proceso hidrotérmico (100-490 °C), produce combustible líquido y/o productos químicos a partir de biopolímeros sólidos.

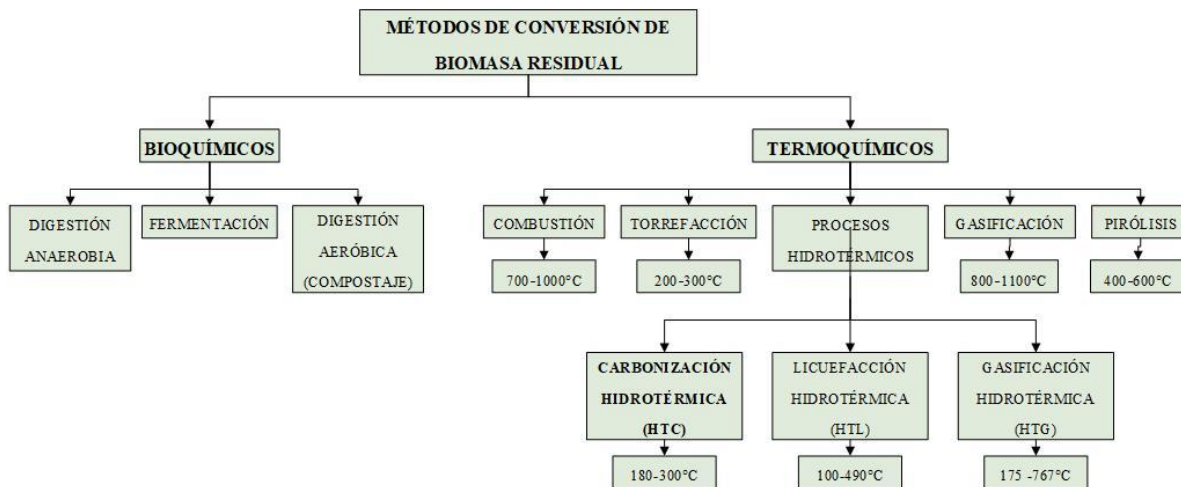


Figura 1. Métodos de conversión de biomasa (Portilla-Amaguaña et al., 2024)

2.1.6 Carbonización hidrotérmica o torrefacción húmeda

El proceso de carbonización hidrotérmica de biomasa transforma la biomasa húmeda en hidrocarbonizados de mayor valor densidad energética, mediante reacciones en agua subcrítica

(180-300°C y 2-10 MPa). En estas condiciones el agua actúa como: solvente polar que penetra la estructura lignocelulosa, catalizador, que disocia en iones H_3O^+ y OH^- acelerando reacciones ácido-base, y reactivo en reacciones de hidrólisis y desoxigenación (Nanda et al., 2018).

Este proceso presenta ventajas en el tratamiento de residuos húmedos y voluminosos, operando en relaciones de agua/biomasa entre 3:1 y 10:1. Cabe anotar que se tiene un rango hasta 300°C, ya que a temperaturas mayores se considera licuefacción hidrotérmica (HTL).

Durante la HTC, la biomasa sufre transformaciones morfológicas y químicas progresivas asemejándose al carbón mineral, inicialmente con la descomposición de hemicelulosa, carbonización de celulosa, y reestructuración de lignina. En la Figura 2, se observa teóricamente las variaciones de masa y poder calorífico con variación de temperatura y tiempo, donde M_o es la masa inicial de la biomasa, M_f es la masa final de la biomasa, Q_o es la energía térmica inicial y Q_f la final respectivamente (Arteaga-Pérez et al., 2016).

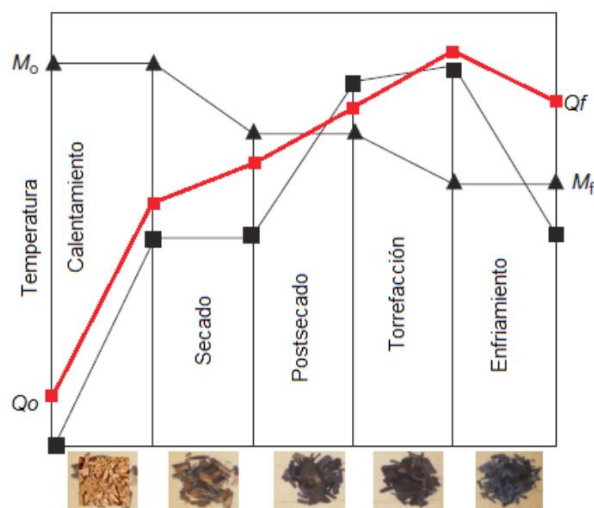


Figura 2. Evolución térmica de la torrefacción

Se evidencia una pendiente considerable en el cambio de energía térmica en el calentamiento, y luego una estabilización, esto se debe a que, dentro del complejo de reacciones orgánicas ocurridas en el HTC, la entalpía de reacción global es exotérmica y proporcionan energía al proceso, haciendo que no se requiere de mayor consumo energético para generar incrementos en la fase de secado y post secado (Basu, 2018b).

2.2 Clasificación fisicoquímica de los biocombustibles sólidos

Debido a lo fundamental de la composición de biomasa en los procesos de conversión termoquímicos, se realizan pruebas estandarizadas traídas directamente de los análisis del carbón mineral y con las cuales es posible determinar la estructura elemental basada en carbono (C), hidrogeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y oxígeno (O) como constituyentes principales.

2.2.1 Análisis próximo y último

El análisis próximo determina el contenido de humedad (ISO 18134/ ASTM E871), materia volátil (ISO 18123), contenido de cenizas (ISO 18122/ASTM D1102) y carbono fijo (por diferencia: $CF_{bs} = 100 - \text{Cenizas}_{bs} - MV_{bs}$), con estándares ISO para biocombustibles sólidos y estándar ASTM para madera, ambos reportados en base seca (bs).

El análisis ultimo (composición elemental), cuantifica C, H, N, S (ISO 16948 por combustión, ASTM E777/E778) y O (ISO 16993 por diferencia: $O = 100 - C - H - N - S - \text{Cenizas}_{bs}$), de forma experimental se utiliza el estándar ISO o ASTM para análisis por combustión.

La composición elemental es viable calcularla con correlaciones empíricas. En este estudio se utilizó la correlación empírica de Nhuchhen (ecuación 2.1 para estimación de C, ecuación 2.2 para estimación de H y ecuación 2.3 para estimación de O), la cual ajusta especialmente la biomasa leñosa (Ardila et al., 2024). Por otro lado, el análisis de composición inorgánica en cenizas utiliza fluorescencia de rayos X (XRF) y no se usa para elementos orgánicos (Park et al., 2023).

$$C = -35.9972 + 0.7698MV + 1.3269FC + 0.325\text{Cenizas}_{bs} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$H = 55.3678 - 0.4830VM - 0.5319FC - 0.5600\text{Cenizas}_{bs} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$O = 223.6805 - 1.7226VM - 2.2296FC - 2.2463\text{Cenizas}_{bs} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

2.2.2 Poder calorífico

Existen dos tipos principales de poder calorífico: el poder calorífico superior (HHV, por sus siglas en inglés) y el poder calorífico inferior (LHV). El HHV representa la cantidad total de energía liberada durante la combustión de un combustible, incluyendo el calor latente de vaporización del agua formada en el proceso. Por otro lado, el LHV excluye este calor latente, ya que asume que el vapor de agua no se condensa y, por tanto, no se recupera dicha energía. La elección entre uno u otro depende de la normativa vigente en cada país y del tipo de sistema de combustión utilizado,

como es el caso de algunas calderas donde el agua no alcanza la temperatura de condensación, lo que justifica el uso del LHV. Además, el poder calorífico puede variar significativamente en función del tipo y composición de la biomasa, razón por la cual es fundamental caracterizar con precisión este parámetro en los combustibles industriales, con el objetivo de optimizar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de las emisiones (Basu, 2018a).

El poder calorífico puede determinarse mediante métodos experimentales o por correlaciones empíricas. Entre los métodos experimentales, se destaca el establecido por la norma ISO 18125, aplicable a biocombustibles sólidos. Este método utiliza un calorímetro de bomba, donde se lleva a cabo una combustión adiabática en presencia de oxígeno; el calor generado se transfiere a una masa de agua, permitiendo calcular el poder calorífico a partir de la relación entre el calor liberado y la masa de combustible. Otros métodos experimentales incluyen la celda de combustión, en la que se mide el incremento de temperatura de un líquido refrigerante calentado por la combustión, y la espectroscopía infrarroja, que analiza los productos de combustión para estimar el poder calorífico mediante relaciones termodinámicas.

Por otra parte, las correlaciones empíricas se basan en datos obtenidos del análisis próximo y último de distintas biomásas y materiales carbonizados, junto con valores experimentales de poder calorífico. Estas correlaciones, desarrolladas a través de regresiones estadísticas o técnicas de inteligencia artificial, permiten predecir el poder calorífico de una muestra a partir de su composición. Ejemplos de ello son los trabajos de Dodo et al., (2023) y Parikh et al. (2005), este último basado en una base de datos de 450 biocombustibles sólidos. Algunas de las correlaciones más reconocidas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Correlaciones comunes para estimación del poder calorífico superior

Referencia	Correlación	Base
(Parikh et al., 2005)	$HHV = 0.3536FC + 0.1559MV - 0.0078ASH$	b. s
(Shen et al., 2010)	$HHV = 19.914 - 0.2324ASH$ $HHV = -1.3675 + 0.3137C + 0.7009H + 0.0318O$	b. s
(Cordero et al., 2001)	$HHV = 0.3543FC + 0.1708VM$	b.s.l.c
<u>b.s = base seca; b.s.l.c = base seca libre de cenizas</u>		

De acuerdo con Kieseler et al., (2013), la correlación empírica propuesta por Parikh y Channiwala presenta el mejor ajuste entre las evaluadas, ya que se desarrolló a partir de un conjunto amplio de

datos (450 muestras) y muestra un error relativo del 3.8%, inferior al reportado por las demás correlaciones incluidas en la Tabla 3.

2.2.3 Rendimiento másico

El rendimiento másico (RM) es la fracción de masa sólida obtenida después de un proceso de conversión termoquímico de biomasa como HTC o pirólisis (Basu, 2018c). Este parámetro puede expresarse en diferentes bases: experimental (exp), base seca (bs) y base seca libre de cenizas (bslc), como se detalla en las ecuaciones 2.4 a 2.6:

$$RM_{exp} = \frac{\text{Masa total de producto sólido}}{\text{Masa húmedad inicial de biomasa}} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$RM_{bs} = \frac{\text{Masa total de producto sólido seco}}{\text{Masa inicial de biomasa seca}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$RM_{bslc} = \frac{\text{Masa total de producto seco y libre de ceniza}}{\text{Masa inicial de biomasa seca y libre de ceniza}} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Para convertir el rendimiento másico experimental a base seca, se emplea la ecuación 2.7, donde M representa el contenido de humedad de la biomasa (fracción en masa):

$$RM_{bs} = \frac{RM_{exp}}{1-M} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Análogamente se realiza para conseguir base seca y libre de ceniza, con la ecuación 2.8, donde Ash_{bs} es el contenido de ceniza en base seca tanto de la biomasa como del carbonizado.

$$RM_{bslc} = \frac{RM_{bs} - Ash_{bs-HTC}}{1 - Ash_{bs-Biomasa}} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

2.2.4 Densidad energética y rendimiento energético

La densidad energética (DE) se define como la cantidad de energía liberada por unidad de masa durante la combustión completa de un biocombustible. Este parámetro tiende a incrementarse como resultado del proceso térmico y se expresa en las mismas unidades que el poder calorífico, tales como kJ·kg⁻¹, kcal·kg⁻¹ o Btu·lb⁻¹. Comúnmente, la densidad energética se reporta en base seca (bs), para permitir comparaciones más precisas entre materiales orgánicos.

En cuanto al rendimiento energético (RE), ecuación 2.9, representa la fracción de energía retenida en el producto carbonizado respecto a la biomasa original, siempre es inferior del 100% por la

degradación parcial de compuestos orgánicos, e implica un factor de pérdida de energía relacionada a la masa.

$$RE = \frac{\text{Energía en el producto hidrocarbonizado}}{\text{Energía en la biomasa cruda}} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

De acuerdo con Ivanovski et al. (2022), para llevar a cabo estos cálculos se requiere conocer tanto el HHV como el RM, ambos expresados en base seca (bs). Para la densidad energética el cálculo se aprecia en la ecuación 2.10.

$$DE_{bs} = \frac{HHV_{HTC\ bs}}{HHV_{Biomasa\ cruda\ bs}} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

El rendimiento energético, a su vez, se obtiene combinando la densidad energética con el rendimiento másico, ambos en bs, usando la ecuación 2.11.

$$RE_{bs} = RM_{bs} \times DE_{bs} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

2.3 Densificación de los hidrocarbonizados

El proceso de fabricación de briquetas a partir de biomasa carbonizada hidrotérmicamente tiene como objetivo principal aumentar la densidad y mejorar las propiedades de combustión, transporte y almacenamiento del material. Este proceso consiste en la compactación de la biomasa utilizando agentes aglutinantes naturales o el ajuste del tamaño de las partículas para facilitar la cohesión. El producto resultante se clasifica en categorías de calidad con los estándares internacionales de densidad aparente, como los especificados en la norma ISO 17225-3.

Una de las ventajas más destacadas del proceso es la utilización de la humedad residual de la biomasa como agente de aglomeración natural. Durante el prensado, al aplicar calor controlado (generalmente en torno a 150 °C), se produce una evaporación parcial del agua, lo que facilita la cohesión entre las partículas y reduce significativamente el contenido de humedad del producto final. Este tratamiento térmico no solo mejora la compactación y cohesión del material, sino que también aumenta la densidad y disminuye la porosidad, lo que se traduce en una mejora sustancial de la calidad y estabilidad del biocombustible sólido (Hansted et al., 2024).

2.3.1 Resistencia al impacto

La resistencia al impacto indica la capacidad de las briquetas para soportar caídas y golpes durante el manejo, transporte y almacenamiento, sin fracturarse. Es un criterio clave de calidad según la

normativa europea (CEN/TS 15210-1), que establece un valor mínimo de IRI de 100 para su comercialización. Esta propiedad depende de factores como la presión de compactación, el tamaño de partícula, la humedad y la lignina, que actúa como aglomerante natural (Ngene et al., 2024; Hansted et al., 2024).

Un valor alto de IRI indica una mayor capacidad de la briqueta para resistir impactos sin fragmentarse, lo que se traduce en un mejor desempeño mecánico durante su manejo logístico.

2.3.2 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión en briquetas se refiere a su capacidad para soportar cargas estáticas sin fracturarse ni deformarse, lo cual es fundamental para garantizar su integridad durante el almacenamiento, transporte y uso como biocombustible sólido. Este parámetro permite evaluar la cohesión interna del material y la efectividad del aglutinante natural o adicionado.

Las variables asociadas a esta prueba incluyen la expansión máxima, que representa el grado de expansión lateral o aplastamiento sufrido por la briqueta; la expansión mínima, que reflejan el rango de deformación observado; y la desviación estándar, que indica la homogeneidad del comportamiento mecánico entre briquetas.

2.3.3 Densidad de los hidrocarbonizados

La densidad de los materiales hidrocarbonizados es una propiedad clave que influye directamente en el poder calorífico volumétrico, la eficiencia del transporte y la estabilidad mecánica de las briquetas. Se define como la relación entre la masa del sólido y su volumen aparente, incluyendo los espacios interparticulares (Sevilla & Fuertes, 2009). En el contexto de biocombustibles sólidos, una mayor densidad indica un material más compacto y energéticamente eficiente, favoreciendo el almacenamiento y reduciendo los costos logísticos.

El análisis de la densidad permite distinguir entre la densidad intrínseca del hidrocarbonizado y la densidad aparente del conjunto particulado antes y después de la compactación. Esta última refleja el grado de compactación alcanzado durante el proceso de briqueteado y depende del tamaño de partícula, la humedad, la presión aplicada y la proporción de lignina, que actúa como aglutinante natural (Mitchual et al., 2014). Por tanto, evaluar esta variable es fundamental para optimizar las condiciones del proceso de densificación y mejorar la calidad del producto final.

2.3.4 Durabilidad

Esta propiedad es fundamental para garantizar que las briquetas mantengan su integridad estructural hasta el momento de su combustión, minimizando la generación de polvo y pérdidas materiales.

La prueba de durabilidad consiste en simular las condiciones de fricción, impacto y abrasión que ocurren en escenarios reales, como el transporte en sacos o la alimentación automática en calderas. El índice de durabilidad suele determinarse mediante métodos estandarizados, como los ensayos por tamizado o en tambores giratorios, que cuantifican el porcentaje de masa retenida después del ensayo (Cavallo & Pampuro, 2017; Mitchual et al., 2014).

Una alta durabilidad está asociada con briquetas de mayor densidad, adecuada cohesión interna y contenido adecuado de humedad, variables que dependen del tipo de biomasa, del pretratamiento aplicado (como la carbonización hidrotérmica) y de las condiciones de compactación (presión, temperatura, tiempo de retención).

2.4 Antecedentes

Tratándose de los troncos flotantes en ríos, se encuentran dos artículos de revistas indexadas, ambos realizados en Génissiat Dam, una represa del río Rhône en Francia, en donde se recolectaron 1,300 toneladas de troncos flotantes, los cuales habían disminuido la reserva de la represa y obstaculizaban el flujo, al precipitarse. En Qatarnah, et al., (2021) se realizó la clasificación y caracterización de la variedad de madera flotante en la represa.

Esto fue determinado a partir del análisis de la estructura mediante microscopio y caracterizado por el análisis de humedad, contenido de cenizas, análisis de composición macromolecular y análisis poder calorífico superior (HHV). Por otra parte, se confirmó la composición de celulosa, hemicelulosa y lignina, además de resultados en las otras pruebas que indicaron la posibilidad de carbonizar la biomasa por medio de carbonización hidrotérmica, debido al alto contenido de humedad.

En Qatarnah et al., (2021), se utilizaron las caracterizaciones y clasificaciones realizadas en el primer artículo para producir carbón duro, el cual se propuso como material para baterías debido

a su alta capacidad energética; esto se logró primero mediante carbonización hidrotérmica y luego a través de pirólisis a altas temperaturas.

En cuanto al proceso de carbonización hidrotérmica, esta se realizó con temperaturas de 180 hasta 220 °C, con tiempos de residencia entre 4 a 12 horas. Tanto el agua como el gas se consideraron subproductos de valor, por lo que se calcularon los rendimientos másicos, de igual forma que al producto (hidrocarbonizado). A menores tiempos y temperaturas, se observó un aumento en el rendimiento másico, por lo que son inversamente proporcionales, aunque cabe aclarar que este artículo realizó el proceso de HTC en una atmósfera de nitrógeno y en nuestro caso se utilizó una atmósfera de aire.

Por otro lado, luego de obtener el análisis por rendimiento másico, se continuó con la caracterización elemental por medio del estándar UNI 15104:2011, en la cual se apreció un aumento en la concentración de carbono, lo que es usual en los procesos de carbonización y también se realizó contenido de ceniza, con el estándar UNI 14775:2010, donde se apreció disminución según la biomasa, y luego se finalizó con un análisis SEM con pocas partículas.

El proceso HTC se ha usado por el grupo GCTC de la Universidad del Valle, aunque ningún trabajo utilizó biomasa de troncos flotantes. Es por ello que se realizó únicamente la caracterización elemental y de composición inmediata, a los hidrocarbonizados obtenidos.

En cuanto a los antecedentes locales, la presente investigación se desarrolló en el Grupo de Ciencia y Tecnología del Carbón (GCTC) de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle, que ha liderado diversos estudios relacionados con el aprovechamiento sostenible de residuos de biomasa, particularmente los provenientes de ingenios azucareros, como el bagazo y los residuos agrícolas de corte de caña de azúcar (RAC). El grupo ha abordado procesos de torrefacción seca, húmeda y densificación, así como evaluaciones de la cinética de combustión, con el objetivo de determinar rutas adecuadas para la valorización de estos residuos.

Payares y Ramos (2020). Llevaron a cabo procesos de densificación y torrefacción de RAC. Hallaron que partículas más pequeñas (0.25 mm) mejoran la resistencia al impacto y estabilidad de las briquetas, aunque reducen su reactividad debido a una menor transferencia de calor y masa en la estructura compacta. Además, identificaron que la temperatura óptima para maximizar densidad energética y rendimiento es 200 °C.

Jerez Mendívil y Marulanda Aguirre (2023). Estudiaron el rendimiento másico y energético de RAC sometidos a carbonización hidrotérmica. Los resultados mostraron rendimientos óptimos a 200 °C, con una relación H₂O/RAC 10:1, destacando que la temperatura fue el factor más influyente en el poder calorífico y los rendimientos.

Sarmiento-Gomez, Juan (2023). Evaluaron la reactividad a la combustión de RAC carbonizados hidrotérmicamente, determinando que el aumento de la temperatura reduce el índice de combustión, la variación de masa y el rendimiento másico. Los hidrocarbonizados obtenidos a 200 °C mostraron el mayor índice de combustión. Este trabajo recibió una evaluación meritoria.

Fuertes R. (2024). Analizó el comportamiento de la fase mineral durante la combustión de RAC torrefactados hidrotérmicamente y sin torrefactar, para evaluar su impacto en el proceso.

Portilla-Amaguaña. (2024). Identificó que temperaturas más altas incrementan la energía de activación y disminuyen la reactividad del hidrocarbonizado. También comprobó que el HTC contribuye a reducir riesgos de corrosión y escoriación al modificar la composición mineral y elevar las temperaturas de fusión de las cenizas.

Capítulo 3. Metodología experimental

3.1 Revisión bibliográfica

Para el desarrollo de esta investigación, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica utilizando principalmente los recursos de la Biblioteca de la Universidad del Valle, con acceso a bases de datos especializadas como Scopus y ScienceDirect. Esta búsqueda permitió recopilar los fundamentos teóricos sobre los procesos de hidrocarbonización aplicados a biomasa leñosa.

Cabe destacar que el presente trabajo se desarrolló en el marco del proyecto de investigación *“Evaluación del proceso de hidrotratamiento térmico aplicado a residuos de troncos de árboles encontrados en las orillas de los ríos Magdalena y Cauca como una estrategia sostenible para la producción de bioenergía”* financiado por la Universidad del Valle, CI 25254, desarrollado por el Grupo de Ciencia y Tecnología del Carbón (GCTC) de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle, sede Meléndez, el cual retoma importantes avances de trabajos previos realizados en este mismo grupo de investigación. Particularmente, se consultaron tesis de grado y posgrado desarrolladas en el GCTC que abordaron temas relacionados con procesos termoquímicos aplicados a diferentes tipos de biomasa.

La revisión permitió recopilar información valiosa sobre los fundamentos de la carbonización hidrotérmica, las particularidades de los troncos como material de alimentación y los factores que influyen en el proceso.

3.2 Obtención y preparación de muestras

3.2.1 Recolección, muestreo y almacenamiento

Se recolectaron muestras de troncos flotantes en una planta arenera cerca del río Cauca, sector El Hormiguero, Valle del Cauca, siguiendo los lineamientos de la norma ISO 18135 para el muestreo de biocombustibles sólidos. Cada tronco se transportó al laboratorio y se dejó secar al aire hasta que su peso permaneció constante, con el fin de evitar la degradación de la muestra a lo largo del proyecto. Una vez secado los troncos, se almacenaron en bolsas selladas para minimizar la absorción de humedad y degradación a lo largo del proyecto. En la Figura 3 se presenta las pilas de troncos flotantes donde se recolectaron las muestras.



Figura 3. Pilas de troncos flotantes en las riberas del Río Cauca.

Para determinar la humedad extrínseca—es decir, la humedad presente en el tronco al momento de la recolección—se sumergieron algunos ejemplares durante 72 horas en el mismo río Cauca. Posteriormente, estos troncos se dejaron secar sobre papel periódico a temperatura ambiente y se registró periódicamente su pérdida de masa hasta obtener peso constante. En la Figura 4 se presentan las muestras húmedas y secadas al ambiente.



Figura 4. Troncos húmedos y secos.

3.2.2 Molienda y cuarteo

Antes de realizar la molienda, las muestras originales de troncos se clasificaron según su longitud. Para ello, se midieron todos los troncos y se agruparon en rangos estadísticos homogéneos. De este modo, se estimó la variabilidad en el tamaño y la posible dificultad o costo asociado al triturado. Debido a que los troncos presentaban grosor similar, se descartaron únicamente aquellos con formas muy irregulares. Los tamaños longitudinales de los troncos fueron de aproximadamente 12.39 cm con diámetro aproximado de 5.5 cm. En la Figura 5 se presenta la clasificación de los troncos por longitud y en la Figura 6, se agruparon y pesaron.

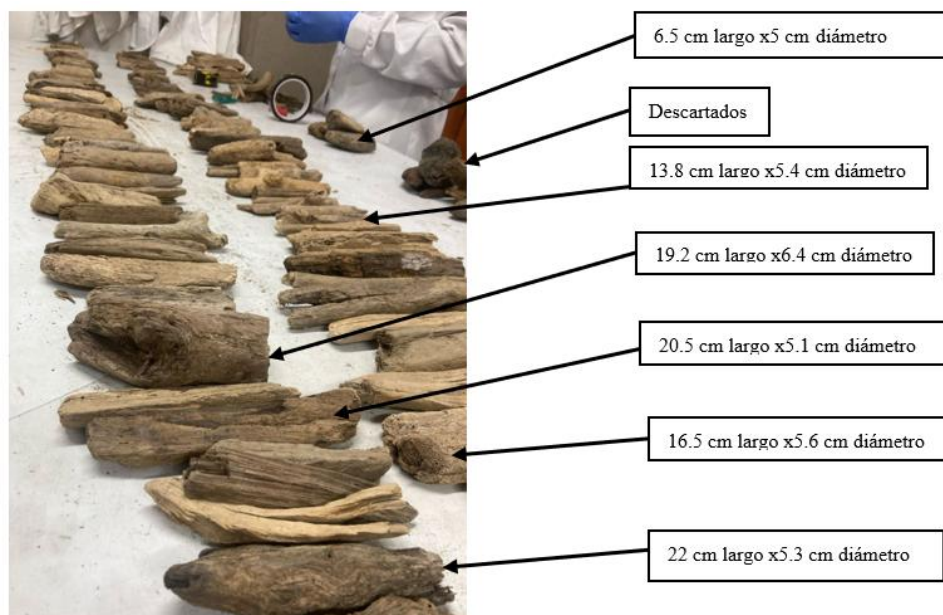


Figura 5. Orden de troncos por longitud.



Figura 6. Clasificación de troncos por tamaño de partícula y peso.

Las muestras seleccionadas se molieron con un molino forrajero de martillo (Figura 7) hasta obtener partículas que pasaron por un tamiz de apertura 2.38 mm (malla 8). Luego, se procedió al cuarteo de las muestras trituradas, conforme a lo establecido en la norma ISO 3310-1 para análisis granulométrico, con el fin de obtener submuestras representativas para los ensayos posteriores (Figura 8).



Figura 7. Molino forrajero de martillo de biomasa utilizado.



Figura 8. Muestras representativas molidas y almacenadas.

3.3 Caracterización de muestras

Se realizaron varios análisis a los troncos originales molidos con el fin de caracterizar sus propiedades fisicoquímicas antes de someterla a los procesos de carbonización hidrotérmica.

3.3.1 Análisis de humedad

Para determinar el contenido de humedad intrínseca de la muestra triturada, se empleó el método gravimétrico descrito en la norma ISO 18134. Las muestras se colocaron en estufa de secado a 105 ± 2 °C, registrándose el peso periódicamente hasta obtener un valor constante.

La humedad extrínseca se determinó a temperatura ambiente, dejando las muestras secar sobre papel periódico y pesándolas cada hora hasta que el peso no variara.

El porcentaje de humedad (% p/p) se calculó con la ecuación 3.1:

$$\text{Humedad, \% p/p} = \left(\frac{M_{\text{húmeda}} - M_{\text{seca}}}{M_{\text{húmeda}}} \right) \times 100 \quad (\text{Ec 3.1})$$

3.3.2 Densidad aparente

La densidad aparente se definió como la relación entre la masa de la fracción que pasa por malla 8 (2.38 mm) y el volumen que esta ocupa al verterse en una probeta sin aplicar ninguna fuerza adicional. Para ello la muestra se vertió, mediante embudo, en una probeta graduada de 100 mL hasta el enrase, permitiendo que el propio peso del material nivelara la superficie. Se registró la masa de la probeta vacía (M_1) y luego la masa de la probeta con la muestra (M_2). A partir de estos valores se calculó la densidad aparente mediante la ecuación 3.2:

$$\text{Densidad aparente} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{M^2 - M^1}{V} \quad (\text{Ec 3.2})$$

donde V es el volumen ocupado por la muestra (100 cm³).

3.3.3 Análisis próximo y último

El análisis próximo se determinó en el laboratorio de transformación de carbono e incluyó la materia volátil (ISO 18123), cenizas (ISO 18122), y carbono fijo calculado por diferencia (en base seca, bs). El análisis último determinó C, H, O utilizando la correlación empírica de Nhuchhen detallada en la sección 2.2.1. El elemento N fue determinado por diferencia.

3.3.4 Determinación de poder calorífico

El poder calorífico superior (HHV) se midió experimentalmente en el laboratorio de Bureau Veritas, oficinas de Barranquilla, laboratorio certificado internacionalmente, donde se utilizó una bomba calorimétrica según norma ISO 18125. Estos resultados se validaron con la correlación empírica de Parikh et al. (2005) de acuerdo con la ecuación 3.3:

$$HHV (MJ/kg) = 0.3536FC + 0.1559MV - 0.0078Ceniza \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Esta ecuación presentó un error del 3.8% según los fundamentos teóricos expuestos en la Sección 2.2.2 (Tabla 3).

3.4 Reactores usados para experimentación HTC

Las reacciones de carbonización hidrotérmica de los troncos triturados, se realizaron en reactores *batch* sin agitación, de marca BAOSHISHAN de capacidad de 100 mL, con cuerpo de acero inoxidable 304 y vasiija interna del material Politetrafluoroetileno (PTFE) resistente a temperaturas

de hasta 250 °C y presiones de hasta 3 MPa. En la Figura 9 se muestra una fotografía del reactor y sus partes.



Figura 9. Reactor HTC y piezas que lo componen

Los reactores se colocaron en un horno tipo mufla de marca Terrígeno, con temperatura máxima de 1200°C, aislamiento térmico en ladrillo y dimensión externa de 40x40x40 cm e interna de 20x20x20 cm, lo que entregó una capacidad de 8 L. Una fotografía de la mufla usada con su controlador de temperatura se presenta en la Figura 10.



Figura 10. Horno tipo mufla con controlador de temperatura

La temperatura interna de la mufla se calibró con una termocupla en el rango de temperaturas 28-232°C. La Figura 11 muestra la curva de calibración de la mufla entre los valores mostrados por el visor del controlador y la temperatura real determinada por una termocupla externa calibrada.

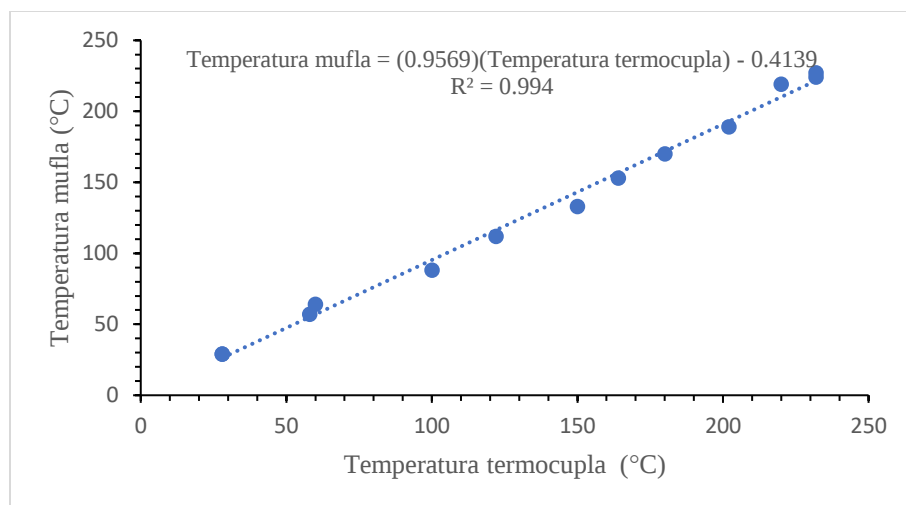


Figura 11. Curva de calibración de la temperatura del horno mufla

Los perfiles de temperatura y presión autogenerada de las corridas experimentales variaron según las condiciones de operación de cada reactor. El tiempo total por experimento (3–5 h) incluyó las etapas de calentamiento, residencia a temperatura constante y enfriamiento. La Figura 12(a) muestra un perfil representativo para la muestra P-220-0.5-5 en el reactor con agitación, mientras que la Figura 12(b) corresponde al reactor sin agitación (no se muestra el perfil de presión por no disponer de manómetro). En ambos casos, la temperatura se mantuvo durante la etapa isoterma con una desviación de $\pm 5^\circ\text{C}$ respecto al valor objetivo.

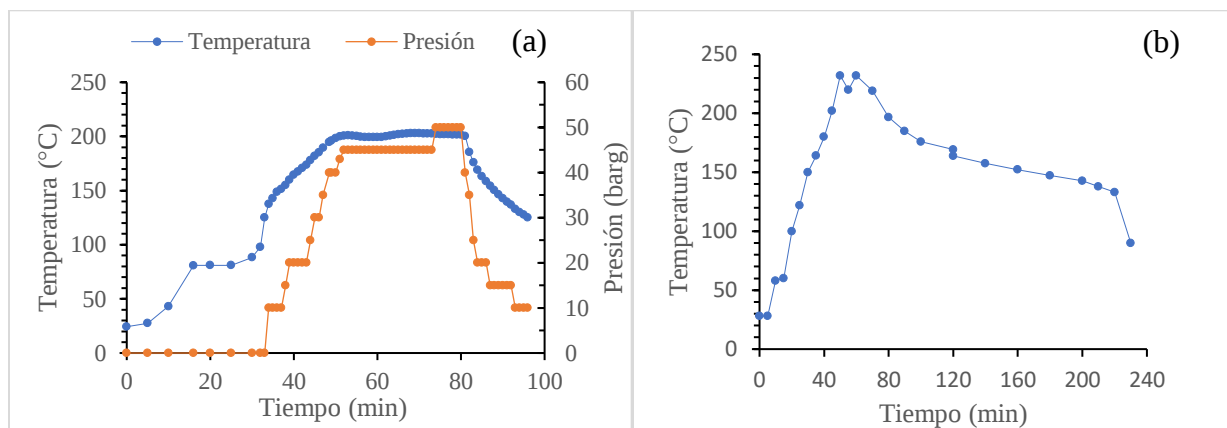


Figura 12. Perfil de temperatura en reactor (a) con agitación y (b) sin agitación

3.4.1 Filtración de hidrocarbonizados

Los hidrocarbonizados se filtraron al vacío utilizando filtros de papel marca Whatman grado 3 (poro de 8-12 μm) y 150 mm de diámetro, colocados sobre un embudo Buchner, soportado en un matraz Buchner y unido a una bomba de vacío. Además, con el fin de no dejar producto en la

vasija de los reactores, se hicieron 3 lavados con los lixiviados en todas las corridas. En la Figura 13, se presenta el sistema de filtrado utilizado.



Figura 13. Sistema para el filtrado de hidrocarbonizados

3.4.2 Secado de hidrocarbonizados

Por medio de una estufa de secado con control de temperatura (Figura 14) y a la temperatura $70\pm 2^{\circ}\text{C}$ los hidrocarbonizados se secaron por 24 horas hasta peso constante. Luego de secarse las muestras se colocaron en un desecador y posteriormente se pesaron en una balanza de 4 cifras decimales.

Estufa de secado "Memmert".



Interior de estufa de secado



Figura 14. Estufa de secado

3.5 Carbonización hidrotérmica en un reactor *batch* con agitación

Una vez determinadas las mejores condiciones de operación en el reactor *batch* sin agitación, se realizaron hidrocarbonizaciones complementarias en un reactor *batch* de mayor escala con agitación, Marca Parr, mostrado en la Figura 15. Lo anterior se realizó con el fin de evaluar el

comportamiento de los hidrocarbonizados a mayor temperatura utilizando agitación, así como para obtener mayor masa de hidrocarbonizados con el fin de usarlos en el proceso de densificación.



Figura 15. Reactor Parr utilizado, fuente: (Camacho Daza & Valencia García, 2024)

El reactor Parr tiene una capacidad de 500 mL y está equipado con un sistema de calentamiento con rampa controlada hasta 6 °C/min, sistema de agitación mecánica y controladores integrados de temperatura y velocidad de agitación, tal como se muestra en el diagrama de la Figura 16.

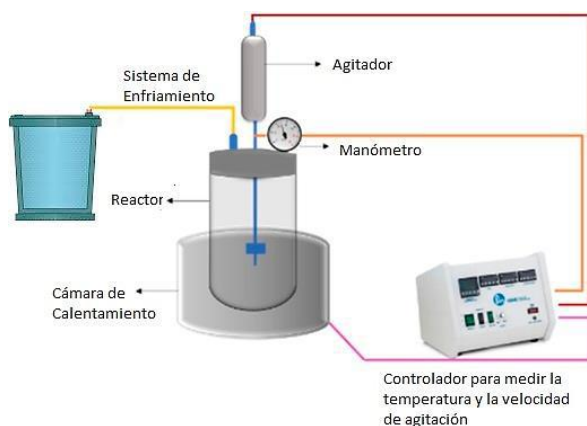


Figura 16. Diagrama reactor Parr, fuente: (Camacho Daza & Valencia García, 2024)

El reactor se operó a 220°C y 253°C con 30 minutos de residencia y 300 rpm de agitación. En ambas corridas se utilizó una velocidad de calentamiento de 6°C/min.

3.6 Diseño experimental para el proceso HTC con reactor *batch* sin agitación

Se siguió un diseño factorial 2^3 con puntos centrales, considerando como variables independientes la temperatura (220, 210 y 200 °C), el tiempo de residencia (1, 1.5 y 2 h) y la relación agua/tronco (5, 7.5 y 10), cuyos niveles se definieron por pruebas preliminares. Para garantizar confiabilidad,

se realizaron réplicas experimentales midiendo como variable de respuesta el rendimiento másico del hidrocarbonizado, ejecutando todos los ensayos en el laboratorio del GCTC bajo condiciones controladas de calentamiento/enfriamiento (4 °C/min). La matriz experimental incluyó 10 ensayos con distintas combinaciones de factores: ensayos 1-4 y 6-10 (diseño factorial) y ensayos 5 y 8 (puntos centrales con T=210 °C, tiempo=1.5 h, relación=7.5), tal como se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4. Diseño de experimentos para reactor *batch* sin agitación.

Ensayo	Relación másica agua/tronco	Temperatura (°C)	Tiempo (h)
1	10.0	220	2.0
2	5.0	220	1.0
3	5.0	220	2.0
4	10.0	200	1.0
5	7.5	210	1.5
6	5.0	200	2.0
7	5.0	200	1.0
8	7.5	210	1.5
9	10.0	220	1.0
10	10.0	200	2.0

3.7 Análisis de hidrocarbonizados

Las muestras hidrocarbonizadas se caracterizaron siguiendo los métodos aplicados a los troncos original (Secciones 3.3.3 y 3.3.4) referenciados en la sección 2.2.1 y 2.2.2.

3.7.1 Análisis último

El contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno de los troncos originales e hidrocarbonizados se cuantificó con las correlaciones empíricas desarrolladas por Nhuchhen (Ardila et al., 2024)

3.7.2 Análisis próximo

Los contenidos de humedad (ISO 18134:2022), cenizas (ISO 18122) y materia volátil (ISO 18123), se evaluaron según las normas descritas en la sesión 2.2.1.

3.7.3 Poder calorífico

El poder calorífico superior (HHV) de los troncos originales e hidrocarbonizados se estimó mediante la correlación empírica de Parikh y Channiwala, seleccionada por su menor margen de error (~3.8%) frente a ensayos calorimétricos.

3.7.4 Rendimiento másico y energético de hidrocarbonizados

El rendimiento másico (RM) en base seca, bs, se calculó con las ecuaciones presentadas en la sesión 2.2.3, pesando cada muestra de tronco original y después de la HTC, después de filtrarse y secarse a temperatura ambiente hasta obtener peso constante.

El rendimiento energético (RE) se determinó con la ecuación presentada en la sesión 2.2.4 usando los valores de RM_{bs} y los HHV_{bs} de troncos originales e hidrocarbonizados. Estos índices permiten cuantificar tanto la fracción de masa recuperada como la proporción de energía retenida en los hidrocarbonizados.

3.8 Tratamiento estadístico de los resultados

Para evaluar la influencia de los factores temperatura, tiempo de residencia y relación agua/tronco sobre el rendimiento másico del hidrocarbonizado, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de los datos obtenidos en los 10 ensayos experimentales (incluyendo réplicas y puntos centrales). El procesamiento estadístico se ejecutó mediante el software Minitab® 19, permitiendo cuantificar la significancia de cada factor y sus interacciones en el proceso de carbonización.

3.9 Densificación de troncos originales e hidrocarbonizados

Se fabricaron briquetas con el tronco original y con los hidrocarbonizados obtenidos en el reactor Parr. Para la realización de briquetas se empleó una prensa hidráulica de 20 toneladas con un molde de 25 mm de diámetro y una altura máxima de 100 mm, aplicando condiciones controladas de presión y masa para garantizar una compactación adecuada. Tanto el molde como la prensa usada se muestran en la Figura 17.

Molde de briquetas con dimensiones Prensa hidráulica

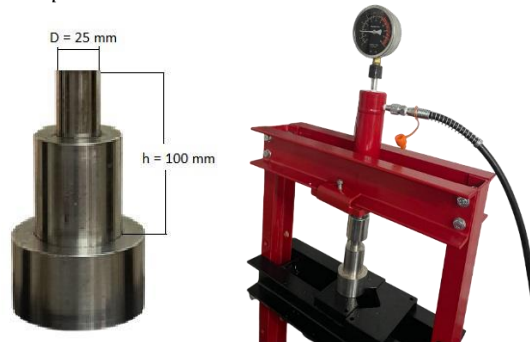


Figura 17. Imagen de prensa y molde usado para la densificación.

Para el proceso de densificación, se seleccionó el hidrocarbonizado P-220-0.5-5 obtenido en el reactor Parr con agitación, el cual presentó la mayor densidad energética.

La fuerza de densificación usada fue de 10 kN, la cual fue menor que la utilizada en el estudio de (Camacho & Valencia, 2024) quienes trabajaron con presiones entre 50 y 100 kN. La anterior presión de densificación se seleccionó dado que las presiones de compactación más altas pueden dificultar la combustión de las briquetas debido al aumento de la densidad y la reducción de la porosidad, lo que limita la penetración del oxígeno y la difusión de gases combustibles, además de reducir el área superficial expuesta al aire e incrementar la temperatura de ignición necesaria para iniciar la combustión (Mitchual et al., 2014).

Para mejorar la cohesión de las partículas, se añadió agua en una proporción del 10% tanto en el tronco original (TO) como en los hidrocarbonizados, lo cual activa la plasticidad de la lignina y mejora su función de aglomerante natural, según lo reportado por Ngene et al., 2024.

Se emplearon troncos de tamaño de partículas pasante 2.38 mm (-M8) y pasante 0.250 mm (-M60). Con lo anterior se elaboraron briquetas de diferentes proporciones: 100 % HTC, mezclas 70/30 y 50/50 HTC/tronco TO en ambas granulometrías y 100 % TO.

3.9.1 Densidad de briquetas

La determinación de la densidad de las briquetas se realizó mediante mediciones de diámetro y altura con un calibrador Vernier digital. Para ello se empleó la ecuación 3.4, donde “*m*” corresponde a la masa de la briketa con una precisión de $\pm 0.0001\text{g}$, “*d*” representa el diámetro de la briketa en cm y “*l*” la altura de la briketa en cm, ambas con una precisión de $\pm 0.001\text{cm}$.

$$\rho = \frac{m}{\pi \times (d/2)^2 \times l} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

3.9.2 Resistencia al impacto

Se evaluó la resistencia mecánica de las briquetas mediante una prueba de caída (*tumbling* por sus siglas en inglés), (Hansted et al., 2024) para simular condiciones reales de manipulación y transporte. Como parámetros de respuesta se empleó el Índice de Resistencia al Impacto (IRI).

El procedimiento consistió en dejar caer las briquetas en caída libre desde una altura de 1.8 metros, repitiendo esta acción hasta un máximo de cinco veces (N). Tras cada caída, se contabilizó el

número de fragmentos desprendidos (n) y se registró el peso final de la briqueta para evaluar la integridad estructural.

El índice IRI se calculó con la ecuación 3.5, siendo la respuesta cuantitativa de la capacidad de las briquetas a resistir impactos

$$IRI = 100 \times \frac{N}{n} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

3.9.3 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se evaluó utilizando una prensa hidráulica manual de 20 toneladas, aplicando una carga constante de 50 kN. Para registrar las deformaciones, se empleó un calibrador Vernier digital con una precisión de ± 0.001 cm. Antes de aplicar la carga, se trazaron líneas de referencia sobre el contorno de la briqueta. Finalizada la prueba, se repitió el trazado sobre la superficie deformada y se compararon las distancias entre las marcas iniciales y finales, lo que permitió determinar la expansión lateral.

Esta metodología resultó efectiva para analizar la capacidad de las briquetas de conservar su integridad estructural bajo carga. Los parámetros evaluados incluyeron la deformación máxima y la desviación estándar de los valores obtenidos. La Figura 18 ilustra el procedimiento de compresión, mostrando las marcas realizadas antes y después del ensayo.

Prensa en fase de carga sobre briqueta.



Briqueta deformada post-compresión.

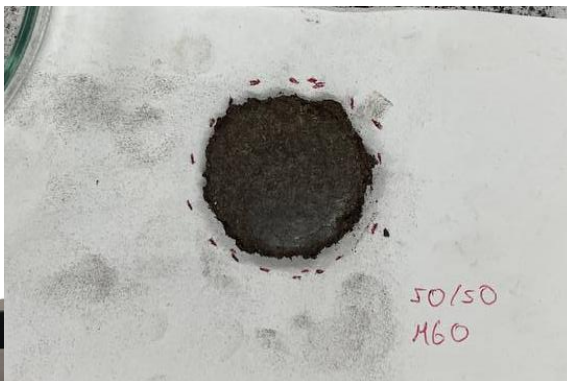


Figura 18. Ejemplificación de briqueta sometida a carga en prensa hidráulica manual.

3.9.4 Durabilidad

Siguiendo el protocolo propuesto por Hansted et al. (2024), se evaluó la durabilidad de las briquetas 72 horas después de su fabricación, tiempo suficiente para permitir el secado y estabilización del material.

El ensayo consistió en introducir cada briqueta en un tamizador eléctrico equipado con un tamiz de malla 4, junto con tapa y fondo, operado durante 15 minutos. Este sistema reproduce tanto la vibración como el roce con superficies metálicas, simulando condiciones reales de operación. En la Figura 19, se muestra el tamizador eléctrico utilizado.



Figura 19. Tamizador eléctrico.

Capítulo 4. Resultados y Análisis de Resultados.

En este capítulo se presentan los resultados y análisis de la caracterización de los troncos flotantes y los hidrocarbonizados, a través del análisis próximo, último y poder calorífico. Además, con el fin de evaluar la tecnología HTC se presentan los resultados de rendimientos másicos y energéticos de los hidrocarbonizados, así como los índices de resistencia mecánica, compresión, durabilidad y densidad para evaluar el proceso de densificación de los TO e hidrocarbonizados.

4.1 Caracterización de los troncos flotantes originales

4.1.1 Análisis de tamaño de troncos

La caracterización inicial se basó en el tamaño (longitud) y su peso de la muestra recolectada, lo cual permitió estimar la dificultad que implicó la posterior molienda. En este caso, la distribución se evaluó a partir del largo de los troncos, ya que presentaban un grosor aproximadamente similar. Debido a sus dimensiones, no fue viable utilizar tamices convencionales para determinar la distribución del tamaño de partícula. La distribución de peso según los tamaños por longitudes de los troncos se presenta en la Figura 20.

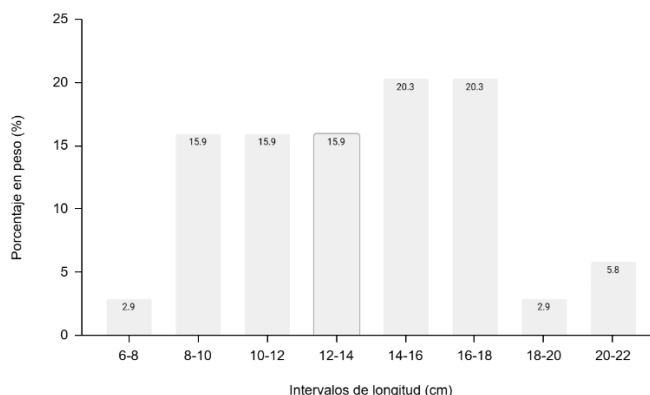


Figura 20. Distribución de peso en función de las longitudes de troncos original.

Se observa en la figura 20 que el 88 % p/p de los troncos presenta un tamaño de partícula entre 8 y 18 cm. Este alto porcentaje de partículas de tamaño mediano evidenció la necesidad de realizar una molienda adicional en el molino forrajero, con el fin de aumentar el volumen de muestra disponible para el proceso HTC.

Para ello, se seleccionó un tamaño de 2.38 mm (pasante malla N.º 8), para que la partícula pueda procesarse en ambos reactores *batch* sin agitación y con agitación, y que no se consuma alta energía durante el proceso de molienda.

4.1.2 Humedad de los troncos flotantes originales

La humedad extrínseca de los troncos flotantes originales, obtenido de las pilas de troncos en las riberas del Río Cauca fue del 33% p/p, lo cual es importante para el proceso HTC. La muestra representativa de troncos originales de tamaño 2.38 mm presentó una humedad de 14% p/p. Este decrecimiento de humedad, posiblemente es causado a que, durante la molienda, la fricción evaporó parte del agua original. Con el porcentaje de humedad del 14 % p/p, se calculó la masa adicional de agua requerida en el proceso HTC para cumplir las relaciones agua/tronco 5/1 y 10/1.

4.1.3 Análisis próximo y HHV del tronco original

En la Tabla 5, se presenta el análisis próximo, bs, y el HHV, bs de los troncos flotantes originales. Para propósitos comparativos, se presentan el análisis próximo de troncos flotantes procedentes del Río Magdalena (Sector Las Flores, cerca de Bocas de Ceniza, Barranquilla) y de un carbón mineral.

Tabla 5. Análisis próximo de tronco original, bs.

Muestra	Materia volátil (% p/p)	Cenizas (% /p/p)	Carbono Fijo* (% p/p))	HHV** (kJ kg ⁻¹)	Referencia
Troncos flotantes río Cauca	87.90	6.10	6.00	15,786	Este trabajo
Troncos flotantes río Magdalena	80.91	1.99	17.10	19,464	Este trabajo
Carbón mineral	34.20	4.60	61.20	34,050	(Martinez-Mendoza et al., 2023)

* Calculado por diferencia, **HHV: Poder calorífico superior

Se observó que los troncos flotantes de los ríos Cauca y Magdalena presentaron composiciones relativamente cercanas en cuanto a materia volátil, ubicándose en el rango de 80–88 %, el cual está de acuerdo con los resultados encontrados por Velázquez Martí et al., (2023). Sin embargo, se encontraron diferencias significativas en el contenido de cenizas, donde la muestra de troncos del río Cauca presentó mayor concentración (6.10%) en comparación con la muestra del río Magdalena (1.99%).

La anterior discrepancia se atribuye principalmente a que los sitios de recolección de las muestras fueron diferentes. Las muestras del río Cauca fueron obtenidas en una zona de extracción de arena, mientras que las del río Magdalena fueron obtenidas directamente en el cauce del río. Los anteriores resultados de materia volátil y ceniza producen diferencias en el carbono fijo. Esto se refleja en que el carbono fijo de la muestra del río Magdalena es mayor que la del río Cauca.

En cuanto al HHV, se relaciona directamente con el contenido de carbono fijo. Por lo tanto, los troncos del río Magdalena presentaron un HHV 18.9 % superior al de los troncos del río Cauca, atribuido a un mayor contenido de carbono fijo de aproximadamente 64 %. Al comparar los HHV de ambos troncos con el carbón mineral, la biomasa fluvial mostró un contenido energético significativamente inferior; en el caso de los troncos del río Cauca, se estimó que en términos energéticos se requieren 2.15 kg de troncos equivalente a 1 kg de carbón mineral, mientras que la biomasa del río Magdalena requiere 1.75 kg para sustituir 1 kg de carbón mineral.

4.2 Caracterización de los hidrocarbonizados

Para la caracterización de los hidrocarbonizados se utilizó la siguiente nomenclatura, de acuerdo al siguiente ejemplo: 220-0.5-5, significando que el hidrocarbonizado se obtuvo en un reactor batch sin agitación a 220 °C, 0.5 h y una relación agua/tronco de 5:1. Para el ejemplo de la muestra P 220-05-5 significa que el hidrocarbonizado se obtuvo en un reactor *batch* con agitación a 220°C, 0.5 h y una relación agua/tronco de 5:1.

4.2.1 Análisis próximo de hidrocarbonizados

La Figura 21 muestra la distribución porcentual de Materia Volátil (MV), Cenizas y Carbono Fijo (CF) para los hidrocarbonizados obtenidos en los reactores *batch* sin y con agitación a distintas temperaturas, relaciones agua/tronco y tiempos de residencia. Se presenta nuevamente el análisis próximo de las muestras TO para propósitos comparativos.

Tal como se observa en la Figura 21, en general para todos los hidrocarbonizados, se encontró que la materia volátil disminuyó en comparación con la muestra TO. Como se esperaba, el tratamiento térmico causa desvolatilización, especialmente a mayores temperaturas y tiempos de residencia, lo cual reduce significativamente la fracción de compuestos orgánicos volátiles. Este comportamiento está de acuerdo con los resultados obtenidos por Hameed et al., (2020).

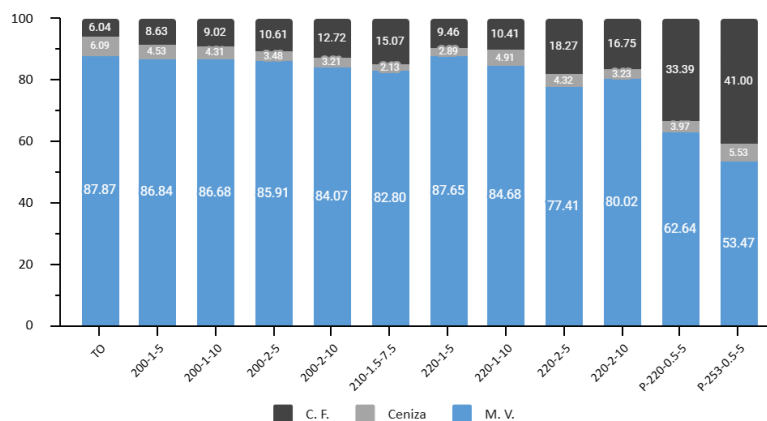


Figura 21. Análisis próximo de TO e hidrocarbonizados, bs.

También puede verse en la Figura 21 que los contenidos de ceniza de todos los hidrocarbonizados son menores que la muestra TO. Este comportamiento podría deberse a un efecto de dilución o migración de minerales presentes. Como consecuencia de lo anterior, el carbono fijo presentó en todos los hidrocarbonizados un comportamiento contrario.

En relación con el comportamiento de los hidrocarbonizados obtenidos en el reactor sin agitación con la temperatura, se encontró que a medida que se incrementó la temperatura y el tiempo de residencia, el contenido de MV disminuyó progresivamente. A las condiciones de 200°C-1-5 la materia volátil fue del orden de 86.8%, a 210°C-1.5-7.5 descendió a 82.80%, mientras que a 220°C decreció a valores de 77.41% %. Por su parte, en el reactor con agitación se alcanzaron los valores más pequeños del orden de 62.64 % y 53.47 %. Tanto la mayor temperatura como el tiempo de residencia y la agitación del reactor contribuyen a tener mayor desvolatilización.

Con respecto al comportamiento de la ceniza de los hidrocarbonizados con la temperatura y el tiempo de residencia, los resultados mostraron que las cenizas se mantuvieron en un rango de 2.13 a 4.91%, con una ligera tendencia a decrecer. La disminución observada podría estar asociada a fenómenos de dilución o redistribución de los minerales contenidos en la muestra.

En cuanto al carbono fijo, este parámetro aumentó en todos los hidrocarbonizados tanto con la temperatura como con el tiempo de residencia de la reacción. Los resultados mostraron que el CF se incrementó desde 6.04% en la muestra TO hasta 33.39% en el hidrocarbonizado P-220-0.5-5, mientras que en la muestra P-253-0.5-5 llegó a tener nivel de 41.0%. El incremento en la formación de carbono fijo sugiere la concentración de estructuras carbonáceas más aromáticas y

recalcitrantes, producto de la carbonización progresiva, lo cual está de acuerdo con el trabajo de Reza et al., (2015).

El efecto de la variable agua/tronco sobre los parámetros MV, ceniza y CF fue relativamente despreciable, tal como se encontró en el análisis de varianza mostrado en la sección 4.2.5.

4.2.2 Análisis último de TO e hidrocarbonizados

La Figura 22 muestra el análisis último para las muestras TO y obtenidas por HTC en los reactores *batch* sin y con agitación a distintas temperaturas, relaciones agua/tronco y tiempos de residencia.

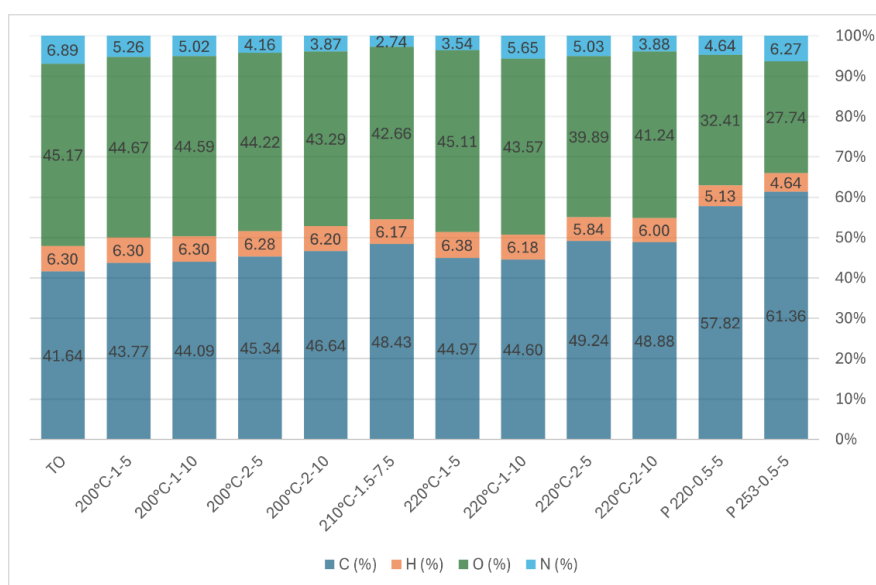


Figura 22. Análisis último de TO e hidrocarbonizados

Se observa en la Figura 22, que existió un aumento progresivo del contenido de C con la temperatura y el tiempo de reacción, desde 41.64 % en la muestra TO hasta 61.36 % en el hidrocarbonizado P-253-0.5-5. Este aumento está asociado al enriquecimiento en carbono por efecto de la desoxigenación y deshidrogenación inducida térmicamente durante la carbonización. La mayor concentración de C a mayores temperaturas y tiempos de residencia sugiere una formación progresiva de estructuras aromáticas y condensadas, típicas del proceso de carbonización hidrotérmica (Libra et al., 2011; Reza et al., 2015).

En relación con el contenido de H, se encontró que se mantiene casi constante (~6.3 %) para tratamientos suaves (200–210 °C), y disminuye hacia 4.64 % en el hidrocarbonizado P-253-0.5-5.

La disminución en el contenido de H está relacionada con la eliminación de grupos funcionales hidroxilados ($-\text{OH}$) y con la liberación de gases como H_2 y CH_4 , promoviendo estructuras menos alifáticas y más aromáticas como lo muestra Funke & Ziegler, (2010).

Respecto al contenido de O, este disminuye desde 45.17 % en la muestra original a 27.74 % en la muestra más severamente tratada (P-253-0.5-5.). La pérdida de oxígeno refleja la desoxigenación por mecanismos de descarboxilación y deshidratación, fundamentales en el HTC. Estos procesos contribuyen a mejorar la estabilidad térmica y el poder calorífico del producto sólido (He et al., 2018).

Los resultados presentados del contenido de N, muestran una tendencia de decrecer con el incremento en las condiciones de operación del proceso. Desde 6.89 % en la muestra TO hasta 2.74–3.88 % a 210–220 °C, y mínimos de 4.64 % en la muestra P-220-0.5-5 y 6.27 % en el hidrocarbonizado P-253-0.5-5. La reducción de estos elementos puede asociarse con la disolución de sales inorgánicas (principalmente Cl^- y S) en la fase acuosa y la liberación de compuestos nitrogenados volátiles como amoníaco. Sin embargo, a 253 °C se observa un ligero incremento, posiblemente debido a fenómenos de concentración por pérdida de masa o retención de formas más recalcitrantes de N. Estos resultados están de acuerdo con los reportados por Reza et al., 2015; Gao et al., 2020.

A partir de la relación atómica O/C y H/C se construyó el diagrama de Van Krevelen, el cual es una herramienta fundamental para caracterizar químicamente materiales carbonosos y estudiar sus transformaciones termoquímicas, especialmente durante procesos como la pirolisis, gasificación, combustión o carbonización hidrotérmica (HTC). El diagrama de Van Krevelen para las muestras de TO) e hidrocarbonizados se presenta en la Figura 23.

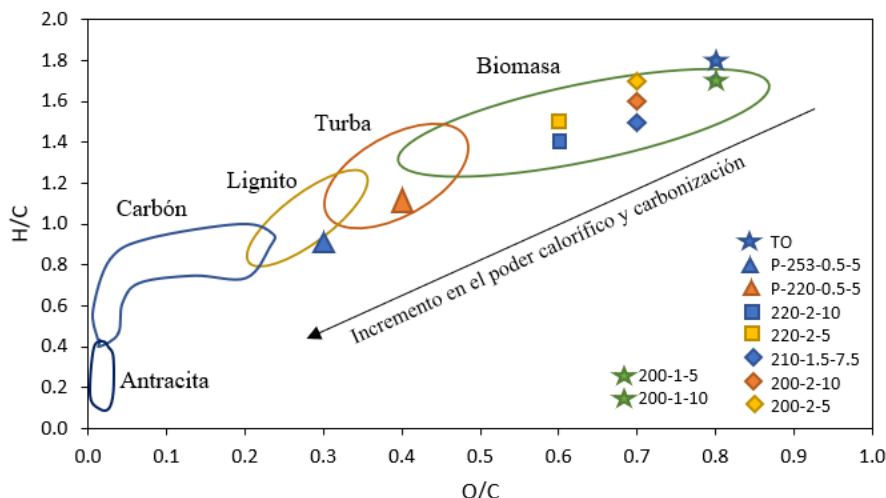


Figura 23. Diagrama de Van Krevelen para TO e hidrocarbonizados.

Como se observa en la Figura 23, la muestra TO presentó los mayores valores de O/C y H/C indicando que esta biomasa es rica en grupos oxigenados y estructuras alifáticas. Los hidrocarbonizados obtenidos en el rango de temperaturas 200–220 °C presentaron valores de O/C entre 0.6 a 0.8 y de H/C entre 1.4 y 1.7, lo cual es posiblemente una consecuencia de la progresiva desoxigenación con conservación parcial de grupos H, así como a la alta carbonización y pérdida de grupos polares. Los resultados mostrados también señalan que los hidrocarbonizados obtenidos a la temperatura de 253 °C, usando el reactor *batch* con agitación, presentaron los menores valores de las relaciones O/C y H/C. Una posible razón es que a estas condiciones se produce un hidrocarbonizado altamente recalcitrante y aromático casi similar al carbón mineral. Los resultados anteriores están de acuerdo con los reportados por Kambo & Dutta, (2015).

Por lo anterior la disminución de las razones atómicas O/C y H/C indica que existió un aumento en la aromaticidad y en la estabilidad del material carbonoso, lo cual lo hace más adecuado para aplicaciones como combustible sólido, adsorbente o precursor de materiales electroactivos.

4.2.3 Poder calorífico y densidad energética de los hidrocarbonizados

La Figura 24 muestra los resultados de poder calorífico y densidad energética de las muestras obtenidas por HTC en los reactores *batch* sin y con agitación a distintas temperaturas, relaciones agua/tronco y tiempos de residencia. Se presenta nuevamente el HHV de la muestra TO para propósitos comparativos.

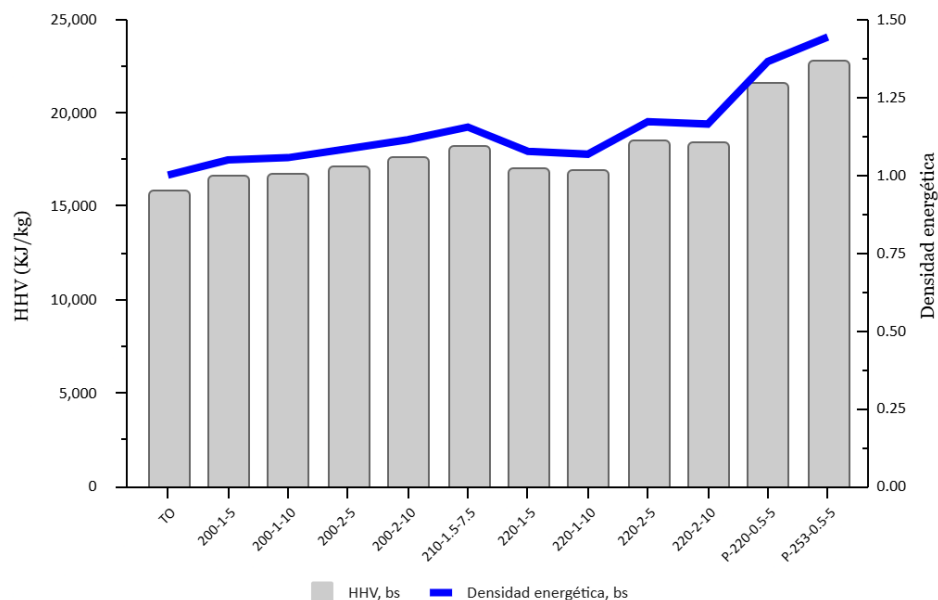


Figura 24. HHV y densidad energética de TO e hidrocarbonizados, bs.

Tal como se observa en la Figura 24, la muestra TO presentó el menor valor de HHV cercano a 16,000 kJ/kg, como consecuencia de su alto contenido de oxígeno y humedad inherente, lo cual está de acuerdo con los datos reportados por Libra et al., 2011; Funke & Ziegler, 2010. Se encontró que a medida que los troncos se someten a mayores condiciones de temperatura y tiempo en el proceso HTC, existe una tendencia creciente del HHV, reflejando un enriquecimiento en carbono y una eliminación progresiva de grupos oxigenados, tal como se muestra en la Figura 22.

En las muestras 200-1-5 y 200-1-10, el HHV presentó un ligero incremento respecto al de la muestra TO, alcanzando cerca de 16,500–17,000 kJ/kg. Este cambio moderado sugiere una conversión inicial, dominada por reacciones de deshidratación y desoxigenación incipientes, como lo reporta Reza et al., (2015).

El aumento del tiempo de residencia a 2 h, en las muestras 200-2-5 y 200-2-10 favoreció una mayor conversión térmica, presentando HHV alrededor de los 17,500 kJ/kg, lo cual indica una progresiva eliminación de componentes volátiles oxigenados (Texter et al., 2017; Zhuang et al., 2018).

La muestra 210-1.5-7.5 reportó un HHV de 18,220 kJ/kg, lo que sugiere que esta combinación permite una transformación más eficiente de los compuestos hemicelulósicos y parte de la celulosa en productos aromáticos y carbonáceos (He et al., 2018). Sin embargo, las muestras tratadas a 220-

1-5 y 220-1-10, el HHV muestra un leve descenso comparado con 210-1.5-7.5, lo que podría indicar la formación de productos carbonosos menos energéticos o mayor retención de oxígeno en forma de estructuras poliaromáticas oxigenadas. Esta tendencia cambia cuando se incrementa el tiempo de residencia a 2 h, 220-2-5 y 220-2-10, donde se observa nuevamente un incremento en el HHV, alcanzando valores superiores a 18,400 kJ/kg.

Las condiciones operativas del reactor Parr con agitación, empleadas para obtener las muestras P-220-0.5-5 y P-253-0.5-5, generan los valores más altos de HHV, en el rango de 21,540 a 22,789 kJ/kg. Esto confirma que, bajo agitación, la temperatura es el principal factor que impulsa el proceso de carbonización, incluso en tiempos de reacción cortos (Libra et al., 2011). En estas condiciones, predominan las reacciones de condensación, repolimerización y eliminación de oxígeno (CO_2 , CO , H_2O), lo que da lugar a materiales con propiedades similares a los carbones de bajo rango (Funke & Ziegler, 2010).

La diferencia entre las distintas relaciones agua/tronco resultó relativamente despreciable, según el análisis de varianza que se presenta más adelante en la sección 4.2.5. No obstante, en condiciones prolongadas, esta variable mostró un leve efecto positivo, aparentemente facilitando la transferencia de calor y masa.

La densidad energética, representada por la línea azul en la Figura 24 muestra un incremento progresivo desde la muestra TO hasta las muestras tratadas a temperaturas y tiempos mayores. Este comportamiento indica que el proceso de HTC incrementó la densidad energética del sólido, haciéndolo un combustible más compacto y eficiente.

Como se observa en la Figura 24, las muestras tratadas bajo condiciones severas (P-220-2-10 y P-230-0.5-5) presentaron los valores más altos de densidad energética. Esto se atribuye a una mayor compactación de la estructura carbonosa y a una reducción del contenido de oxígeno y grupos funcionales polares, lo cual favorece el almacenamiento energético por unidad de volumen.

Desde el punto de vista práctico, los materiales con alta densidad energética son preferibles para aplicaciones donde el volumen de almacenamiento y transporte es crítico. También, estas propiedades son especialmente relevantes para aplicaciones en energía térmica o combustibles sólidos densificados tales como en la producción de pellets o briquetas.

4.2.4 Rendimiento másico y energético de hidrocarbonizados

La Figura 25 muestra los rendimientos másicos (RM) y energéticos (RE) de los hidrocarbonizados obtenidos a partir de los troncos flotantes del río Cauca, luego de someterse a HTC en reactores tipo *batch*, con y sin agitación, bajo diferentes condiciones de temperatura, relación agua/tronco y tiempo de residencia.

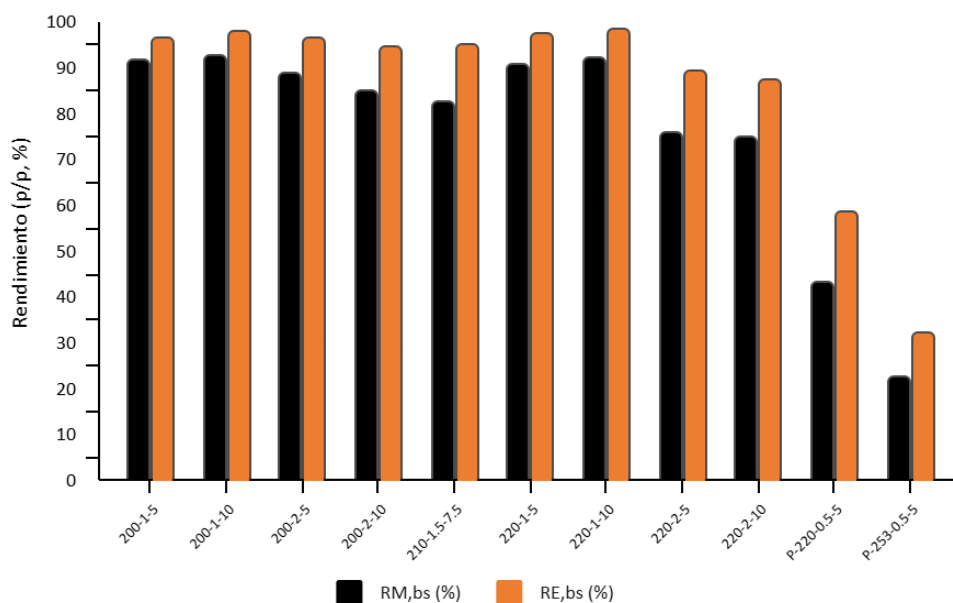


Figura 25. Rendimientos másicos y energéticos de los hidrocarbonizados, bs.

La Figura 25 muestra que, en general, ambos rendimientos decrecen con el aumento de la severidad del tratamiento, lo cual es consistente con estudios previos que reportan una mayor pérdida de masa volátil y compuestos oxigenados a temperaturas elevadas y mayores tiempos de residencia (Funke & Ziegler, 2010; Libra et al., 2011).

Las condiciones suaves usadas a 200 °C por 1 hora preservan mejor la masa sólida y su contenido energético, como lo demuestran los altos valores de RM y RE. Esto refleja una menor fragmentación de estructuras celulósicas y hemicelulósicas (Reza et al., 2015), lo cual permite conservar más del material original sin comprometer su poder calorífico.

Se encontró que el aumento de la temperatura y/o del tiempo intensifica las reacciones de deshidratación, descarboxilación y condensación, que derivan en mayor carbonización, pérdida de fracciones volátiles y reducción del RM y del RE. Estos efectos son ampliamente documentados en la literatura sobre HTC de residuos lignocelulósicos (He et al., 2018; Berge et al., 2011).

La diferencia entre $RE > RM$ en todas las muestras puede deberse a que el material remanente posee una mayor concentración de carbono fijo y una menor proporción de oxígeno, aumentando así su valor calorífico específico. Este comportamiento es característico del enriquecimiento energético que ocurre en HTC como lo reporta Cavallo & Pampuro, 2017; Sevilla & Fuertes, 2009.

Dado lo anterior, se encontró que las condiciones del proceso HTC moderadas (200–210 °C, tiempos de 1–2 h) ofrecen un buen equilibrio entre conservación de masa y densificación energética, lo cual es útil para aplicaciones energéticas. Por otro lado, condiciones más severas producen hidrocarbonizados más recalcitrantes y energéticamente densos, pero con menores rendimientos.

4.2.5 Significancia estadística de los factores del proceso

Para evaluar la significancia estadística de los factores del proceso (temperatura, tiempo de residencia y relación agua/biomasa) sobre el rendimiento másico, se implementó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el software Minitab 19. El análisis se realizó con un nivel de confianza del 95%, parámetro que garantiza la robustez del modelo estadístico desarrollado.

El procedimiento incluyó la evaluación de los residuos mediante gráficas de distribución normal y residual, herramientas fundamentales para verificar los supuestos del modelo. Como se observa en la Figura 26, la mayoría de los puntos sigue la línea de referencia, lo cual sugiere que los errores se distribuyen aproximadamente de forma normal y no existe sesgo sistemático en el modelo (Montgomery, 2013).

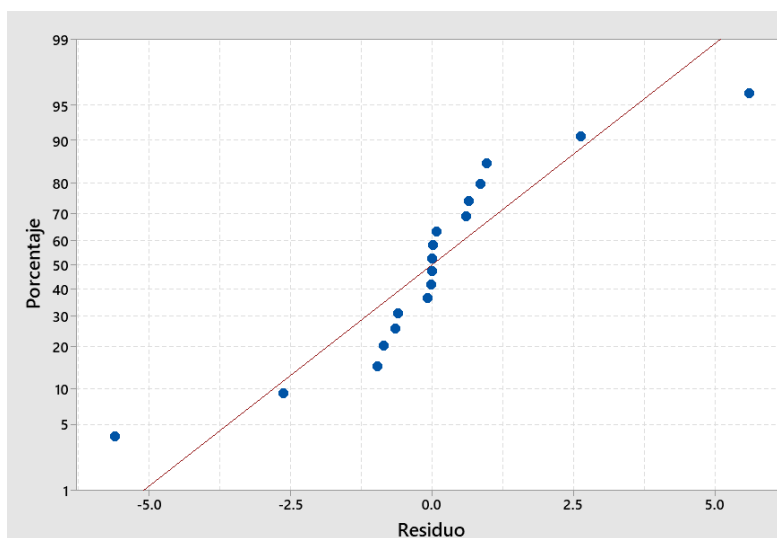


Figura 26. Probabilidad normal de los rendimientos másicos (ANOVA)

En la Figura 27 se muestran que los residuos se dispersan de manera aleatoria alrededor de cero, sin formar patrones o tendencias, lo que respalda la homocedasticidad, independencia estadística y la validez de los supuestos de regresión.

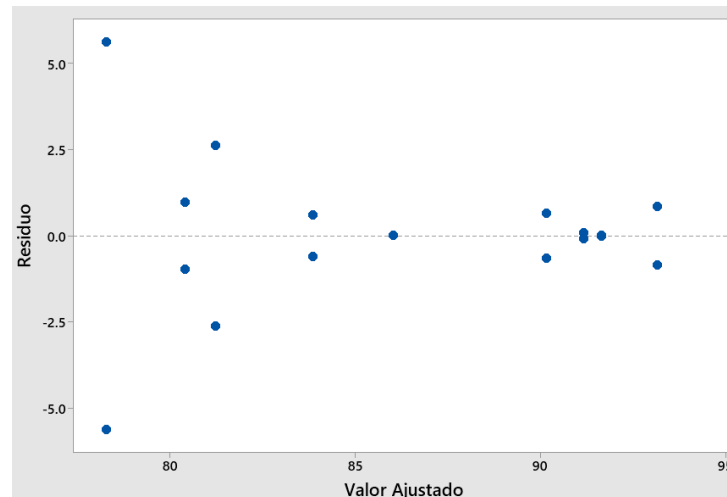


Figura 27. Residuos vs. Valores ajustados de los rendimientos másicos (ANOVA)

Luego de comprobar los supuestos del modelo, el gráfico de efectos estandarizados (Figura 28) establece el nivel crítico en 2.179 (línea roja). El factor B (tiempo de residencia) supera ampliamente este umbral, siendo el término más influyente en el rendimiento másico. A su vez, A (temperatura) resulta también significativo, pues su barra excede ligeramente el valor crítico. La interacción AB se halla en el límite de significancia, mientras que aún con el descarte de otras interacciones del modelo, C (relación agua/tronco) no alcanza el umbral, indicando que su efecto es estadísticamente despreciable en estas condiciones.

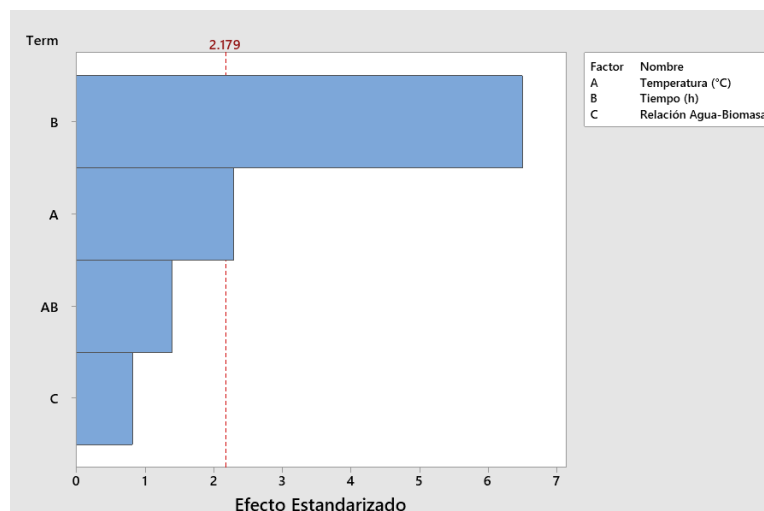


Figura 28. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados sobre rendimiento másico

En conjunto, el modelo es consistente, la variación en tiempo de residencia y temperatura explica la mayor parte de las fluctuaciones en el rendimiento másico, la interacción entre ambos puede refinar ajustes, y tanto la proporción agua/tronco como las interacciones de los factores del diseño de experimentos, carecen de un efecto apreciable bajo agitación nula.

4.3 Densificación de los hidrocarbonizados.

4.3.1 Morfología de las briquetas

En la Figura 29 se presentan las briquetas obtenidas a diferentes proporciones de mezclas. La nomenclatura usada para nombrar las briquetas, de acuerdo al siguiente ejemplo 50 HTC/50 TO-M60, es la siguiente: 50% p/p de hidrocarbonizados de tamaño pasante malla 8 mezclado con 50% p/p de tronco original de tamaño de partícula pasante malla 60.

Al comparar las briquetas obtenidas a diferentes tamaños de partícula se encontró que las obtenidas a pasante M8 presentaron una superficie rugosa y textura fibrosa, en las cuales se observa fibras y partículas individuales, lo cual indica una menor cohesión entre las partículas, mientras que las briquetas producidas con tamaño de partícula pasante M60 mostraron una superficie lisa y homogénea, con buena compactación. La reducción del tamaño de partícula posiblemente aumentó el área de contacto y favoreció la cohesión interparticular.

En relación con la muestra HTC 100%, esta presentó una superficie compacta y lisa, sin estructuras fibrosas visibles, indicando alta cohesión. Esto puede ser una consecuencia a que el tratamiento HTC descompone estructuras fibrosas y produce un material carbonáceo homogéneo con mayor afinidad para formar enlaces internos durante la compactación. El proceso HTC genera productos con menor contenido de hemicelulosa y celulosa, lo cual reduce la elasticidad y aumenta la rigidez de las partículas, facilitando la formación de briquetas más densas y estables (Libra et al., 2011).

Analizando las mezclas 50 HTC/50 TO y 70 HTC/30 TO con partículas pasantes M8, se encontraron superficies heterogéneas, presencia de partículas fibrosas de TO en una matriz más oscura y compacta (por el HTC). En la mezcla 70/30, se observa mayor cantidad de HTC, lo cual reduce la heterogeneidad visible. Para las briquetas de tamaño pasante M60 se presentaron superficies mucho más homogéneas y lisas. La molienda fina minimizó la diferenciación entre los dos materiales.

Briquetas	-Malla 8	- Malla 60
TO	 0 HTC/100 TO-M8	 0 HTC/100 TO-M60
HTC	 100 HTC/0 TO	
50 HTC/50 TO	 50 HTC/50 TO-M8	 50 HTC/50 TO-M60
70 HTC/30 TO	 70 HTC/30 TO-M8	 70 HTC/30 TO-M60

Figura 29. Imágenes de briquetas usando diferentes proporciones de mezclas

4.3.2 Densidad de muestras sin densificar y briquetas

En la Tabla 6 se presentan las densidades de las muestras TO y HTC sin densificar y de las briquetas usando tamaños de partícula pasantes M8 y M60. En términos generales, la densidad de las briquetas fue superior en comparación con las muestras sin densificar, lo cual confirmó la eficacia del prensado hidráulico para incrementar la masa por unidad de volumen y, por ende, la densidad energética volumétrica del combustible sólido (Ngene et al., 2024).

Tabla 6. Densidad de muestras TO, HTC y briquetas

Muestra	Densidad (kg/m ³)
Muestras sin densificar	
TO -M60	351
TO -M8	316
HTC -M8	254
Briquetas -M60	
50 HTC/50 TO-M60	432
70 HTC/30 TO-M60	543
0 HTC/100 TO-M60	639
Briquetas -M8	
50 HTC/50 TO-M8	423
70 HTC/30 TO-M8	507
0 HTC/100 TO-M8	651
100 HTC/0 TO	760

Al comparar las briquetas de diferentes tamaños de partícula, teniendo iguales proporciones HTC/TO, las briquetas elaboradas con M60 (0.250 mm), las densidades presentaron una tendencia ligeramente mayor que las de M8 (2.38 mm). Esto sugiere que la finura de la partícula mejora el empaque y la cohesión, reduciendo espacios intersticiales y aumentando la compactación, tal como lo reporta Hansted et al., 2024.

Analizando el efecto de la proporción de mezcla, para cada tamaño de partícula, se encontró que el aumento del contenido de HTC incrementó la densidad. Las mezclas 70/30 (HTC/TO) superaron a las 50/50. La briqueta 100 % de HTC, fue la que presentó la mayor densidad (760 kg m⁻³). Este comportamiento se explica por la menor porosidad y mayor rigidez estructural del material hidrocabonizado puro (Funke & Ziegler, 2010).

En contraste, las densidades de las muestras sin densificar (254–351 kg m⁻³) mostraron el aumento logrado tras prensado, ilustrando la importancia de la compactación para aplicaciones de almacenamiento y transporte. Respecto a esto, la combinación favorable de tamaño de partícula y proporción de HTC dependerá del balance deseado entre densidad máxima y consumo de energía en el proceso de prensado. En este estudio, las briquetas 100 % HTC y las mezclas 70/30 con Malla 60 ofrecieron el compromiso más favorable.

4.3.3 Resistencia al impacto

En la Tabla 7 se presentan los resultados del índice IRI de las briquetas producidas para cada una de las briquetas con variación en relación HTC/TO y tamaño de partícula.

Tabla 7. IRI de las briquetas

Briquetas	IRI
50 HTC/50 TO-M60	337
70 HTC/30 TO-M60	401
100 HTC/0 TO	471
0 HTC/100 TO-M60	2,213
50 HTC /50 TO-M8	201
70 HTC/30 TO-M8	302
0 HTC/100 TO-M8	613

Las briquetas provenientes exclusivamente de material TO (sin HTC) presentaron los valores de IRI más altos, tanto en el tamaño de partícula M60 como en M8, lo que indica alta resistencia al impacto. Se encontró que a medida que aumenta el contenido de HTC, el valor de IRI incrementa.

Tal como se muestra, todos los tipos de briquetas evaluadas cumplieron satisfactoriamente con el requisito mínimo de $IRI \geq 100$ establecido por la normativa europea para biocombustibles sólidos.

4.3.4 Resistencia a la compresión

En la Tabla 8 se muestran los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión, para cada una de las briquetas con variación en relación HTC/TO y tamaño de partícula.

En un primer aspecto, la expansión mínima y máxima de las briquetas sometidas a compresión refleja su capacidad para deformarse, lo cual depende de la composición (proporción HTC/TO) y la granulometría de la muestra.

Tabla 8. Expansión de las briquetas sometidas a compresión

Briquetas	Expansión mínima (mm)	Expansión máxima (mm)	Desviación estándar
50 HTC/50 TO-M60	1.21	4.40	2.3
70 HTC/30 TO-M60	4.40	7.26	2.0
0 HTC/100 TO-M60	1.08	2.69	1.1
50 HTC/50 TO-M8	3.56	4.96	1.0
70 HTC/30 TO-M8	4.79	5.03	0.2
0 HTC/100 TO-M8*	1.75	4.25	1.8
100 HTC/0 TO	4.09	6.31	1.6

*Se realiza a 45 kN

Para partículas finas (M60), la mezcla 50/50 exhibió una expansión relativamente baja de 1.21–4.40 mm, con desviación estándar (DES) = 2.3, indicando un comportamiento más frágil, mientras que la proporción 70/30 alcanzó valores más altos de 4.40–7.26 mm, DES = 2.0, señalando mayor ductilidad atribuible al aumento de la fracción HTC, que aporta estructuras aromáticas cohesivas. Estos datos son consistentes con los reportados en Ngene et al., (2024).

En partículas gruesas (M8), la expansión de la mezcla 50/50 a 3.56–4.96 mm, DES = 1.0 fue menor que la de la proporción 70/30 a 4.79–5.03 mm, DES = 0.2, aunque con menor variabilidad, lo que sugiere que los troncos originales mejoran la capacidad de deformación uniforme.

La briketa 100 % HTC mostró una expansión moderada de 4.09–6.31 mm, DES = 1.6, reflejando un equilibrio entre rigidez y cierta capacidad elástica, típica de materiales hidrocarbonizados (Hansted et al., 2024).

Las muestras originales (100 % troncos) presentaron expansiones bajas para M60 de 1.08–2.69 mm, DES = 1.1 y algo mayores para M8 con 1.75–4.25 mm, DES = 1.8, ensayo a 45 kN (debido a ausencia en deformación al aumento de fuerza), lo cual evidencia que la biomasa no tratada carece de la plasticidad aportada por la carbonización hidrotérmica. Indicando que un mayor contenido de fracción hidrocarbonizada y partículas más finas favorecen la expansión bajo compresión, mejorando la capacidad de absorción de deformaciones antes de la fractura, un parámetro clave para la resistencia mecánica durante almacenamiento y transporte.

4.3.5 Durabilidad de las briquetas

En la Tabla 9 se presentan los resultados de durabilidad de las briquetas con variación en la relación de HTC/TO y del tamaño de partícula.

Tabla 9. Durabilidad de las briquetas

Muestra	Durabilidad, % p/p
50 HTC/50 TO-M60	0
70 HTC/30 TO-M60	3
0 HTC/100 TO-M60	15
50 HTC/50 TO-M8	0
70 HTC/30 TO-M8	0
0 HTC/100 TO-M8	1
100 HTC/0 TO	52

Como se presenta en la Tabla 9, el hidrocarbonizado 100% HTC presentó la mayor durabilidad (52%), muy superior al resto de las formulaciones. Esto se atribuye a la estructura más densa, homogénea y rígida del material carbonizado por HTC, que reduce la porosidad y mejora la cohesión interna durante el prensado. Libra et al., 2011; Funke & Ziegler, 2010 reportaron que el proceso HTC degrada componentes amorfos como la hemicelulosa y parte de la celulosa, promoviendo una mayor densidad aparente y cohesión entre partículas carbonosas, lo cual incrementa la resistencia al desgaste superficial y la integridad estructural.

También se encontró que las briquetas con mezclas HTC/TO, para ambos tamaños de partícula (pasantes M60 y M8) muestran durabilidades muy bajas, entre 0% y 3%. Incluso un 50 o 70% de HTC no es suficiente para conferir integridad mecánica cuando se mezcla con la muestra TO, probablemente debido a falta de sinergia estructural entre ambos tipos de partículas. Las partículas de HTC no se cohesionan eficazmente con las fibras más elásticas del TO, lo que genera zonas débiles. Además, al no haber un agente aglutinante natural (como lignina fundida en procesos térmicos más intensos), la integridad estructural es deficiente (Samuelsson et al., 2012).

En general, se observó ligeramente mayor durabilidad (15%) en el caso de TO con partículas más finas (M60), mientras que con partículas más gruesas (M8) presentó un valor de 1 %. Esto sugiere que la molienda fina favoreció la compactación y el contacto entre partículas, pero no compensa totalmente la falta de cohesión natural en mezclas heterogéneas.

El ANOVA seguido de la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$; Figura 30) para comparación de pruebas de durabilidad, confirmó dos patrones estadísticos: a) Las muestras 50/50 -M60, 50/50 -M8, 70/30 -M8, 70/30 -M60 y original -M8 forman un grupo homogéneo sin diferencias significativas entre sí (sus intervalos de confianza para la diferencia de medias incluyen el cero).

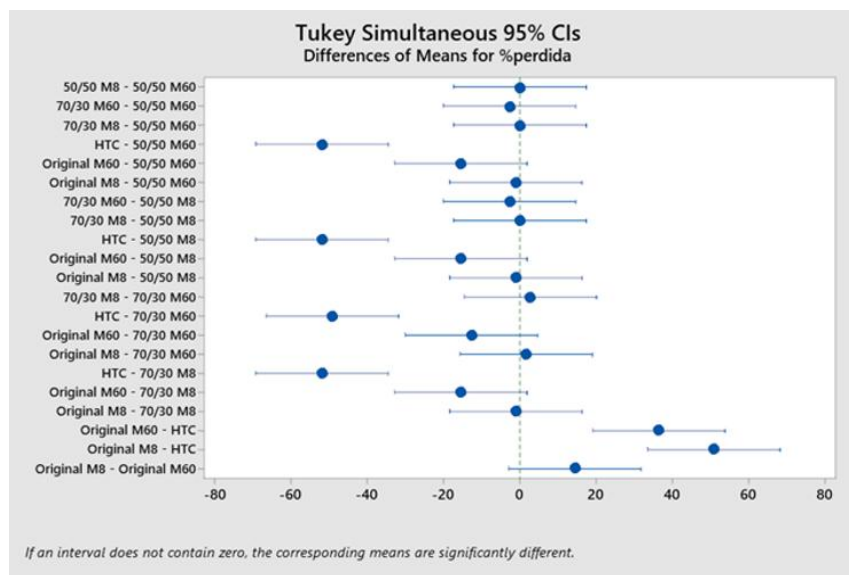


Figura 30. Tukey para comparación de pruebas durabilidad

b) La briqueta 100% HTC mostró diferencias significativas con todas las mezclas con biomasa (intervalos de confianza excluyendo el cero), confirmando su superior resistencia a la abrasión.

Adicionalmente, la comparación entre Original -M60 y 50/50 -M60 reveló una diferencia significativa, destacando la mayor robustez de la biomasa sin tratar frente a mezclas parciales.

En resumen, aunque todas las briquetas cumplen con los requisitos de durabilidad mecánica de la ISO 17831-1, únicamente el hidrocarbonizado (100 HTC) presentó una mejora mecánica significativa respecto su durabilidad, lo que lo convierte en la opción preferente cuando se requiere minimizar el desgaste superficial durante la manipulación y el transporte.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que la carbonización hidrotérmica (HTC) es un método eficaz para transformar los troncos flotantes en biocombustibles sólidos de mayor calidad. En condiciones de 220°C sin agitación, se logró aumentar el contenido de carbono fijo de 6.04% a 18.27% y reducir la materia volátil de 87.87% a 77.41%, mientras que en el reactor Parr con agitación a 253°C, los valores alcanzaron 41.00% de carbono fijo y reducción de la materia volátil a 53.47%. Estos cambios confirmaron la capacidad del proceso HTC para mejorar las propiedades del material utilizando temperaturas moderadas y aprovechando la humedad natural de la biomasa.

De manera destacable, la reducción del contenido de cenizas fue contraria a lo esperado; en lugar de incrementarse con la pérdida de materia orgánica, disminuyó notablemente, alcanzando valores mínimos de 2.13 % y 3.97 % en los reactores sin agitación y con agitación respectivamente, lo cual refuerza el valor potencial del hidrocarbonizado en aplicaciones industriales por su baja carga inorgánica.

Asimismo, el HHV mostró incrementos partiendo de un valor base de 15,786 kJ/kg en los troncos flotantes originales hasta alcanzar incrementos en los hidrocarbonizados, de 18,494 kJ/kg en la muestra a 220°C-2h-5:1 en el reactor sin agitación y de 22,789 kJ/kg en el reactor con agitación Parr a 253°C-0.5h -5:1, confirmando al hidrocarbón como alternativa energética viable.

Los rendimientos energéticos se mantuvieron altos alcanzando valores de hasta 98.2%, incluso a temperaturas más bajas y tiempos cortos (200°C, 1 h), lo que sugiere necesario recurrir a temperaturas moderadas con tiempos de residencia cortos para lograr productos energéticamente eficientes. Estos resultados proporcionan criterios valiosos para el diseño del proceso a mayor escala.

El estudio confirmó que el factor más influyente sobre el rendimiento másico del hidrocarbonizado en los reactores sin agitación fue el tiempo de residencia, ya que a 1 hora el rendimiento estuvo en un rango de 90-93% mientras que a 1.5 y 2 horas el rendimiento fue entre 72-86%, lo que demuestra una clara dependencia del rendimiento con respecto al tiempo de residencia. Por otro lado, el otro factor importante, pero con menos significancia fue la temperatura, debido a que a

mayor temperatura se obtuvo el menor rendimiento en los rangos de 72-90%. Esto fue corroborado por el análisis de varianza (ANOVA) que identificó el tiempo de residencia como el factor con mayor efecto sobre las variables de respuesta, seguido del factor temperatura.

En cuanto a la densificación, las briquetas elaboradas a partir del hidrocarbonizado P-220-0.5-5 mostraron una estructura compacta, homogénea y con alta integridad mecánica, cumpliendo con los requisitos establecidos por la norma europea, que exige un Índice de Resistencia al Impacto (IRI) igual o superior a 100.

Se observó en la morfología de las briquetas que el uso de troncos con mayor tamaño de partícula (-M8) generó fracturas prematuras y estructuras más amorfas, mientras que las partículas finas (-M60) favorecieron una distribución uniforme de las fuerzas de compactación y una mayor reproducibilidad en los resultados.

En pruebas de durabilidad, la adición troncos originales, especialmente de mayor tamaño de partícula, redujo considerablemente la estabilidad estructural de las briquetas. En contraste, la aplicación de HTC mejoró sustancialmente este parámetro, logrando porcentajes de durabilidad altos del orden 52 %. Estos resultados se reforzaron con el análisis estadístico de Tukey, que confirmó diferencias significativas en el porcentaje de pérdida entre diversas combinaciones, identificando a la formulación 70 % HTC y 30 % tronco M60 (0.250 mm) como la más adecuada para el transporte y manejo, gracias a su balance entre resistencia al impacto, cohesión y estabilidad frente al desgaste.

En conjunto, estos hallazgos respaldan el potencial de la carbonización hidrotérmica como tecnología para la valorización sostenible de residuos lignocelulósicos como los troncos flotantes procedentes del río Cauca. La solidez estructural de las briquetas, su elevado poder calorífico y la mejora en sus propiedades físico-mecánicas sugieren que este enfoque puede escalarse a nivel piloto.

5.2 Recomendaciones

Evaluar otras condiciones de operación que incluya tamaño de partícula, tiempo de residencia y temperatura en un reactor Parr con agitación.

Recolectar muestras de troncos en distintos puntos de la ribera del río Cauca, para clasificar los troncos flotantes por sus especies y macrocomposición, con lo que se puede dar una mejor estimación de la calidad del biocombustible producido y su potencial de mercado.

Realizar estudios de reactividad a la combustión de muestras TO, hidrocarbonizados y briquetas producidas utilizando análisis termogravimétrico TGA.

Realizar un estudio cinético del proceso HTC aplicado a troncos flotantes

Realizar un estudio técnico-económico-ambiental del proceso HTC al escalarlo a nivel piloto.

Realizar un estudio analizando composición elemental de las cenizas teniendo en cuenta los lixiviados de la HTC.

Capítulo 6. Referencias Bibliográficas

- Anand, A., Kumar, V., & Kaushal, P. (2022). Biochar and its twin benefits: Crop residue management and climate change mitigation in India. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 156). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111959>
- Andrade Navia, J. M., Olaya Amaya, A., & Caviedes Rubio, D. I. (2024). Environmental impacts generated by the hydroelectric power plant El Quimbo - Colombia. An ex-post evaluation. *Pensamiento Americano*, 17(34). <https://doi.org/10.21803/penamer.17.34.759>
- Ardila, Y. C., Figueroa, J. E. J., & Maciel, M. R. W. (2024). Mathematical models for predicting the higher heating value and ultimate analysis of biomass. *Industrial Crops and Products*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117777>
- Arteaga-Pérez, L. E., Segura, C., & Diéguez Santana, K. (2016). Procesos de torrefacción para valorización de residuos lignocelulósicos. Análisis de posibles tecnologías de aplicación en Sudamérica. *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, 73(573). <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/308445>
- Basu, P. (2018a). Chapter 1 - Introduction. In P. Basu (Ed.), *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third Edition)* (pp. 1–27). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00001-7>
- Basu, P. (2018b). Chapter 3 - Biomass Characteristics. In P. Basu (Ed.), *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third Edition)* (pp. 49–91). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00003-0>
- Basu, P. (2018c). Chapter 4 - Torrefaction. In P. Basu (Ed.), *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third Edition)* (pp. 93–154). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00004-2>
- Berge, N. D., Ro, K. S., Mao, J., Flora, J. R. V, Chappell, M. A., & Bae, S. (2011). Hydrothermal Carbonization of Municipal Waste Streams. *Environmental Science & Technology*, 45(13), 5696–5703. <https://doi.org/10.1021/es2004528>

- Camacho Daza, S., & Valencia García, F. (2024). *Carbonización hidrotérmica y densificación del residuo polvillo producido en la industria papelera como pretratamiento del proceso de combustión*. Universidad del Valle.
- Cavallo, E., & Pampuro, N. (2017). Effects of compressing pressure on briquettes made from woody biomass. *Chemical Engineering Transactions*, 58, 517–522. <https://doi.org/10.3303/CET1758087>
- Cordero, T., Marquez, F., Rodriguez-Mirasol, J., & Rodriguez, J. J. (2001). Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel*, 80(11), 1567–1571. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00034-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00034-5)
- Dodo, U. A., Dodo, M. A., Shehu, A. F., & Badamasi, Y. A. (2023). Performance Analysis of Intelligent Computational Algorithms for Biomass Higher Heating Value Prediction. *Nigerian Journal of Technological Development*, 20(4), 44–52. <https://doi.org/10.4314/njtd.v18i4.1856>
- Duque Escobar, G. (2024). *El río Cauca en el desarrollo de la región*. Universidad Nacional de Colombia.
- Funke, A., & Ziegler, F. (2010). *Hydrothermal carbonization of biomass: a summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering*. 4(2), 160–177. <https://doi.org/10.1002/bbb.198>
- Gao, N., Kamran, K., Quan, C., & Williams, P. T. (2020). Thermochemical conversion of sewage sludge: A critical review. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 79). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100843>
- Hameed, Z., Naqvi, S. R., Naqvi, M., Ali, I., Taqvi, S. A. A., Gao, N., Hussain, S. A., & Hussain, S. (2020). A Comprehensive Review on Thermal Coconversion of Biomass, Sludge, Coal, and Their Blends Using Thermogravimetric Analysis. In *Journal of Chemistry* (Vol. 2020). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2020/5024369>
- Hansted, A. L. S., Boschert, C., Hawboldt, K. A., Newell, W. J., & Yamaji, F. M. (2024). Impact of densification process on unprocessed biomass and post-hydrothermal carbonization. *Biomass and Bioenergy*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107203>

- He, C., Tang, C., Li, C., Yuan, J., Tran, K. Q., Bach, Q. V., Qiu, R., & Yang, Y. (2018). Wet torrefaction of biomass for high quality solid fuel production: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 91, pp. 259–271). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.097>
- Huezo, L., Vasco-Correa, J., & Shah, A. (2021). Hydrothermal carbonization of anaerobically digested sewage sludge for hydrochar production. *Bioresource Technology Reports*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100795>
- Inkoua, S., Li, C., Gao, G., Zhang, L., Zhang, S., Tang, Y., Wang, D., Leng, C., & Hu, X. (2024). Thermal treatment of wood, bark and leaves of same poplar tree through hydrothermal carbonization and activation: Roles of aliphatic structures in pore development. *Biomass and Bioenergy*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107101>
- Ivanovski, M., Goricanec, D., Krope, J., & Urbancl, D. (2022). Torrefaction pretreatment of lignocellulosic biomass for sustainable solid biofuel production. *Energy*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122483>
- J. Mitchual, S., Frimpong-Mensah, K., & A. Darkwa, N. (2014). Relationship between Physico-Mechanical Properties, Compacting Pressure and Mixing Proportion of Briquettes Produced from Maize Cobs and Sawdust. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 04(01), 50–60. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2014.41005>
- Kambo, H. S., & Dutta, A. (2015). Comparative evaluation of torrefaction and hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass for the production of solid biofuel. *Energy Conversion and Management*, 105, 746–755. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.08.031>
- Kieseler, S., Neubauer, Y., & Zobel, N. (2013). Ultimate and proximate correlations for estimating the higher heating value of hydrothermal solids. *Energy and Fuels*, 27(2), 908–918. <https://doi.org/10.1021/ef301752d>
- Libra, J. A., Kyoung S, R., Claudia, K., Axel, F., Nicole D, B., York, N., Maria-Magdalena, T., Christoph, F., Oliver, B., Jürgen, K., & and Emmerich, K.-H. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and

- applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2(1), 71–106.
<https://doi.org/10.4155/bfs.10.81>
- Lin, Y. W., Liu, Y. T., Huang, L. C., Lin, S. C., Chen, S. J., & Choi, Y. M. (2025). Biomass energy for a sustainable Taiwan: Technologies, policies, and future prospects. In *Biomass and Bioenergy* (Vol. 199). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107969>
- Madanayake, B. N., Gan, S., Eastwick, C., & Ng, H. K. (2017). Biomass as an energy source in coal co-firing and its feasibility enhancement via pre-treatment techniques. In *Fuel Processing Technology* (Vol. 159, pp. 287–305). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.01.029>
- Martinez-Mendoza, K. L., Guerrero-Perez, J., Barraza-Burgos, J., Forero, C. R., Williams, O., Lester, E., & Gil, N. (2023). Thermochemical behavior of agricultural and industrial sugarcane residues for bioenergy applications. *Bioengineered*, 14(1). <https://doi.org/10.1080/21655979.2023.2283264>
- Montgomery, D. C. . (2013). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, Inc.
- Nanda, S., Reddy, S. N., Vo, D. V. N., Sahoo, B. N., & Kozinski, J. A. (2018). Catalytic gasification of wheat straw in hot compressed (subcritical and supercritical) water for hydrogen production. *Energy Science and Engineering*, 6(5), 448–459. <https://doi.org/10.1002/ese3.219>
- Ngene, G. I., Bouesso, B., González Martínez, M., & Nzihou, A. (2024). A review on biochar briquetting: Common practices and recommendations to enhance mechanical properties and environmental performances. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 469). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143193>
- Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 84(5), 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010>
- Park, S. Y., Oh, K. C., Kim, S. J., Cho, L. H., Jeon, Y. K., & Kim, D. H. (2023). Development of a Biomass Component Prediction Model Based on Elemental and Proximate Analyses. *Energies*, 16(14). <https://doi.org/10.3390/en16145341>

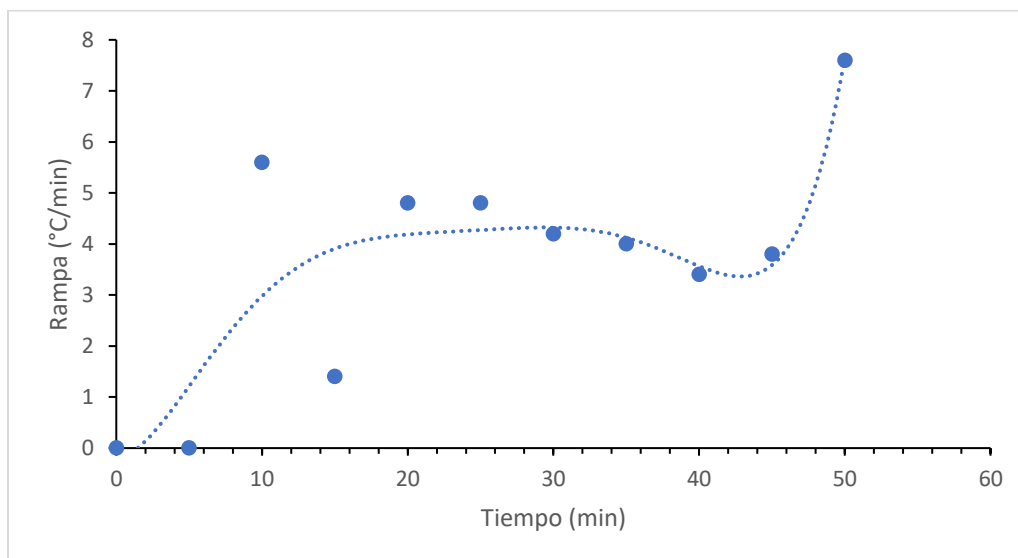
- Portilla-Amaguaña, A., Barraza-Burgos, J., Guerrero-Perez, J., Borugadda, V. B., & Dalai, A. K. (2024). Hydrothermal Carbonization of Green Harvesting Residues (GHRs) from Sugar Cane: Effect of Temperature and Water/GHR Ratio on Mass and Energy Yield. *ACS Omega*, 9(24), 26325–26335. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01875>
- Pradeep, M., Panwar, N. L., & Divyangkumar, N. (2025). Torrefaction of agricultural biomass: A state-of-the-art review on transforming waste into clean energy. *Energy* 360, 3, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.energ.2025.100023>
- Qatarneh, A. F., Dupont, C., Michel, J., Simonin, L., Beda, A., Matei Ghimbeu, C., Ruiz-Villanueva, V., da Silva, D., Piégay, H., & Franca, M. J. (2021). River driftwood pretreated via hydrothermal carbonization as a sustainable source of hard carbon for Na-ion battery anodes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106604>
- Qatarneh, A. F., Dupont, C., Ruiz-Villanueva, V., da Silva Perez, D., Ashour, R. M., Piégay, H., & Franca, M. J. (2021). Evaluating river driftwood as a feedstock for biochar production. *Waste Management*, 134, 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.017>
- Reza, M. T., Rottler, E., Herklotz, L., & Wirth, B. (2015). Hydrothermal carbonization (HTC) of wheat straw: Influence of feedwater pH prepared by acetic acid and potassium hydroxide. *Bioresource Technology*, 182, 336–344. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.024>
- Samuelsson, R., Larsson, S. H., Thyrel, M., & Lestander, T. A. (2012). Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. *Applied Energy*, 99, 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.004>
- Sanchez, J. P., Cañola, J., Molina, J. P., Bejarano, N., Vélez-Mira, A., Vélez, I. D., & Robledo, S. M. (2020). Ecoepidemiología de la leishmaniasis visceral en Colombia (1943-2019): revisión sistemática. *Hechos Microbiológicos*, 11(1 y 2), 22–60. <https://doi.org/10.17533/udea.hm.v11n1a03>
- Sarmiento-Gomez, J. D. and P. A. and J. J. and M. D. and G.-P. J. and B.-B. J. (2025). Combustion Reactivity of Hydrothermally Derived Biochar from Sugarcane Green Harvesting Residues (Ghr): An Evaluation as a Solid Fuel. *SSRN*.

- Sevilla, M., & Fuertes, A. B. (2009). The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose. *Carbon*, 47(9), 2281–2289. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.04.026>
- Shen, J., Zhu, S., Liu, X., Zhang, H., & Tan, J. (2010). The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 983–987. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.039>
- Texter, J., Zhao, L., Xiao, P. W., Caballero, F. P., Han, B. H., & Titirici, M. M. (2017). Connecting carbon porosity with dispersibility and friability. *Carbon*, 112, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.11.003>
- Velázquez Martí, B., Gaibor-Chávez, J., Franco Rodríguez, J. E., & López Cortés, I. (2023). Biomass Identification from Proximate Analysis: Characterization of Residual Vegetable Materials in Andean Areas. *Agronomy*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy13092347>
- Xu, J., Fan, Z., Yang, Q., Lu, G., Liu, P., & Wang, D. (2023). Hydrothermal carbonization of waste wood: Sustainable recycling of biomass by-products and novel performance enhancer for bitumen. *Construction and Building Materials*, 404. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133307>
- Zhuang, X., Zhan, H., Huang, Y., Song, Y., Yin, X., & Wu, C. (2018). Conversion of industrial biowastes to clean solid fuels via hydrothermal carbonization (HTC): Upgrading mechanism in relation to coalification process and combustion behavior. *Bioresource Technology*, 267, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.002>

Capítulo 7. Anexos

7.1 ANEXO A: Control de rampa en mufla

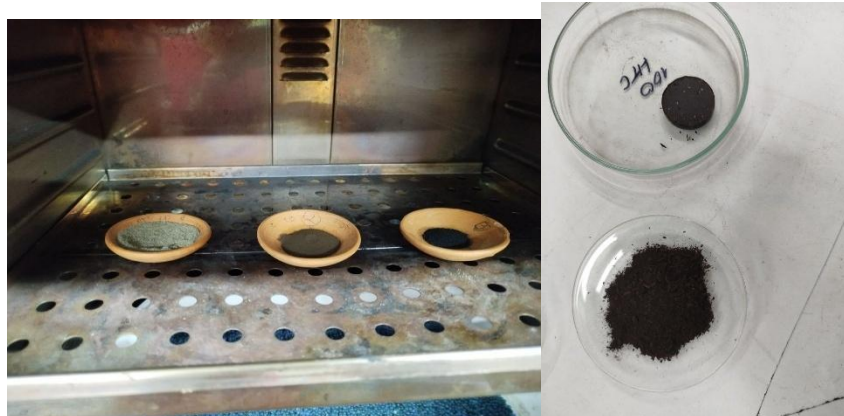
Por medio de un termómetro de mercurio externo se verifica que no exceda los 4 °C/min fijados para cuidar la canasta de los reactores sin agitación.



7.2 ANEXO B: Algunas imágenes de los hidrocarbonizados

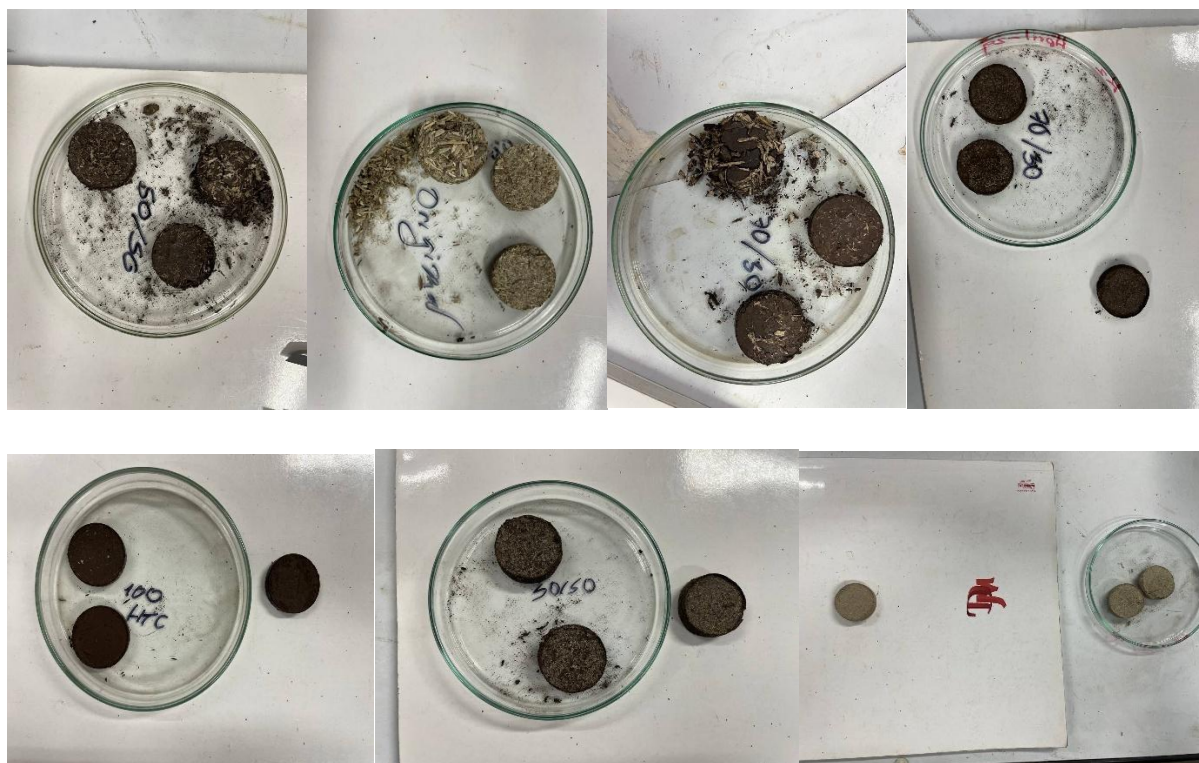
Se presentan algunas imágenes de carbonizados, Se observó la carbonización presentada en los reactores sin agitación, a la izquierda se encuentran los troncos originales malla 8 (0 HTC/100 TO-M8) como se alimentó a los reactores, a la derecha es el hidrocarbonizado a 200-2-5, haciendo parte de las pruebas preliminares para determinación de temperaturas.





La muestra a la izquierda en la bandeja metálica, es la original, en el centro la muestra en el reactor Parr a 220°C 2 horas y relación de 5:1, a la derecha la muestra en el Parr a 253°C por 30 min y relación de 5:1. La otra imagen muestra una briqueta de 1.7 g y en un vidrio reloj la misma masa antes de la densificación.

7.3 ANEXO C: Imágenes complementarias de las briquetas



Se observan todas las briquetas, marcadas en la caja Petri y se evidencia como el tamaño de partícula influyó en su estabilidad y forma definida.

También se agregan algunas imágenes de la medición del diámetro para cálculo de densidad de las briquetas.



7.4 ANEXO D: Producción académica derivada de este estudio

Como resultado del presente estudio, se generó una contribución científica presentada en evento académico nacional, producto del trabajo desarrollado en el marco del proyecto CI 25254.

Título del póster: Evaluación del proceso de hidrotratamiento térmico aplicado a residuos de troncos de árboles en las orillas de los ríos Magdalena y Cauca como estrategia sostenible para la producción de bioenergía

Tipo de presentación: Póster científico

Autores: Yeison Arrieta, Juan Manuel Barraza Burgos, Juan Sebastián Guerrero Pérez, Jorge Luis Piñeres, Jesús Alfonso Arcos Villacriz y Juan Fernando Rojas Salamanca

Evento: Congreso Colombiano del Carbono (C3-2024)

Institución organizadora: Universidad del Valle

Lugar y fecha: Santiago de Cali, Colombia – 2024

Este artículo científico fue presentado ante investigadores, estudiantes y profesionales del área, y permitió la socialización de los principales hallazgos técnicos, así como el intercambio de conocimientos con otros grupos de investigación del país.