



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), Noviembre-Diciembre 2025,
Volumen 9, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6

ANÁLISIS INTEGRAL DE LA PIRÓLISIS PARA LA VALORIZACIÓN DE LLANTAS USADAS: DE RESIDUOS A PRODUCTOS DE ALTO VALOR

**COMPREHENSIVE ANALYSIS OF PYROLYSIS FOR THE
VALORIZATION OF USED TIRES: FROM WASTE TO HIGH-
VALUE PRODUCTS**

José Julián Carvajal Escudero
Investigador Independiente

Análisis Integral de la Pirólisis para la Valorización de Llantas Usadas: de Residuos a Productos de Alto Valor

José Julián Carvajal Escudero¹

Julian.carvajal.escudero@gmail.com

Investigador Independiente

RESUMEN

El manejo de neumáticos fuera de uso (NFU) representa un desafío ambiental global debido a su gran volumen y lenta degradación. Este artículo analiza la *pirólisis* como una alternativa innovadora y sostenible, posicionándola como un proceso clave para la economía circular del caucho. El tratamiento de llantas usadas mediante *pirólisis* se presenta como una alternativa tecnológica sostenible frente a los métodos tradicionales de disposición final. Este proceso termoquímico consiste en la descomposición de los compuestos orgánicos de las llantas en ausencia de oxígeno, dando lugar a productos de alto valor agregado: *aceite pirolítico*, un biocombustible que puede usarse para la generación de energía eléctrica o térmica, o ser refinado en hidrocarburos similares al diésel y la gasolina; el *negro de humo*, un material crucial que puede reemplazar al negro de carbón virgen en la fabricación de nuevos neumáticos, caucho y otros productos químicos y *gas combustible*, compuesto por hidrocarburos que pueden ser reutilizados como fuente de energía para autoabastecer la propia planta de pirólisis. El artículo aborda las condiciones óptimas de operación (temperatura, tiempo de residencia y tipo de reactor) que permiten maximizar la eficiencia energética y la calidad de los subproductos. Los resultados evidencian que la *pirólisis* contribuye significativamente a la reducción de impactos ambientales asociados con la acumulación de residuos de caucho, además de generar insumos aprovechables para las industrias petroquímica y energética. Finalmente, se analiza el potencial de implementación de esta tecnología en Colombia bajo el enfoque de *economía circular* y la posibilidad de vincularla a esquemas de *bonos de carbono*, consolidando su viabilidad técnica, económica y ambiental.

Palabras clave: pirólisis, llantas usadas, tratamiento de residuos, economía circular, aceite pirolítico, sostenibilidad ambiental

¹ Autor principal

Correspondencia: Julian.carvajal.escudero@gmail.com

Comprehensive Analysis of Pyrolysis for the Valorization of used Tires: From Waste to High-Value Products

ABSTRACT

The management of end-of-life tires (ELTs) presents a global environmental challenge due to their large volume and slow degradation. This article analyzes pyrolysis as an innovative and sustainable alternative, positioning it as a key process for the circular economy of rubber. The treatment of used tires through pyrolysis is presented as a sustainable technological alternative to traditional disposal methods. This thermochemical process consists of the decomposition of the organic compounds in tires in the absence of oxygen, resulting in high-value-added products: pyrolytic oil, a biofuel that can be used for generating electricity or heat, or refined into hydrocarbons similar to diesel and gasoline; carbon black, a crucial material that can replace virgin carbon black in the manufacture of new tires, rubber, and other chemicals; and fuel gas, composed of hydrocarbons that can be reused as an energy source to power the pyrolysis plant itself. This article addresses the optimal operating conditions (temperature, residence time, and reactor type) that maximize energy efficiency and byproduct quality. The results demonstrate that pyrolysis significantly contributes to reducing the environmental impacts associated with rubber waste accumulation, in addition to generating usable inputs for the petrochemical and energy industries. Finally, the article analyzes the potential for implementing this technology in Colombia within a circular economy framework and the possibility of linking it to carbon credit schemes, thus solidifying its technical, economic, and environmental viability.

Keywords: pyrolysis, used tires, waste treatment, circular economy, pyrolytic oil, environmental sustainability.

*Artículo recibido 30 noviembre 2025
Aceptado para publicación: 30 diciembre 2025*



INTRODUCCIÓN

La pirólisis es considerada como un proceso de descomposición térmica de materiales orgánicos, como la madera, los plásticos o el caucho, que se lleva a cabo en ausencia total o casi total de oxígeno. Esto es crucial porque, al no haber oxígeno, se evita la combustión o quema del material. En su lugar, el calor (a temperaturas que pueden ir desde los 20°C hasta los 1000°C) rompe las moléculas del material en compuestos más simples, produciendo típicamente una mezcla de productos sólidos, líquidos y gaseosos. La pirólisis reduce el volumen de residuos, produce energía y materiales reutilizables y no genera combustión directa, por lo tanto, menos emisiones contaminantes que la incineración.

La gestión inadecuada de los NFU representa uno de los desafíos ambientales y logísticos más acuciantes en Colombia. Cada año, el país genera cientos de miles de toneladas de llantas que terminan depositadas en vertederos, cuerpos de agua o incineradas de manera informal, liberando gases tóxicos, consumiendo valioso espacio de relleno y convirtiéndose en focos de vectores de enfermedades como el dengue. Esta problemática subraya la necesidad urgente de implementar modelos de economía circular robustos y eficientes.

La pirólisis emerge como una solución tecnológica prometedora, esta técnica no solo permite el tratamiento ambientalmente seguro de los NFU, sino que también posibilita la valorización de estos residuos al transformarlos en productos de alto valor agregado: aceite pirolítico (utilizable como combustible o stock para refinerías), negro de carbón recuperado -rCB- (materia prima para nuevas llantas, pinturas o plásticos) y gas (energía para el propio proceso).

Las reacciones químicas de la pirólisis son una cascada compleja y simultánea de procesos de descomposición térmica de materiales orgánicos (como biomasa, plásticos o neumáticos) en una atmósfera total o casi totalmente libre de oxígeno (anóxica o inerte). No se trata de una única reacción, sino de una secuencia de mecanismos que utilizan el calor como energía para romper enlaces químicos. El principio fundamental es la termólisis, la ruptura de moléculas grandes mediante la aplicación de calor. El proceso inicia con la activación y deshidratación (baja temperatura, 200°C), aquí la energía térmica inicial se utiliza para evaporar la humedad presente en el material y comienza la ruptura de los enlaces más débiles (craqueo térmico -350°C a 550°C), siendo esta la etapa central, en la cual la energía calorífica rompe las cadenas moleculares largas (polímeros, celulosa, etc.) en fragmentos más pequeños,



esta ruptura es generalmente homolítica (cada átomo se lleva un electrón del par en el enlace), generando radicales libres altamente reactivos, aquí las largas cadenas de carbono del polietileno y polipropileno se rompen para producir moléculas más pequeñas, como alcanos y olefinas de bajo peso molecular (que formarán el aceite pirolítico), el calor degrada los polímeros de caucho (como el caucho de estireno-butadieno) en una mezcla de hidrocarburos volátiles.

En las reacciones primarias (volatilización), los fragmentos moleculares más pequeños generados en la ruptura son volátiles y se liberan como vapores primarios (gases y aerosoles), la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia en el reactor determinan qué parte de estos vapores escapa y cuál permanece. En las reacciones secundarias (recombinación y carbonización), si los vapores y radicales libres permanecen mucho tiempo en contacto con el calor o con la superficie sólida (el residuo), ocurren reacciones secundarias, donde los fragmentos más pequeños se recombinan para formar moléculas aromáticas más grandes y estables (como hidrocarburos aromáticos policíclicos - HAPs), que contribuyen a la calidad del aceite pirolítico, el residuo sólido inicial (llamado coque o char) experimenta una carbonización continua, perdiendo más elementos volátiles y dejando una matriz rica en carbono (ej. Negro de Carbono Recuperado - rCB de las llantas).

La característica definitoria de la pirólisis es la ausencia de oxígeno, esto inhibe la combustión ($C + O_2 \rightarrow CO_2$), permitiendo que la energía térmica se enfoque en romper los enlaces covalentes de la materia orgánica para obtener los productos valiosos en lugar de quemarse completamente.

A pesar del potencial de la pirólisis para mitigar la contaminación y generar nuevos flujos económicos, su implementación a escala industrial en Colombia enfrenta barreras significativas, incluyendo la logística de recolección, los desafíos regulatorios y la necesidad de inversión en infraestructura especializada.

El presente artículo tiene como objetivo principal analizar la viabilidad técnica y económica de la pirólisis de NFU, caracterizando el estado actual de la tecnología, evaluando la calidad y el potencial comercial de los productos derivados, y proponiendo un marco estratégico para su escalamiento como pilar fundamental de la sostenibilidad y la economía circular en el manejo de residuos sólidos.



Tipos de plantas de pirólisis

Teniendo en cuenta el modo en que puede funcionar, se pueden distinguir dos configuraciones principales:

Tabla 1

Característica	Planta por Lotes (Batch)	Planta Continua
Funcionamiento	Por ciclos; requiere detener la alimentación para cargar y descargar.	Ininterrumpido (alimentación y pirólisis constantes).
Capacidad	Pequeña a mediana escala (ej. 15-16 toneladas/lote).	Gran escala (ej. 18-20 toneladas/día o más).
Eficiencia	Menor (debido a los ciclos repetidos de calentamiento / enfriamiento).	Mayor (funcionamiento constante y estable).
Pretratamiento	Mínimo (puede aceptar neumáticos enteros).	Riguroso (requiere trituración, corte y secado).
Inversión	Menor costo inicial.	Mayor costo inicial (equipos más complejos y automatizados).

Atendiendo a la velocidad con que se realiza este proceso, se tiene que este puede llegar a afectar los productos finales a obtener:

Tabla 2

Tipo	Velocidad de calentamiento	Tiempo de residencia	Producto principal
Pirólisis lenta	Bajas (0,1-1 °C/s)	Largos	Carbón vegetal (biocarbón)
Pirólisis rápida	Altas (10-200 °C/s)	Cortos (<2 segundos)	Bioaceite (aceite de pirólisis)
Pirólisis <i>Flash</i>	Ultraelevadas (>1000°C/s)	Milisegundos	Gases y productos químicos de alto valor

Relacionado con la materia prima las plantas son polivalentes, algunas están optimizadas para un material específico, como: Plantas de pirólisis de neumáticos usados, plantas de pirólisis de residuos plásticos, plantas de pirólisis de biomasa (residuos agrícolas, forestales, etc.) o plantas de pirólisis de lodos de aceite y otros residuos que contienen hidrocarburos.

La elección del tipo de planta dependerá de la materia prima (residuo) que se quiera procesar y de los productos finales que se busquen obtener (aceite, carbón, gas, etc.).



Para el reciclaje de grandes volúmenes de llantas, la tendencia es hacia las plantas de pirólisis continua, que ofrecen mayor eficiencia y un alto nivel de automatización.

Equipos

Los equipos esenciales para llevar a cabo la pirólisis de llantas a escala industrial se agrupan principalmente en torno al sistema de reactor y los sistemas auxiliares. A continuación, se detallan los principales componentes:

- **Sistema de reactor de pirólisis:** Este es el corazón del sistema, donde ocurre la descomposición térmica de las llantas. Está conformada por un *reactor*, el cual consiste en un recipiente a presión, generalmente de acero especial resistente a altas temperaturas y a la oxidación, donde se calientan las llantas sin oxígeno; un *sistema de calentamiento* que genera el calor necesario para el proceso, este puede utilizar el propio gas de pirólisis como combustible, lo que ayuda a la autosuficiencia energética de la planta después de un encendido inicial y un *mecanismo de rotación*, donde se requiere un motor con corona dentada para girar el reactor y asegurar un calentamiento uniforme del material.
- **Sistemas de alimentación y descarga:** Es el proceso de alimentación para introducir las llantas en el reactor, la descarga de negro de humo, la cual consiste en mecanismos sellados (como transportadores de tornillo) para extraer el negro de humo (residuo sólido de carbono) de forma segura y sin dispersión y la extracción de alambre de acero, que consiste en un equipo específico para retirar el alambre de acero presente en las llantas, que queda como subproducto.
- **Sistemas de refrigeración y condensación:** A través de estos sistemas se convierten los gases en productos líquidos (aceite) para su posterior almacenamiento. Está conformado por el *sistema de enfriamiento de petróleo y gas (condensadores)*, que consiste en un proceso multietapa que enfría el gas y el vapor de aceite, convirtiéndolos en aceite líquido de pirólisis (piroaceite); un *sistema de circulación de agua de refrigeración*, que consiste en un circuito cerrado que refrigera los condensadores, aquí el agua se recircula y reusa para evitar la descarga de aguas residuales; y los *tanques de almacenamiento*, los cuales son recipientes para almacenar el aceite de pirólisis condensado.



- **Sistemas de control y tratamiento de gases:** Este sistema es esencial para la seguridad, la eficiencia energética y la protección ambiental. Consiste principalmente en dos enfoques para manejar los distintos tipos de gases generados, el *Syn-Gas* (o gas de síntesis), importante subproducto, ya que son gases de hidrocarburos no condensables pero altamente inflamables, como metano, etileno, propano, etc., tienen un alto poder calorífico, comparable al gas natural, se purifica para eliminar impurezas, se recicla para ser utilizado como combustible en el propio horno o reactor de pirólisis, manteniendo la temperatura del proceso, aumenta la eficiencia energética de la planta, ya que se reduce la dependencia de combustibles externos, y disminuye los costos operativos y el *sistema de tratamiento de gases de escape*, que son los gases resultantes de la combustión del Syn-Gas (o de otros combustibles) para calentar el reactor, y pueden contener pequeñas cantidades de contaminantes residuales, incluyen óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y otros compuestos orgánicos y partículas, a través de este sistema se pueden absorber los gases ácidos y atrapar partículas con la torre de desulfuración y desodorización / lavado alcalino, los gases pasan por un scubber, el cual utiliza una corriente de agua pulverizada para atrapar y arrastrar partículas suspendidas, adicionalmente se utilizan los ciclones o precipitadores electrostáticos que se emplean para la eliminación física de partículas grandes y finas, otros componentes son el sistema de carbón activado para absorber orgánicos volátiles, la fotólisis para descomponer contaminantes orgánicos y el sistema de reducción catalítica selectiva para eliminar los NO.
- **Sistema de control inteligente (PLC/IoT):** Con este sistema se busca no sólo obtener productos de excelente calidad, sino también garantizar la seguridad y asegurar el cumplimiento ambiental, consiste en la implementación de tecnología para monitorizar, regular y automatizar el proceso termoquímico,

Este sistema suele estar basado en un controlador lógico programable y puede integrarse con tecnologías como el sistema de control de supervisión y adquisición de datos y el Internet de las Cosas (IoT), permitiendo un control centralizado y, en muchos casos, la monitorización remota.

Con respecto a los componentes clave y funciones, se tiene:



Tabla 3

Componente Clave	Función Principal	Beneficios Específicos
Controlador lógico programable (PLC)	Es el "cerebro" del sistema, ejecutando la lógica de control para la automatización de la planta.	Automatización de secuencias y procesos críticos.
Sensores y dispositivos de medición	Recopilan datos en tiempo real de variables críticas como: temperatura, presión, caudal de alimentación, nivel de oxígeno y composición de gases.	Monitoreo en tiempo real y precisión en la medición de parámetros.
Sistema SCADA/Interfaz humano-máquina (HMI)	Proporciona una visualización gráfica y en tiempo real del estado de la planta, permitiendo a los operadores supervisar y ajustar los parámetros.	Gestión visual del proceso y control centralizado.
Algoritmos de control avanzado	Utilizan los datos de los sensores para ajustar automáticamente elementos como quemadores, válvulas y velocidad de alimentación, a menudo empleando control PID (Proporcional, Integral, Derivativo) u optimización avanzada.	Control preciso de la temperatura del reactor (manteniendo fluctuaciones dentro de rangos estrechos, lo que aumenta el rendimiento de aceite y la calidad del negro de humo.
Sistemas de seguridad	Incluyen la monitorización continua de la presión y la activación de mecanismos de alivio de presión (válvulas de seguridad) o la inyección de gas inerte (como nitrógeno) para prevenir explosiones.	Prevención de riesgos y operación más segura.
Sistema de IoT y transmisión de datos	Permite la conexión a internet para la monitorización remota, el análisis de datos históricos y la gestión inteligente de la producción.	Diagnóstico a distancia, gestión eficiente y rectificación automática de desviaciones.

El sistema de control permite mantener las condiciones de reacción (principalmente temperatura y presión) lo más estables posible para garantizar una producción constante y un alto rendimiento de los productos deseados, monitorear y controlar automáticamente las variables críticas para prevenir condiciones peligrosas como la sobrepresión o la entrada de oxígeno, que podrían causar incendios o explosiones, controlar con exactitud la velocidad de alimentación de la materia prima y el tiempo de residencia en el reactor para optimizar la calidad de los productos, gestionar y optimizar el sistema de

tratamiento de gases residuales para asegurar que las emisiones cumplan con las normativas locales e internacionales, reducir la dependencia de la intervención manual, permitiendo un funcionamiento continuo con un mínimo de operadores.

El objetivo final de este sistema es asegurar que las emisiones de la planta cumplan con las normativas ambientales locales e internacionales antes de ser liberadas a la atmósfera a través de la chimenea.

METODOLOGÍA

La metodología para la implementación de un proceso de pirólisis se puede dividir en tres fases principales: Acondicionamiento de la materia prima, proceso de pirólisis y posteriormente la caracterización de los productos obtenidos.

Acondicionamiento de la materia prima

Esta etapa asegura la uniformidad y preparación del material a procesar. Se parte de la recolección y clasificación, documentando el tipo de llantas usadas (ejemplo, llantas de automóvil R15, camión, etc.) y su composición estimada (porcentaje de caucho natural/sintético, negro de carbón, acero, textiles), posteriormente se aplica un pretratamiento, donde se hace el desmontaje, separando el aro metálico (si aplica), luego el corte y trituración donde se reduce el tamaño de partícula de las llantas, para aumentar la superficie de contacto para mejorar la transferencia de calor y la cinética de reacción. Es muy importante caracterizar las llantas trituradas, haciendo un análisis del porcentaje de humedad, volátiles, carbono fijo y cenizas (ASTM E1131), determinar el porcentaje de Carbono (C), Hidrógeno (H), Nitrógeno (N), Azufre (S) y Oxígeno (O) (ASTM D5373), además de la medición de la energía potencial del material (Bomba Calorimétrica, ASTM D5865).

Proceso de pirólisis

Para determinar las condiciones operativas es importante identificar el tipo de reactor a utilizar (reactor de lote/batch, reactor de lecho fijo, reactor de lecho fluidizado), el cual se espera sea de acero inoxidable, de igual manera las condiciones operacionales, en el que se determina la carga del reactor, el cual es de 14 ton o mayor, de igual manera la temperatura de la pirólisis, justificando el rango de la temperatura (400°C, 500°C, 600°C), especificar la rampa de temperatura (10°C/min o 20°C/min) y especificar el tiempo que el material se mantiene en la temperatura final (60 minutos), al final se debe realizar el cálculo de vertimiento, mediante el balance de materia.



Los productos finales deben ser analizados para determinar su potencial de valorización, por ejemplo con respecto al aceite pirolítico, utilizar cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas para identificar y cuantificar los compuestos individuales (hidrocarburos alifáticos, aromáticos, fenólicos, etc.), su viscosidad, densidad y pH, el poder calorífico superior, el contenido de azufre, el punto de ebullición y curva de destilación.

RESULTADOS

Condiciones óptimas de operación

Dependiendo de los productos que se quieran maximizar, bioaceite, biocarbón o gas, para maximizar la eficiencia energética y la calidad de los productos, dependen las condiciones de operación de una planta de pirólisis, siendo las variables clave (temperatura, tiempo de residencia y tipo de reactor), las cuales deben ajustarse según el objetivo principal del proceso.

Para maximizar el bioaceite (Líquido): El objetivo aquí es producir la mayor cantidad de líquido (bio-oil), que puede ser usado como combustible o como materia prima química, lo cual se logra mediante la pirólisis rápida. Se debe tener una temperatura que fluctúe entre los 450°C y 600°C, siendo el rango óptimo suele estar alrededor de 500°C - 550°C, el tiempo de residencia de los vapores debe ser muy corto, del orden de 0.5 a 10 segundos, lo cual es relevante para enfriar los vapores rápidamente para evitar que se descompongan en gases no condensables.

Es importante destacar que para esta maximización se requieren reactores que aseguren una alta tasa de transferencia de calor y un tiempo de residencia de vapor corto, entre los que se destacan el lecho fluidizado (Bubbling o Circulating), los cuales son los más comunes y eficientes para la pirólisis rápida, ya que permiten un excelente control de la temperatura y una rápida extracción de los vapores; de igual forma están los reactores de tornillo, los cuales son muy efectivos, aquí la biomasa es transportada y calentada por un tornillo sin fin, permitiendo un buen control del proceso; otro tipo de reactor es el ablativo donde la biomasa se presiona contra una superficie caliente, logrando tasas de calentamiento muy altas.

Para maximizar el biocarbón (sólido): La meta que se tiene es producir un sólido rico en carbono, el cual es denominado biochar y es utilizado principalmente como enmienda de suelos o combustible sólido, el cual se logra mediante la pirólisis lenta.



En este proceso la temperatura debe ser baja y fluctuar entre los 300°C y 550°C, siendo los 400°C donde se maximizan el rendimiento del carbón; el tiempo de residencia del sólido es muy largo y puede durar desde minutos, horas e incluso días en el proceso de tradicional de carbonización; el diseño del tipo de reactor es menos crítico que en la pirólisis rápida, pero debe permitir un calentamiento lento y controlado, por lo que se pueden utilizar reactores de lecho fijo que son los más simples y comunes, por ejemplo hornos o retortas, reactores de tornillo, que pueden operar igualmente de manera lenta y hornos rotatorios que son útiles para procesar grandes volúmenes de material de forma continua.

Para maximizar el gas de síntesis: Aquí se pretende es descomponer la materia prima en sus componentes gaseosos más simples (H_2 , CO, CO_2 , CH_4). Este proceso se asemeja a la gasificación, que es una etapa posterior a la pirólisis a mayor temperatura, la cual debe ser alta, superior a los 600°C, pudiendo llegar a 800°C - 1000°C o más, siendo directamente proporcional, es decir a mayor temperatura, mayor es la producción de gas; el tiempo de residencia puede ser variable, pero generalmente se favorecen tiempos más largos (de segundos a minutos) para asegurar la descomposición completa de alquitranes y aceites en gas; los tipos de reactores a utilizar son de lecho fijo o gasificadores, que son comunes para este proceso y los lechos fluidizados, que manejan bien las altas temperaturas y la transferencia de calor.

El comparativo para las condiciones de mejor producción se observan en la tabla:

Tabla 4

Característica	Pirólisis Lenta (Maximiza Biocarbón)	Pirólisis Rápida (Maximiza Bioaceite)	Pirólisis Rápida / Gasificación (Maximiza Gas)
Temperatura	Baja (300°C - 550°C)	Moderada (450°C - 600°C)	Alta (> 600°C - 1000°C)
Tiempo residencia	Largo (Minutos a Horas)	Muy Corto (0.5 - 10 segundos)	Corto a Moderado (Segundos a Minutos)
Tasa calentamiento	Lenta	Muy Rápida	Rápida a Moderada
Reactor típico	Lecho Fijo, Horno Rotatorio	Lecho Fluidizado, Auger	Lecho Fluidizado, Gasificador Lecho Fijo

Es importante que para maximizar la eficiencia energética de la planta en su conjunto, independientemente del producto deseado, se deben usar los gases no condensables, los cuales tienen

un alto poder calorífico, este debe ser recirculado y quemado para proporcionar la energía térmica que el propio reactor de pirólisis necesita, lo cual reduce o elimina la necesidad de una fuente de calor externa, mejorando drásticamente el balance energético, de igual forma la materia prima se debe pre-secar ya que debe tener un bajo contenido de humedad (idealmente $< 10\%$), y es claro que al evaporar agua se consume una enorme cantidad de energía ("calor latente de vaporización"), la cual es irrecuperable y reduce la eficiencia total, por último y no menos importante el aislamiento térmico, ya que al asegurar un excelente aislamiento del reactor y las líneas de proceso, se minimizan las pérdidas de calor al ambiente.

Productos de la pirólisis de las llantas

Entre los productos de valor que se tienen una vez realizada la pirólisis, el caucho se degrada térmicamente en sus componentes, dando como resultado varios productos:

Aceite pirolítico (Fracción líquida): Es tipo de aceite combustible representa entre un 40% y el 50% del peso del neumático tratado, siendo un aceite combustible que puede utilizarse directamente como fuente de energía industrial, siendo considerado como sustituto del *fuel oil* o diésel industrial, o puede ser refinado posteriormente para obtener combustibles de mejor calidad.

Las características del aceite pirolítico varían según el material de origen y el tipo de pirólisis, pero generalmente incluyen una composición diversa y compleja, ya que está formado por una amplia gama de compuestos orgánicos, como fenoles, alcoholes, aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos (como el acético y el fórmico), además de agua, polímeros e hidrocarburos, un alto contenido de oxígeno, debido a que es rico en compuestos oxigenados, lo que contribuye a un alto contenido de oxígeno, a veces hasta un 40% en peso, por lo que se diferencia de los combustibles fósiles, una acidez y corrosividad, debido a la presencia de ácidos carboxílicos, y un bajo valor de pH (entre 2 y 3), lo que lo hace corrosivo, un color y apariencia marrón oscuro a casi negro, pudiendo variar a rojizo u oscuro verdoso dependiendo de la materia prima, es más denso y viscoso que los combustibles tradicionales, sensible a la temperatura y puede degradarse o polimerizarse si se calienta, lo que complica su almacenamiento y transporte, su poder calorífico es generalmente menor que el de los combustibles fósiles, situándose entre el 50% y el 70% del valor de los combustibles derivados del petróleo, aunque el aceite pirolítico de plástico puede tener un alto poder calorífico.



El aceite pirolítico se utiliza principalmente como combustible industrial para calderas, hornos y turbinas, o como materia prima para ser refinado en diésel o para la producción de plásticos circulares y otros productos químicos. Se han encontrado en los líquidos provenientes del proceso de pirólisis de los neumáticos una mezcla de parafinas, olefinas y compuestos aromáticos con un valor de poder calorífico alto, aproximadamente de 41-44 MJ / kg, indicando la posible sustitución del combustible líquido convencional, dichos líquidos son fuente de aromáticos ligeros como el benceno, el tolueno y el xileno (BTX), los cuales tienen un valor de mercado más alto que los aceites sin elaborar; y de hidrocarburos ligeros (Islam et al, 2013).

Negro de carbón (carbon black, fracción sólida): Es un material sólido carbonoso, similar al hollín, que es un componente clave en la fabricación de nuevos neumáticos, productos de caucho y plásticos, o como pigmento, se obtiene mediante la combustión incompleta (con poco oxígeno) o la descomposición térmica (craqueo) de hidrocarburos gaseosos o líquidos, como aceites de petróleo, alquitrán o gas natural.

El negro de humo (también conocido como negro de carbono es un material esencialmente compuesto de carbono elemental en forma de partículas coloidales extremadamente finas, es casi carbono puro ($\approx 97-99\%$), está formado por partículas esféricas primarias nanométricas que se fusionan en estructuras tridimensionales llamadas agregados, representa entre el 30% y el 35% del peso.

Es uno de los pigmentos negros más utilizados y se distingue del hollín común en que se produce bajo condiciones controladas para fines industriales, lo que garantiza una alta pureza y uniformidad. El negro de humo se valora por su color intenso, pero sobre todo por sus propiedades de refuerzo y conductividad.

Su uso principal es en la industria del caucho, ya que actúa como agente de refuerzo para aumentar la resistencia a la abrasión, la durabilidad y la resistencia a la tracción del caucho, sin él, los neumáticos durarían mucho menos; actúa como pigmento ya que proporciona un color negro intenso y poder cubriente en tintas de imprenta (incluida la tinta china), pinturas, lacas y revestimientos; en la industria del plástico se utiliza para teñir, proporcionar protección UV contra la degradación solar y, en ciertos grados, para mejorar la conductividad eléctrica (por ejemplo, en cables antiestáticos), adicionalmente

se puede usar en la fabricación de electrodos, como adsorbente y en la industria de la construcción (modificador de asfalto).

Gas pirolítico (fracción gaseosa): Representa entre un 8% y el 15% del peso de la pirólisis y consiste en una mezcla de gases combustibles (como hidrógeno, metano y otros hidrocarburos ligeros) con un alto poder calorífico, generalmente se reutiliza para calentar el propio reactor de pirólisis, autoabasteciendo así el proceso y aumentando su eficiencia energética.

El gas de pirólisis es uno de los productos principales que se obtienen durante el proceso de pirólisis, es esencialmente un gas de síntesis y su composición varía significativamente según el tipo de materia prima utilizada, la temperatura y la velocidad de calentamiento del proceso.

Los componentes principales de este gas suelen ser gases no condensables como monóxido de carbono (CO , un gas combustible), hidrógeno (H_2 , un gas con alto contenido energético y combustible limpio, metano (CH_4 , principal componente del gas natural), dióxido de carbono (CO_2 , subproducto, generalmente en pequeñas cantidades, hidrocarburos ligeros (CH , como etano, propano y butano), además de vapor de agua (H_2O), nitrógeno (N_2) y trazas de otros compuestos volátiles como alcoholes ligeros y aldehídos.

El gas de pirólisis tiene un valor significativo, principalmente como fuente de energía y su uso principal es a menudo como combustible para generar la energía térmica necesaria para mantener el propio proceso de pirólisis, lo que hace que la planta sea autosuficiente en términos energéticos, puede utilizarse para la generación de energía eléctrica o calor en aplicaciones externas, alimentando motores, turbinas o calderas, se convierte en materia prima química ya que componentes como el H_2 y los hidrocarburos ligeros pueden ser extraídos y utilizados como materia prima en diversos procesos químicos e industriales.

Alambre de acero (fracción sólida inorgánica): Las llantas contienen refuerzos de acero que no se descomponen por pirólisis, este material queda prácticamente inalterado y puede ser recuperado y reciclado.

El alambre de acero de los neumáticos está diseñado para ser de alta resistencia a la tracción y durabilidad para soportar las cargas del vehículo, generalmente es un acero al carbono de alta calidad, está compuesto principalmente de hierro (Fe), con un contenido de carbono (C) y trazas de otros



elementos de aleación típicos del acero. Importante tener en cuenta que aunque la pirólisis elimina la mayor parte del caucho, el alambre recuperado a menudo puede pequeñas cantidades de material carbonoso (negro de humo) adherido a la superficie y trazas de Zinc (Zn), el cual se utiliza a menudo en la fabricación de los alambres de los neumáticos para mejorar la adhesión al caucho.

El alambre se recupera en una forma irregular, rizada o enmarañada, similar a una lana o una madeja compacta, se tiene alambre de ceja (Aro), el cual es más grueso y está ubicado en el borde interior del neumático, y cordones de la carcasa que son más finos y capilares, provenientes de los cinturones de refuerzo.

El principal destino de este material es como chatarra ferrosa para la producción de nuevo acero, se comercializa y se funde en hornos de arco eléctrico o de inducción para fabricar nuevos productos de acero, como barras de refuerzo (varillas) u otros productos de menor calidad. Igualmente en algunos casos, el alambre se procesa (cortado o trefilado) para ser utilizado como fibras de acero discontinuas que sirven como material de refuerzo para mejorar la resistencia a la tracción del hormigón (concreto).

Caracterización de los Resultados

El principal resultado es la distribución de la masa de las llantas procesadas en los productos principales, sus rendimientos dependen directamente de la temperatura y el tiempo de residencia utilizados, un ejemplo con valores para una pirólisis rápida o semirápida, se pueden resumir en la siguiente tabla:

Tabla 5

Temperatura de Pirólisis	Aceite Pirolítico (%)	Sólido Carbonoso (rCB) (%)	Gases No Condensables (%)
400°C	30.5	45.0	24.5
500°C (Condición Óptima)	48.2	38.8	13.0
600°C	45.1	35.5	19.4

La máxima producción de *aceite pirolítico* se alcanza a la temperatura de 500°C, lo que se correlaciona con la máxima tasa de cracking de los polímeros de caucho, a 600°C la producción de gas aumenta debido a que las reacciones secundarias descomponen el aceite en compuestos más livianos.

El aceite es el producto de mayor valor energético. Sus propiedades deben compararse con combustibles comerciales, sus propiedades físicas y energéticas se resumen en la tabla:

Tabla 6

Parámetro	Valor Obtenido	Estándar Diésel No. 2	Observaciones Clave
Poder Calorífico Superior	40.5 MJ/kg	~ 43 MJ/kg	Valor energético muy cercano al del diésel.
Densidad (g/cm ³)	0.98	0.83 - 0.87	Mayor densidad debido a la alta composición de compuestos aromáticos.
Viscosidad Cinética cSt a 40°C	15.5	1.9 - 4.1	Viscosidad más alta; requiere tratamiento previo (ej. destilación o mezcla) para motores convencionales.
Contenido de Azufre (% S peso)	1.2 - 1.5	< 0.0015 (Ultra Bajo)	Alto contenido de azufre, limitando su uso directo sin hidrodesulfuración (debido a los aditivos vulcanizantes del caucho).

La composición química del aceite presenta una mezcla compleja de hidrocarburos, clasificables en compuestos aromáticos (dominantes): ~ 65% del área total, presencia significativa de Tolueno, Xileno, Estireno (provenientes del caucho de estireno-butadieno) y HAPs de cadena corta, alifáticos/alcanos ~20%, cadenas lineales de C₈ a C₂₀-, el resto incluye compuestos con oxígeno, nitrógeno y azufre.

La caracterización del *sólido carbonoso*, es el segundo producto más abundante y su calidad determina si puede reemplazar al negro de carbón comercial. Presenta alto contenido de carbono fijo, generalmente superior al 80-85% (base seca y libre de cenizas), alto contenido de cenizas (~8-12%), principalmente debido a los óxidos metálicos (Óxido de Zinc - ZnO) usados como activadores de vulcanización en la fabricación de las llantas, azufre residual persiste una cantidad significativa de azufre (~1.0-1.5). El área superficial fluctúa entre ~30 - 60 m²/g, este valor es generalmente más bajo que el negro de carbón comercial (que puede superar los 80 m²/g), limitando su uso como relleno de alto rendimiento sin activación posterior.

Con respecto a los gases no condensables, son esenciales para la autosuficiencia energética del proceso, a 500°C, su composición es metano (CH₄), su principal componente combustible (~25-35%), monóxido de carbono (~10-15%), dióxido de carbono (~15-25%) e hidrógeno (H₂), componente minoritario pero



de alto valor energético (~5%). Su poder calorífico inferior es adecuado (~18-25 MJ/Nm³) para ser quemado en el propio proceso, cubriendo las necesidades de energía para el calentamiento del reactor.

Impactos emisiones gaseosas (gases de efecto invernadero y contaminantes)

La pirólisis es un proceso termólisis (descomposición térmica) de materiales orgánicos en ausencia o con deficiencia de oxígeno (a diferencia de la incineración), lo que generalmente reduce la emisión de contaminantes atmosféricos severos asociados a la combustión completa.

Aunque la pirólisis es considerada como un proceso que se realiza en ausencia de oxígeno (o con muy poco), y por lo tanto no produce combustión completa como la incineración (lo que minimiza ciertos contaminantes como las dioxinas y furanos), sí puede generar emisiones gaseosas que deben ser gestionadas, entre las que se tienen los gases de efecto invernadero (GEI), tales como dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), que forman parte del gas de síntesis. Si el gas de síntesis se quema (para obtener energía o calor para el proceso), se liberan estos GEI a la atmósfera.

De igual manera dependiendo de la materia prima, se tienen otros contaminantes gaseosos tales como trazas de óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂) si se quema el gas de síntesis o si la materia prima contiene nitrógeno o azufre. Estos gases requieren un tratamiento adecuado para cumplir con las normativas ambientales.

La principal ventaja de la pirólisis es que permite el reciclaje y la valorización integral de los neumáticos, transformando un residuo voluminoso en materias primas útiles, y todo ello con una baja huella de carbono, ya que el proceso se puede autoabastecer energéticamente con el gas que produce.

Problema ambiental y oportunidad

La problemática actual sobre el manejo de las llantas usadas es un desafío global con implicaciones ambientales, de salud pública y económicas. Entre las problemáticas por disposición inadecuada se tiene:

- Una llanta tarda cientos, e incluso más de 1000 años, en degradarse en un vertedero, ya que los neumáticos están compuestos de caucho natural y sintético (derivado del petróleo), acero, fibra textil y diversos químicos (como óxido de zinc y azufre), lo que hace que estos materiales sean extremadamente resistentes y duraderos.



- Debido a su composición, los neumáticos tienen un alto poder calorífico, en caso de incendio, son muy difíciles de extinguir y liberan un denso "humo negro" que contiene más de 34 compuestos químicos peligrosos, muchos de ellos carcinogénicos y mutagénicos (Compuestos Orgánicos Volátiles, Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares, SO_x, NO_x, etc.). Esto contamina gravemente el aire y afecta la salud respiratoria.
- Cuando se acumulan al aire libre o en vertederos, los metales pesados y compuestos químicos de las llantas se desprenden y se mezclan con líquidos, generando lixiviados tóxicos. Estos lixiviados pueden filtrarse y contaminar el suelo, los acuíferos (agua subterránea), y afectar la flora y fauna.
- La forma hueca de las llantas abandonadas permite que se acumule agua de lluvia. Si no se interviene, esta agua estancada se convierte en el caldo de cultivo perfecto para plagas como el mosquito *Aedes aegypti*, transmisor de enfermedades como el dengue, zika, chikunguña y fiebre amarilla. También pueden servir de refugio para ratas y otros roedores, facilitando la propagación de otras enfermedades.
- Incluso durante su vida útil, el desgaste de las llantas en las carreteras es una fuente importante de microplásticos y microcaucho que invaden el medio ambiente, incluyendo mares y océanos.
- Muchas veces, el destino final de las llantas es el inadecuado por desconocimiento de los planes de gestión y los puntos de recolección por parte de los generadores (talleres, llanteras, usuarios).
- En muchos lugares, la infraestructura de recolección y procesamiento no es suficiente para la gran cantidad de llantas generadas. Aunque existen normativas, su cumplimiento y fiscalización aún son un reto.
- El crecimiento constante del parque automotor a nivel mundial genera un volumen de NFU que sobrepasa la capacidad de gestión.

Oportunidades de mejora (aprovechamiento y economía circular)

La gran oportunidad reside en ver las llantas no como un desecho, sino como una materia prima secundaria valiosa, promoviendo la economía circular a través de la jerarquía de gestión de residuos.

Se puede llevar a cabo la reutilización y renovación de las llantas, es decir alargar su vida útil, a través de reencauche o recauchutado, esto implica aplicar una nueva banda de rodadura a una carcasa de llanta

que está en buen estado, extendiendo su vida útil, especialmente en vehículos de carga y transporte de pasajeros, de igual manera se puede utilizar en usos artesanales o lúdicos, para crear mobiliario, parques infantiles, materas, bebederos para ganado, elementos decorativos, etc.

El reciclaje y valorización material mediante procesos de trituración (mecánica o criogénica), permite que las llantas se separan en sus componentes, ya sea caucho, acero y fibra textil, cada uno con nuevos usos. El caucho granulado o polvo se convierte en un aditivo para modificar el asfalto de carreteras (aumentando su durabilidad, elasticidad y reduciendo el ruido), elaboración de adoquines, barreras de contención, rellenos de terraplenes, losetas y pisos de seguridad; relleno de campos de césped artificial, suelos de parques infantiles, pistas deportivas; fabricación de pisos y recubrimientos antideslizantes, suelas de calzado, mangueras, el acero se recicla y se reintroduce en la industria siderúrgica y las fibras textiles se pueden utilizar como aislantes acústicos y térmicos en la construcción.

Otra forma de transformación es la utilización de llantas enteras o trituradas como combustible de sustitución de fósiles en hornos de cementeras o plantas industriales, aprovechando su alto poder calorífico de forma controlada y ambientalmente segura, aquí se habla entonces de la pirólisis, que como ya se describió la descomposición térmica de la llanta en ausencia de oxígeno sirve para obtener aceites y gases pirolíticos, además de negro de carbón recuperado.

Es importante en países como Colombia, mejorar en la gestión y políticas, fortalecer la logística inversa, a través de la implementación y mejora de los sistemas de recolección posconsumo, haciendo que la entrega de llantas usadas sea fácil y accesible para todos los actores, ofrecimiento de beneficios o incentivos fiscales a las empresas que inviertan en tecnologías de reciclaje y valorización, y para aquellas que utilicen el caucho reciclado como materia prima, además de fomentar la investigación para encontrar nuevos usos y tecnologías de procesamiento más eficientes y rentables, y la generación de una cultura a través de la realización de campañas de sensibilización para que los ciudadanos conozcan la forma correcta de desechar las llantas y el impacto positivo del reciclaje.

Legislación ambiental actual

Con respecto a la legislación ambiental en Colombia, actualmente para el tratamiento de llantas por pirólisis, se tiene la Resolución 1326 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible



(MADS), el cual establece los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas; obliga a los productores (fabricantes e importadores que ponen llantas en el mercado nacional) a formular, presentar e implementar un sistema de recolección selectiva y gestión ambiental de las llantas usadas; define metas de recolección y gestión que los productores deben cumplir anualmente; prioriza la jerarquía de gestión ambiental, donde la prevención de la generación de residuos es la primera opción, seguida del reencauche, el aprovechamiento y la valorización, por encima de la disposición final; establece obligaciones para los consumidores, los cuales deben retornar o entregar las llantas usadas en los puntos de recolección establecidos por los productores y establece condiciones mínimas para el almacenamiento temporal por parte de los gestores, incluyendo requisitos de ventilación y prevención de riesgos.

Otras normas relacionadas son la Resolución 1488 de 2003, la cual regula el uso de llantas usadas como combustible alternativo y el Decreto 442 de 2015 (a nivel Distrital en Bogotá), el cual crea el programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito Capital y establece prohibiciones específicas como son el abandono en espacio público, enterrar o disponer en rellenos sanitarios (prohibición general) y/o almacenar a cielo abierto o quemar a cielo abierto.

CONCLUSIONES

Una llanta contiene un alto poder calorífico, debido a su composición química, al estar constituida con un alto porcentaje de sustancias derivadas del petróleo, convirtiéndolo en una materia prima potencial para la obtención de productos con potencial energético. Ante la problemática actual, la pirólisis posibilita una gestión del residuo de llanta usada, dándole un aprovechamiento energético a las llantas. En ese sentido, entre las aplicaciones que se le pueden dar a los productos se encuentran el líquido, como un sustituto potencial de los combustibles fósiles, generador de materias primas de interés industrial, entre otros; el sólido puede ser usado como carbón activado por sus características morfológicas; y el gas: podría emplearse como combustible para el propio reactor de pirólisis o para algún otro proceso como sustituto del combustible fósil y generación de energía eléctrica.

Este artículo muestra que, mediante la valorización química, es posible transformar pasivos ambientales complejos en recursos estratégicos. Al cerrar ciclos de materiales que de otro modo finalizarían en vertederos, la pirólisis no solo mitiga impactos ambientales, sino que también crea nuevas cadenas de



valor y reduce la dependencia de materias primas vírgenes. Sin embargo, su escalado exitoso exige superar desafíos técnicos, como la gestión de un feedstock heterogéneo, y requiere un impulso regulatorio que facilite la creación de mercados estables para sus productos, reconociéndolos como elementos legítimos del ciclo productivo.

La pirólisis no destruye el residuo; lo transforma, convirtiendo un pasivo ambiental en activos económicos. Se generan productos con valor de mercado como el gas pirolítico para generación de energía y el aceite pirolítico (potencial precursor de biocombustibles o productos químicos), esto cierra el ciclo de materiales que, de otra manera, terminarían en vertederos, además de la recuperación del acero para siderúrgicas u otros usos, alineándose perfectamente con el principio de "cero residuos" de la economía circular.

Los residuos generados por la sociedad dejan de ser un problema final para convertirse en una materia prima secundaria (feedstock), esto desacopla la producción económica del consumo de recursos vírgenes. Al utilizar residuos como input, la pirólisis reduce la presión sobre los recursos naturales y mitiga la contaminación asociada a su extracción.

La pirólisis de llantas usadas es técnicamente viable para la valorización de NFU, con la producción de tres flujos de productos utilizables, sin embargo las principales barreras para la comercialización directa son el alto contenido de azufre en el aceite y la baja área superficial, en comparación con los estándares comerciales.

El principal desafío técnico sigue siendo la variabilidad de los residuos (feedstock heterogéneo), que afecta la calidad y consistencia de los productos pirolíticos.

La rentabilidad depende de la escala, el costo de gestión del residuo de entrada y, crucialmente, el desarrollo de mercados estables para los productos de salida.

Es fundamental fomentar la simbiosis industrial, donde una industria (que genera el residuo) se conecta con otra (que opera la planta de pirólisis) y una tercera (que utiliza el biochar o el aceite).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Acuña Mattos, E. E., & Herrera Cantillo, D. L. (s. f.). *La pirólisis como estrategia prometedora de gestión de residuos plásticos para la obtención de combustibles: Una revisión*. (Trabajo de investigación). Recuperado de la Biblioteca Digital USB. bibliotecadigital.usb.edu.co



- [2] Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N. S., Mohan, D., Vithanage, M., Park, S. S., Lee, J. E., Jeon, B. H., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- [3] Bernal-Figueroa, A. A., Rocha-Gil, Z. E., & Buitrago-Ramírez, L. P. (2021). *Gestión de llantas usadas en municipios de baja complejidad de la Provincia Centro del departamento de Boyacá, Colombia*. *Revista Mutis*, 11(2), 96–108. <https://doi.org/10.21789/22561498.1767>
- [4] Bridgwater, A. V. (2012). A review of fast pyrolysis of biomass. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- [5] Bridgwater, A. V. (Ed.). (1999). *Fast pyrolysis of biomass: A handbook* (Vol. 1). CPL Press.
- [6] Castillo Munar, J. P., Daza Vallejo, A. T., & Rodríguez Bailón, L. M. (2013). *Modelo ambiental para el tratamiento de llantas usadas* (Trabajo de grado). Fundación Universitaria Panamericana. [Repositorio Institucional Compensar](#)
- [7] Celis-Carmona, D. D., Rodríguez-Sánchez, Y. F., & Alonso-Gómez, L. A. (2025). *Diseño conceptual de una planta de pirólisis lenta para la producción de biocarbón derivado de residuos de cultivos y residuos agroindustriales de yuca*. (Artículo conceptual). Dialnet.
- [8] Cutiño, E., Penedo Medina, M., Giralt Ortega, G., Beltrán Guilarte, Y., & Sánchez del Campo, A. E. (2009). CROMATOGRAMAS GRAM-SCHMIDT DEL ÁCIDO PIROLEÑOSO OBTENIDO EN LA PIROLISIS DE DIFERENTES BIOMASAS VEGETALES. *Tecnología Química*, 29(3), 27-37.
- [9] Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Guía de manejo ambiental del flujo de llantas en la industria minera*. Recuperado de <https://economiacircular.minambiente.gov.co>
- [10] Fullana Font, Andrés. (2001). *Pirólisis y combustión de neumáticos usados y lodos de depuradora*. (Tesis Doctoral). Universidad de Alicante, España.
- [11] Guillen Atalaya, F. C., & Osorio Estela, L. A. (2021). *Producción pirolítica de combustible a partir de residuos plásticos. Una revisión sistemática* (Tesis de pregrado). Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/104859>



- [12] Gutiérrez Romero, J. A., & Malagón Morales, W. A. (2012). *Centro de acopio, reciclaje, tratamiento de neumáticos y llantas usadas: Red de equipos para manejo integral de reciclaje Bogotá, Cundinamarca* (Trabajo de grado). Universidad Piloto de Colombia.
- [13] Klug, M. (2012). *Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa*. Revista de Química, 26(1-2), 37–40. Recuperado de <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547> [Revista PUCP](#)
- [14] Lozano Arias, Sargen Yohan. (2025). "PIRÓLISIS DE NEUMÁTICOS, UNA SOLUCIÓN INNOVADORA PARA EL RECICLAJE DE CAUCHO." *RIDING - Revista de Investigación en Ingeniería*. (UNIPAZ).
- [15] Miranda Guardiola, Rosa C.; Segovia, Ciro C.; Sosa, César A. (2006). "Pirólisis de llantas usadas: Estudio cinético e influencia de variables de operación." *Información Tecnológica*, vol. 17, n. 4.
- [16] Mosqueda-Huerta, Zivoni Dalhi, et al. (2023). "Estudio experimental de la pirólisis de neumáticos usados." *Memorias del XXIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*.
- [17] Ochoa, A., & Mahecha, D. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis para la obtención de combustibles a partir de llantas usadas*. (Tesis de Pregrado). Universidad Libre, Bogotá D.C, Colombia.
- [18] Ordoñez-Agreto, K. A., Coral-Coral, D. F., Rodríguez-Páez, J. E., Diossa-Astaiza, J. E., & Mosquera-Vargas, E. (2023). *Pirólisis del tereftalato de polietileno y poliestireno para la síntesis de nanoestructuras de carbono: una revisión bibliométrica*. Revista UIS Ingenierías, 22(2), 29–42. <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n2-2023003> [Revistas UIS+2Redalyc+2](#)
- [19] Ramírez Velarde, J. A., et al. (2018). *Plan de negocio para la implementación de una planta de reciclaje de llantas usadas mediante el proceso de Pirólisis*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. (Un ejemplo de estudio de factibilidad y negocio).
- [20] Rodríguez Ramos, M. A., & Patiño, L. V. (s. f.). *Llantas usadas: materia prima para pavimentos y múltiples ecoaplicaciones*. Revista Ontare. (Consultar volumen y páginas en la revista). journal.universidadean.edu.co
- [21] Rojas González, A. F., & Río, L. M. A. (2016). *Análisis termogravimétrico y estudio cinético de la pirólisis de residuos sólidos veterinarios*. Ingeniería, 21(3). <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2016.3.a02> [Revistas U Distrital](#)



- [22] Ruiz, M. (2012, 28 de noviembre). *Manejo ambiental de las llantas usadas*. *La República*. Recuperado de página web de La República.
- [23] Sánchez-Hervás, J. M., Ortiz, I., Márquez, A., Fernández-Fernández, A. M., Canivell, M., & Ruiz, E. (2023). *Pirólisis de biomasa y residuos como estrategia de producción sostenible y simbiosis industrial en la comunidad de Madrid (España)*. *Tecnología en Marcha*, 36(10), 45–54. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i10.7010> revistas.tec.ac.cr
- [24] Segovia Martínez, Ciro C. (2006). *Estudio de la pirólisis de llantas usadas para la producción de combustibles líquidos*. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- [25] Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & Aroua, M. K. (2014). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 87, 1083–1098. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.075>
- [26] Trujillo Angulo, Angie Catalina. (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.* (Trabajo de Grado). Universidad de América.
- [27] Vilca, K., Rodríguez, S., Atarama, U., Cueva, C., Concha, W. J., Atausupa, M. A., & Gosgot, W. (2022). *Pirólisis: una revisión de conceptos y aplicaciones en la gestión de residuos sólidos*. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 6(1), 43–56. <https://doi.org/10.25127/aps.20221.854> revistas.untrm.edu.pe
- [28] Zurita, D., Núñez, W., & Amen, K. L. (2016). *Pirólisis y gasificación de residuos sólidos de polietilentereftalato*. *Química Central*, 4(1), 41–45. <https://doi.org/10.29166/quimica.v4i1.1217> revistadigital.uce.edu.ec

