

PIRÓLISIS DE NEUMÁTICOS, UNA SOLUCIÓN INNOVADORA PARA EL RECICLAJE DE CAUCHO

Tire Pyrolysis, an Innovative Solution for Rubber Recycling

Sargen Yohan Lozano Arias¹
sargen.lozano@unipaz.edu.co

¹Instituto Universitario de la Paz, Escuela de Ingeniería de Producción, Grupo de Investigación en Reingeniería, Innovación Y Productividad, GREIP

Recibido: marzo 25 de 2025 – Aceptado: junio 9 de 2025

Resumen

Este artículo explora la pirólisis como una alternativa viable para reciclar el caucho de los neumáticos fuera de uso en Colombia, analizando las condiciones óptimas para su implementación, como la temperatura, el material y la dimensión de las partículas. También se describen los equipos esenciales para el proceso, entre ellos los reactores, los sistemas de condensación y los de tratamiento de gases, que permiten obtener productos como el aceite pirolítico, el gas combustible y el negro de humo, los cuales tienen aplicaciones en diferentes industrias. Aunque la tecnología de pirólisis ha avanzado en otros países, en Colombia su uso aún es limitado, lo que representa una oportunidad para desarrollar investigaciones que mejoren su implementación y permitan reducir el impacto ambiental de los neumáticos desechados, al mismo tiempo que se impulsa la economía circular y se generan nuevas oportunidades en el sector del reciclaje..

Palabras clave: Economía circular, neumáticos, pirólisis, reciclaje, sostenibilidad.

Abstract

rubber from end-of-life tires in Colombia, analyzing the optimal conditions for its implementation, such as temperature, material composition, and particle size. It also describes the essential equipment for the process, including reactors, condensation systems, and gas treatment systems, which produce products such as pyrolytic oil, fuel gas, and carbon black, all of which have applications in various industries. Although pyrolysis technology has advanced in other countries, its use in Colombia is still limited. This represents an opportunity to develop research that improves its implementation and reduces the environmental impact of discarded tires, while promoting the circular economy and generating new opportunities in the recycling sector.

Keywords: economy, tires, pyrolysis, recycling, sustainability.

I. INTRODUCCIÓN

Las llantas neumáticas son esenciales en diferentes industrias, especialmente en el transporte, por mejorar la eficiencia y seguridad en la movilización. Sin embargo, su limitado ciclo de vida genera grandes volúmenes de residuos. Según en el estudio de la doctora Isabel Zamora en el 2022 se desechan aproximadamente 6,7 millones de toneladas de llantas neumáticas cada año [1]. Esta problemática también se refleja en Colombia, donde se generan aproximadamente 950.000 toneladas de llantas neumáticas usadas cada año [2]. Además, la gestión inadecuada de estos residuos, caracterizada por prácticas deficientes de reciclaje y disposición final, ha provocado impactos ambientales significativos, como la contaminación del suelo y del agua, que genera un aumento en riesgos sanitarios derivados de la proliferación de enfermedades y la emisión de gases tóxicos durante quemas ilegales [3].

Frente a esta situación, es vital implementar estrategias sostenibles que ayuden a reducir este tipo de contaminación y fomenten la economía circular. En Colombia, varias empresas han tomado la iniciativa de mitigar estos impactos ambientales, como Soluciones Ambientales 4R S.A.S que se especializa en triturar llantas convencionales y radiales para obtener materiales que pueden ser utilizados en la construcción de carreteras, como combustible alternativo en hornos industriales o en productos textiles, contribuyendo así a un manejo más eficaz y sustentable de estos desechos. Además, con estos procesos ha logrado gestionar y transformar aproximadamente 74.000 toneladas de llantas usadas en diferentes productos como fino de goma o TDF en el transcurso de 6 años [4].

Sin embargo, el proceso de trituración de las llantas neumáticas genera partículas de caucho contaminadas con fibras textiles y acero, lo que reduce significativamente la calidad del material reciclado y limita su aplicación a productos de baja demanda técnica [5]. Además, este método implica altos costos energéticos y un mantenimiento constante de la maquinaria para garantizar un buen triturado de las llantas, factores que incrementan considerablemente los gastos operativos [6].

A pesar del reciclaje de llanta por el proceso de trituración, su impacto sigue siendo limitado debido al pequeño mercado disponible para ofrecer los productos que se obtiene del proceso, especialmente en Colombia. En este contexto, la pirólisis se presenta como una alternativa innovadora y sostenible para el reciclaje del caucho que, a diferencia de la trituración, que simplemente reduce el tamaño del neumático para usos limitados como rellenos o mezclas asfálticas, la pirólisis descompone térmicamente el caucho en ausencia de oxígeno, generando productos de alto valor como aceites combustibles, negro de carbón y gases combustibles.[7]

Estos subproductos pueden ser reutilizados como combustibles alternativos, materias primas para la industria petroquímica o para generación de energía, lo que incrementa el valor económico del reciclaje y reduce la dependencia de combustibles fósiles. También, el gas generado durante el pirólisis puede ser reutilizado para alimentar el proceso, aumentando la eficiencia energética y reduciendo costos operativos [8]. Es decir, la trituración no aprovecha el potencial energético de las llantas y genera residuos sólidos que requieren un manejo adicional.

Por estas razones, la pirólisis ofrece una oportunidad clave para mejorar la gestión de las llantas neumáticas usadas y fomentar la economía circular en el país.

II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para implementar un proceso eficaz de pirólisis en el tratamiento del caucho, es fundamental contar con equipos específicos que garanticen una adecuada descomposición térmica en ausencia del oxígeno. Asimismo, es crucial definir claramente las condiciones operativas como temperatura, tipo de neumático y tamaño de partícula, factores que tienen influencia directa sobre el rendimiento y calidad de los productos obtenidos.

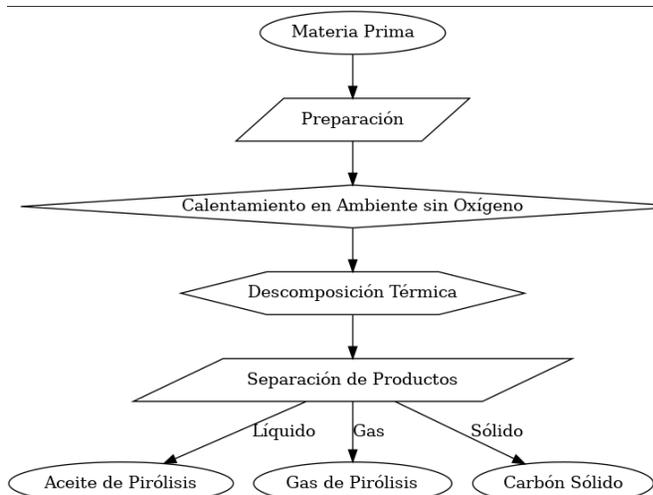


Fig. 1. Proceso de la pirólisis.

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos y adaptados de BRIDGWATER [9].

A. Equipos utilizados para el proceso de la pirólisis

Conocer los equipos necesarios para el proceso es fundamental, ya que cada uno tiene una función crítica que garantiza un control óptimo del proceso, minimiza pérdidas energéticas y garantizar las propiedades de los productos finales. A continuación, se describen los equipos que participan y su importancia en el proceso de la pirólisis.

1) *Reactor de Pirólisis:* Su papel dentro del proceso de la pirólisis es fundamental porque permiten un control riguroso de la temperatura y del tiempo que el material permanece dentro del reactor. Según estudios recientes, la eficiencia del proceso depende directamente de mantener condiciones óptimas; por ejemplo, un rango de temperatura entre 400 °C y 550 °C y un tiempo de residencia controlado permiten maximizar la conversión del caucho en productos valiosos [10].

Además, para este proceso se pueden emplear reactores de tambor rotatorio o de lecho fijo, los cuales son reconocidos por su eficiencia en la transferencia de calor y en el manejo continuo del material.[11]

2) *Sistema de Condensación:* Este sistema es crucial para la recolección del aceite pirolítico producido durante el proceso de pirólisis, ya que Un condensador optimizado no solo maximiza la recuperación del producto líquido, sino que también minimiza las pérdidas por evaporación y mejora la calidad del aceite obtenido. Estudios recientes, reportan que un sistema

de condensación bien diseñado puede alcanzar recuperaciones de aceite superiores al 90%, lo que representa una mejora significativa en comparación con sistemas convencionales que suelen recuperar entre el 70% y 80% del producto líquido.[12]

Además, junto a la implementación de condensadores de múltiples etapas y el control preciso de la temperatura de enfriamiento permiten reducir la presencia de compuestos no deseados en el aceite, aumentando su estabilidad y valor comercial [13]. Por tanto, la optimización del sistema de condensación es un factor clave para mejorar la eficiencia global del proceso de pirólisis y la valorización de los residuos de caucho.

3) *Sistema de Tratamiento de Gases:* Este sistema permite la purificación eficiente de los gases no condensables generados durante la pirólisis, tales como metano, etano y propano, que pueden ser reutilizados como combustible suplementario, incrementando así la eficiencia energética global del proceso [14]. Por ejemplo, la remoción de impurezas y la concentración de gases combustibles mediante tecnologías de adsorción y enfriamiento han permitido aumentar la eficiencia energética hasta en un 15% en plantas piloto de pirólisis de residuos sólidos urbanos [15]. Además, la reutilización de estos gases contribuye a la reducción de emisiones contaminantes, mejorando la calidad ambiental del proceso.

B. Condiciones necesarias de operación

Una vez identificados los equipos necesarios, es esencial definir las condiciones óptimas del proceso para maximizar la producción de los derivados del caucho.

1) Temperatura

La temperatura es un factor crítico en el proceso de pirólisis del caucho, ya que afecta directamente el rendimiento y la calidad de los productos obtenidos. Según un estudio experimental realizado con neumáticos usados, el mayor rendimiento en la producción de aceite pirolítico se alcanzó a una temperatura de 400 °C, con un rendimiento aproximado del 45% para neumáticos de camioneta y del 40% para neumáticos de automóvil. También, en los resultados se resalta que una temperatura por encima de 600 °C, se observa un aumento en la producción de gases ligeros como metano e hidrógeno,

lo que reduce la cantidad de líquidos obtenidos y afecta negativamente el rendimiento del aceite pirolítico [10][15].

2) Tipo de composición del neumático

La composición del neumático es determinante en la eficiencia del proceso de pirólisis. En la actualidad existen dos tipos de neumáticos: convencionales y radiales. En la tabla 1, se puede observar la composición de cada tipo de llanta neumática.

Componente	Neumático Radiales	Neumáticos Convencionales
Caucho	75%	65%
Acero	15%	5%
Fibras Textiles	10%	30%

Tabla 1. Comparación de la composición de llantas neumáticas tipo radial y convencional.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos y adaptados de WILLIAMS [16] y MARTÍNEZ. [17].

A partir de la tabla anterior, se puede concluir que los neumáticos radiales presentan mayor proporción de acero debido a los cinturones metálicos internos, mientras que los neumáticos convencionales contienen mayores porcentajes de fibras textiles.

Como consecuencia, se ha demostrado que la composición del neumático afecta tanto la cantidad como las características del aceite pirolítico y los subproductos generados [18]. Por ejemplo, el estudio de Ozkan en el 2005 encontraron que los neumáticos de camión, con mayor contenido de caucho natural y acero, producen un mayor rendimiento de aceite (55,6% en peso) y menor contenido de azufre (0,83%) en comparación con los neumáticos de automóvil, que presentan mayor proporción de fibras textiles y caucho sintético, generando un rendimiento de aceite del 47,4% y mayor contenido de azufre 1,35% [19].

Por lo tanto, la selección del tipo de neumático como materia prima es un factor determinante para optimizar la eficiencia de conversión y la calidad de los productos obtenidos en el proceso de pirólisis.

3) Tamaño de llanta neumático

Determinar el tamaño óptimo de partícula es esencial porque influye directamente en la velocidad de la reacción química, transferencia térmica y

rendimiento de productos pirolíticos. En particular, cuando las partículas son de tamaño elevado la eficiencia del proceso disminuye debido a una menor superficie de contacto y una transferencia de calor menos uniforme, lo que puede resultar en un pirólisis incompleto y una reducción en el rendimiento global. En contraste, partículas demasiado pequeñas pueden generar problemas operativos como la obstrucción del reactor y la formación excesiva de gases ligeros. [20]

A partir de esto muchos resultados investigativos, han demostrado que partículas con tamaños entre 6 y 10 mm, combinadas con temperaturas cercanas a 550 °C, favorecen la maximización de la producción de líquidos pirolíticos logrando alcanzar rendimientos superiores al 90%. [21]

Por lo tanto, el control del tamaño de partícula es esencial para optimizar el balance entre rendimiento y operatividad en procesos de pirólisis de caucho.

En la actualidad, en Colombia empresas como SOLUCIONES AMBIENTALES 4R S.A.S comercializan caucho granulado con tamaños desde 1 mm hasta 8 cm, lo que ofrece una oportunidad de realizar ensayos experimentales que permiten mejorar este nuevo proceso de la pirólisis, ya que actualmente no hay datos acerca que confirme que tamaño es el más viable y rentable para el proceso de la pirólisis a base de caucho y adicionalmente el interés en la investigación sobre la pirólisis de neumáticos según un análisis bibliométrico, el número de publicaciones anuales relacionadas con la pirólisis de neumáticos pasó de menos de 50 en 2010 a más de 200 en 2022, evidenciando un aumento sostenido en el interés científico y tecnológico en esta área [22].

Este crecimiento refleja la importancia de desarrollar parámetros operativos óptimos, como el tamaño de partícula, que impactan directamente en la eficiencia y rentabilidad del proceso.

C. Productos derivados del proceso

En relación con los productos generados, se pueden identificar claramente tres fracciones.





Fig.2. Productos del proceso de la pirólisis: Aceite pirolítico, carbón residual y gas pirolítico.

Fuente: Adaptado de HENAN DOING ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY. [14].

1) Aceite Pirolítico

Este producto presenta características similares al diésel, pero no puede reemplazarlo directamente a este combustible en motores sin modificaciones debido a diferencias en viscosidad y composición química.[23]. Sin embargo, diversos estudios han demostrado que la mezcla de aceites pirolíticos con biodiésel o diésel fósil puede mejorar significativamente su viabilidad como combustible, permitiendo su uso en motores sin modificaciones sustanciales.

Por ejemplo, investigaciones recientes han evaluado mezclas de hasta 20% de biodiésel con diésel convencional, mostrando que estas combinaciones funcionan adecuadamente en motores diésel estándar, sin requerir ajustes mecánicos y manteniendo un desempeño aceptable [24][25]. Además, existen estudios donde el aceite pirolítico se ha mezclado con biodiésel u otros biocombustibles, logrando una mejora en las propiedades de combustión y una reducción en emisiones contaminantes. Como fue el caso de estudio de Ananthakumar (2023) en el que reporta que la adición de un 20% de biodiésel a mezclas con aceites pirolíticos permite un funcionamiento estable del motor y mejora la eficiencia térmica, sin incrementar significativamente las emisiones de NO₂ ni afectar de manera negativa el rendimiento general [24][26].

También, se destaca en la investigación que la combinación de aceites pirolíticos con biodiésel puede optimizar parámetros como el consumo específico de combustible y la potencia entregada por el motor, haciendo viable el aprovechamiento de estos subproductos en aplicaciones energéticas. Por tanto, el valor agregado de obtener aceite pirolítico radica en su potencial para ser integrado en mezclas con biodiésel o diésel fósil, contribuyendo así a la diversificación de fuentes energéticas y al aprovechamiento de residuos,

en línea con los principios de economía circular y sostenibilidad ambiental.

A partir de estos conceptos, en la figura 3 se puede observar una comparación de las características del aceite pirolítico (pasado por un proceso de destilación) y el Diésel.

Propiedad	Diésel (%)	Aceite Pirolítico (%)
Viscosidad cinemática	1.9 - 4.1 mm ² /s (cSt) a 40°C	20 - 100 mm ² /s (cSt) a 40°C,
Poder calorífico	42-46 MJ/kg	20-25 MJ/kg
Densidad	0.82 - 0.85 g/cm ³	0.86 - 1.02 g/cm ³
Contenido de agua	Menos de 1%	10 - 30%
Contenido de oxígeno	1 - 2%	20 -40%
Corrosividad	C1	C4
Estabilidad térmica	300-350°C	200-250°C

Tabla 2. Propiedades Diesel y Aceite Pirolítico

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos y adaptados de BRIDGWATER [23], DIEBOLD [27] y MIRANDA [28].

2) Gas Pirolítico

El gas pirolítico generado a partir de la pirólisis de llantas usadas es una mezcla compuesta principalmente por hidrógeno, metano, monóxido de carbono y otros hidrocarburos ligeros, con un poder calorífico que suele oscilar entre 20 y 30 MJ/m³, inferior al de gases convencionales como el propano o el metano.[29][31]

Tabla 3. Tabla comparativa del poder calorífico entre el gas pirolítico obtenido de las llantas neumáticas respecto a otros gases como el metano y propano.

Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos y adaptados de MARTÍNEZ [29], MEDINA [30] y SÁNCHEZ [31].

A pesar de que su poder calorífico es un poco menor respecto a otros gases, sigue siendo una fuente de energía aprovechable en múltiples aplicaciones industriales, ya que puede utilizarse para generar calor en hornos y calderas, alimentar motores o turbinas en sistemas de cogeneración, o incluso como materia prima para la síntesis de productos químicos, lo que contribuye a la autosuficiencia energética del proceso de pirólisis y a la valorización de residuos sólidos, reduciendo el impacto ambiental asociado a la

disposición de llantas usadas[32][33].

3) Carbón Residual (Negro de Humo)

El residuo sólido generado por el proceso de pirólisis, conocido comúnmente como carbón residual o pirolítico, presenta un gran potencial para ser aprovechado en diversas aplicaciones industriales y agroindustriales, contribuyendo a la economía circular.

Estudios recientes han demostrado que este subproducto puede utilizarse eficazmente como materia prima para la fabricación de nuevos compuestos de caucho, debido a sus propiedades físicas y químicas que mejoran la resistencia y durabilidad del material [34]. Además, el carbón residual tiene aplicaciones significativas en la agroindustria, donde se emplea como enmienda del suelo para mejorar la fertilidad y la retención de agua, así como para la formulación de abonos orgánicos que favorecen el crecimiento de cultivos y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero[35][36].

Por otro lado, el carbón residual puede ser procesado para obtener carbón activado, un material con alta capacidad adsorbente utilizado en la purificación de aguas y gases industriales, así como en la fabricación de productos de alto valor añadido.

D. La pirolisis en Colombia

En Colombia, la pirólisis ha cobrado relevancia en los últimos años como una tecnología clave para la valorización de residuos agroindustriales y plásticos. Un ejemplo destacado es el Grupo Ecopetrol, que ha incorporado la pirólisis en sus estrategias de economía circular y sostenibilidad, posicionándose como pionero en la región.

En 2023, Ecopetrol junto con una en alianza con empresas como Pyrcom, Taghlee Industries y PepsiCo, se logró poner en marcha el primer proyecto de reciclaje químico avanzado en Suramérica, orientado a la recuperación y transformación de residuos plásticos posconsumo de difícil reciclabilidad en aceite de pirólisis. Este aceite es posteriormente procesado en la Refinería de Barrancabermeja para producir Propileno Grado Refinería (PGR), materia prima utilizada en la fabricación de polipropileno circular en la planta de Esenttia en Cartagena.[37][38][39]

La iniciativa, en su primera etapa, permitió recuperar aproximadamente 500 toneladas de residuos plásticos, con la meta de escalar la producción a 10.000 toneladas anuales de aceite de pirólisis en fases

posteriores[39]. Este avance representa un hito en la gestión sostenible de residuos plásticos en Colombia y consolida el liderazgo de Ecopetrol en la implementación de tecnologías innovadoras para la transición energética y la descarbonización de sus operaciones.

A pesar de los avances recientes en la valorización de residuos mediante pirólisis, la aplicación de esta tecnología para el reciclaje de caucho, especialmente de neumáticos fuera de uso, en Colombia continúa siendo un campo emergente y en desarrollo. Su implementación representa una alternativa innovadora para mitigar la contaminación ambiental asociada a la disposición inadecuada de estos residuos y podría incentivar la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías orientadas a optimizar su aprovechamiento.

Sin embargo, la adopción a gran escala de la pirólisis de caucho en el país enfrenta varios desafíos significativos, entre las principales limitaciones se destacan el alto costo de inversión inicial requerido para la instalación de plantas industriales, la ausencia

Tipo de Gas	Poder Calorífico	Unidad de Medida	Observación
Gas Pirolítico(Llantas)	20-30	MJ/m3	Gas con mezcla principalmente de CO, H2, CH4
Metano	46,35	MJ/m3	Gas licuado
Propano	35-40	MJ/m3	Gas Natural

de una infraestructura consolidada para la recolección y el procesamiento eficiente de neumáticos desechados, y la falta de incentivos económicos y normativos que promuevan el escalamiento de estas iniciativas. Además, persisten retos técnicos relacionados con la optimización de los parámetros de proceso para maximizar la calidad y el valor de los productos obtenidos, así como barreras de aceptación en el mercado para los subproductos derivados, como aceites y materiales carbonosos. A esto se suma la necesidad de fortalecer la articulación entre el sector público, la academia y la industria para promover la transferencia tecnológica y el desarrollo de proyectos piloto que permitan evaluar la viabilidad económica y ambiental de la pirólisis de caucho en el contexto colombiano [41].

Estas limitaciones deben ser abordadas mediante políticas públicas integrales, incentivos a la innovación y el fortalecimiento de capacidades técnicas, con el fin de consolidar la pirólisis como una solución sostenible y escalable para el manejo de residuos de caucho en Colombia.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La pirólisis de neumáticos fuera de uso presenta un gran potencial para la valorización de residuos en Colombia y Latinoamérica, siempre que se optimicen parámetros clave como la temperatura de operación, el tamaño de partícula y el tipo de neumático. Estudios indican que operar entre 400 °C y 550 °C, con partículas de caucho de 6 a 10 mm y preferentemente neumáticos radiales, maximiza la producción de aceite pirolítico de alta calidad. Además, la selección adecuada de equipos, como reactores de lecho fijo o tambor rotatorio y sistemas de condensación multietapa, es crucial para mejorar la eficiencia del proceso y minimizar las emisiones contaminantes.

No obstante, la consolidación industrial de la pirólisis en Colombia enfrenta importantes desafíos. La escalabilidad del proceso se ve limitada por los altos costos iniciales y la falta de infraestructura para la recolección y pretratamiento de neumáticos. Asimismo, la ausencia de normativas claras y de incentivos económicos dificulta la adopción masiva de esta tecnología. Además, los productos obtenidos, como el aceite pirolítico y el negro de humo, requieren refinamientos adicionales para cumplir con estándares industriales, lo que incrementa costos y restringe su mercado. Finalmente, es indispensable mejorar el manejo ambiental de emisiones gaseosas y residuos sólidos secundarios para asegurar la sostenibilidad del proceso.

Para superar estas barreras, se recomienda impulsar proyectos piloto que integren a universidades, sector privado y entidades gubernamentales para validar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la pirólisis. Es fundamental optimizar el pretratamiento de neumáticos, incluyendo la separación de componentes metálicos y textiles, para aumentar la calidad y cantidad de productos recuperados. También se deben establecer políticas públicas que incentiven la inversión en plantas de pirólisis y promuevan el uso de subproductos en la industria nacional. Finalmente, la investigación en la integración de energías renovables, el uso de catalizadores y la realización de estudios de ciclo de vida contribuirán a mejorar la eficiencia y sostenibilidad del proceso.

IV. CONCLUSIONES

La pirólisis se presenta como una solución sostenible e innovadora para el reciclaje de neumáticos fuera de uso,

ya que permite transformar estos residuos en productos de alto valor, como el aceite y el gas pirolítico, además del negro de humo. No obstante, su eficiencia depende de factores clave como la temperatura de procesamiento, el tipo de neumático y el tamaño de las partículas, los cuales influyen directamente en los términos de calidad y volumen de los productos adquiridos. En Colombia, esta tecnología aún no se ha desarrollado a gran escala, lo que representa una oportunidad para fortalecer la investigación y la innovación en este campo. La falta de políticas públicas y normativas específicas ha limitado su adopción, pero su implementación podría generar beneficios ambientales y económicos al reducir la contaminación y fomentar la economía circular en el país. Si se promueve la inversión y el desarrollo de infraestructura adecuada, la pirólisis no solo contribuiría a una administración de los recursos más eficaz y sostenible de los neumáticos desechados, sino que también impulsaría nuevas industrias enfocadas en el aprovechamiento de estos recursos, fortaleciendo la transición hacia una economía más sustentable.

REFERENCIAS

- [1] ZAMORA, I.E (2022). Los neumáticos y su impacto en los ecosistemas. *Revista Científica Fuego de la Memoria*, 3(4), 52-59. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. <https://revistafdm.uleam.edu.ec/wp-content/uploads/2023/01/Los-neumaticos-y-su-impacto-en-los-ecosistemas.pdf>
- [2] TRUJILLO, A. C (2020). Análisis del ciclo de vida de residuos sólidos de llantas de un proceso de valorización a partir de criterios socioeconómicos y ambientales en la ciudad de Bogotá D.C. Universidad de América.
<https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/ad6e3a35-5482-40eb-a0cc-6f11f889e7d9/content>
- [3] AGUILAR PÉREZ, J. D (2023). Contaminación ambiental por la inadecuada gestión de llantas usadas [Trabajo de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio UNAD.
<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/54711/JDAGUILARP.pdf>
- [4] SOLUCIONES AMBIENTALES 4R S.A.S (2024). Gestión de llantas [Aviso Informativo]
- [5] KUMA A, SINGH R. y PATEL S.(2021). Mechanical recycling of waste tires: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123456
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123456>

- [6] RUIKUN DONG, MENGZHEN ZHAO, NAIPENG TANG(2019). Characterization of crumb tire rubber lightly pyrolyzed in waste cooking oil and the properties of its modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 195, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.044>
- [7] AMAR GIL, POSADA DUQUE y HENAO J.A. Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Revista ION*, 2017, vol. 30, n.º 2, p. 81-90.
- [8] SEGOVIA MARTÍNEZ (2006). Estudio de la pirólisis de llantas usadas para la producción de combustibles líquidos [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio Institucional UANAL. <http://eprints.uanl.mx/21233/1/1020152056.pdf>
- [9] A.V. BRIDGWATER y V.C. PEACOCKE. Fast pyrolysis processes for biomass, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 4, no. 1, pp. 1-73, 2000
- [10] MOSQUEDA HUERTA, SANTIAGO ZAVALA, GARCÍA ZÚÑIGA, GONZALES AGUILAR y RIESCO ÁVILA(2023). Estudio experimental de la pirólisis de neumáticos usados. Memorias del Congreso SOMIM 2023, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Recuperado de https://somim.org.mx/memorias/memorias2023/articulos/M43-A4_108.pdf
- [11] WILLIAMS, P. T.; BESLER, S. y TAYLOR, D. R. The pyrolysis of scrap automotive tyres: The influence of temperature and heating rate on product composition. *Fuel*, 1990, vol. 69, p. 1445-1482.
- [12] PAL S, KUMAR A, SHARMA A.K, GHODKE P.K, PANDEY S.(2022). Recent advances in catalytic pyrolysis of municipal waste for the production of hydrocarbon fuels. *Processes*, 19(8),1497 <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/8/1497>
- [13] ZHANG H, ZHAO C y XU M.(2019). Multi-stage condensation system for enhanced recovery of pyrolysis oil from waste tires. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 140,195-202. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.04.006>
- [14] HENAN DOING ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY CO. Uso del negro de carbón de la planta de la pirólisis de neumáticos [imagen]. *Waste Tire Oil*, 2016. Disponible en: https://es.wastetireoil.com/Pyrolysis_news/DOING_News/used_of_carbon_black_from_waste_tyre_pyrolysis_plant_306.html
- [15] CHEN W, ZHANG X y LI J.(2018). Energy recovery from waste plastics via pyrolysis: A review of gas purification techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1234-1245. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.034>
- [16] WILLIAMS, P. T. Pyrolysis of waste tyres: A review. *Waste Management*, 2013, vol. 33, n.º 8, p. 1714-1728. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.003>
- [17] MARTÍNEZ, L. y TORRES, F. Impacto ambiental y viabilidad económica del uso de caucho reciclado en combustibles alternativos. *Ingeniería y Sostenibilidad*, 2021, vol. 15, n.º 2, p. 123-138.
- [18] MIRANDA, Rosa C.; SEGOVIA, Ciro C.; SOSA, César A. Pirólisis de llantas usadas: estudio cinético e influencia de variables de operación. *Información Tecnológica [en línea]*. 2006, vol. 17, n.º 2, pp. 7-14. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000200003.
- [19] UCAR S, KARAGOZ S, OZKAN A.R y YANIK J.(2005). Composition of products from the pyrolysis of automobile tires. *Fuel*, 84(14-15), 1884-1892. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.001>
- [20] ZHANG Y, XU M. y LIU Y.(2018). Influence of particle size on the pyrolysis of waste tires for oil production. *Waste Management*, 71, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.035>
- [21] ONWUDILI J.A, INSURA N. y WILLIAMS P.T.(2009). Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 86(2), 293-303. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.07.008>
- [22] LOPEZ G, ARTETXE M, AMUTIO M, ELORDI G, BILBAO J. y OLAZAR M.(2022). Recent advances in the pyrolysis of plastic wastes: A bibliometric analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112120>
- [23] BRIDGWATER, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- [24] ANANTHANKUMAR P. (2023). Desempeño en el motor diésel con la aplicación del biodiésel. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 32(1), 1-20. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612024000100006
- [25] JOHN DEERE (2024). Biodiesel para motores. Recuperado de <https://www.deere.com.ar/es/motores-transmisiones/biodiesel/>
- [26] RIOJAS GONZÁLES (2023). Avances y estrategias para mejorar el desempeño del biodiésel en motor diésel. *Ingenius*, (30), 92-104.

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9028626.pdf>

[27] DIEBOLD, J. P. (1994). A unified, global model for the pyrolysis of cellulose. *Biomass and Bioenergy*, 7(1-6), 75-85

[28] MIRANDA, R.; PAKDEL, H.; ROY, C.; VASILE, C. Vacuum pyrolysis of commingled plastics containing PVC II. Product analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [en línea]. 2003, vol. 67, n.º 1, p. 19-28. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S01652370\(02\)00064-3](https://doi.org/10.1016/S01652370(02)00064-3)

[29] SMARTÍNEZ J.(2013). Valorización de llantas usadas por pirolisis: obtención de combustible y negro carbono pirolítico. *Journal of Hazardous Materials*, 261, 1066 kW. Recuperado de <https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Comunicaciones/SeminarioRespel/Soluciones%202015/Proyecto%20Pirolisis%20de%20llantas%20.pdf>

[30] MEDINA VALTIERRA J.(2017) Llantas usadas generan nuevos combustibles. *Plástico*. Recuperado de <https://www.plastico.com/es/noticias/llantas-usadas-generan-nuevos-combustibles>

[31] SÁNCHEZ M. y Pérez R.(2006). Pirólisis de llantas usadas: estudio cinético e influencia de parámetros operacionales. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 20(2), 120-130. Recuperado de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000200003

[32] GÓMEZ A y LÓPEZ G.(2023). Estudio experimental de la pirólisis de neumáticos usados. *Memorias del XXIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 91-100. Recuperado de https://somim.org.mx/memorias/memorias2023/articulos/M43-A4_108.pdf

[33] CONACYT.(2018). Las llantas usadas, materia prima para nuevos combustibles. *Agencia Informativa Conacyt*. Recuperado de <https://iresiduo.com/noticias/mexico/conacyt/17/09/18/llantas-usadas-materia-prima-nuevos-combustibles>

[34] AIMPLAS. Pirólisis: método termoquímico para la transformación de residuos. Recuperado de <https://www.aimplas.es/blog/pirolisis-el-metodo-termoquimico-para-la-transformacion-sostenible-de-los-residuos/>

[35] REVISTA DE INVESTIGACIÓN DE AGROPRODUCCIÓN SUSTENTABLE. (2022). Pirólisis: una revisión de conceptos y aplicaciones en la gestión de residuos sólidos. 6(1), 43-56. <https://doi.org/10.25127/aps.20221.854>

[36] REVISTA TECNOLOGÍA EN MARCHA. (2020). Pirólisis de biomasa y residuos como estrategia de producción sostenible. 36(10), 45-54. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10.7010>

[37] ECOPETROL. (2023, octubre 26). Colombia, pionera en reciclaje químico avanzado en Suramérica. Recuperado de <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/colombia-pionera-reciclaje-quimico-avanzado-suramerica>

[38] VALORY DINERO. (2023, noviembre 13). Grupo Ecopetrol revoluciona la industria del plástico con proyecto de reciclaje químico avanzado. Recuperado de <https://valorydinero.com/2023/11/13/grupo-ecopetrol-revoluciona-la-industria-del-plastico-con-proyecto-de-reciclaje-quimico-avanzado/>

[39] ESENTTIA.(2024, abril 10). ¡Colombia es pionera en Latinoamérica en producir Polipropileno Circular! Recuperado de

<https://www.esenttia.co/noticias/colombia-es-pionera-en-latinoamerica-en-producir-polipropileno-circular/>

[40] MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE.(2021). Estrategia para la gestión integral de residuos de llantas en Colombia. Bogotá: MADS. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/images/gestion-integral-llantas.pdf>



Sargen Yohan Lozano Arias.

Ingeniero mecánico, de la Universidad Francisco de Paula Santander Seccional Ocaña.

Actualmente, cursa una especialización en docencia y pedagogía, con el objetivo de fortalecer su perfil académico y contribuir a la formación de

futuros profesionales en ingeniería. Cuenta con más de un año y medio de experiencia en el sector industrial, desempeñándose en mantenimiento y diseño mecánico. Fue líder de mantenimiento en Soluciones Ambientales 4R, donde participó en la optimización de procesos y la gestión de equipos industriales. Además, posee certificación CSWA en SolidWorks, lo que le ha permitido especializarse en modelado y simulación de componentes mecánicos.