

Tratamiento de residuos sólidos utilizando pirólisis: explorando las posturas sobre su aplicación

Solid waste treatment using pyrolysis: exploring perspectives on its application

Luis Ernesto NÚÑEZ-GONZÁLEZ^{1,*}, Angie Nohemí VITOLA-SANCHINELLI¹ & Gamaliel Giovanni ZAMBRANO-RUANO¹

¹Centro de Procesos Industriales y Departamento de Ingeniería Química, Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala

*Correspondence: Luis Ernesto Núñez-González (lenunez@uvg.edu.gt)

Recibido: 23/IX/2024; Aceptado: 13/VI/2025

Resumen: Ante las alarmante cifras de generación de residuos sólidos a nivel mundial y las preocupantes estadísticas de tratamiento que se les da a los mismos, se han planteado una amplia variedad de tecnologías de tratamiento de residuos sólidos. Dentro de ellas, la técnica de pirólisis representa una forma de tratamiento térmico que permite la valorización de los residuos tratados al generar biocombustibles de diferentes especificaciones que pueden comercializarse. Varios estudios se han enfocado en tipos de residuos específicos, llevando a los autores a tomar posturas con respecto a la aplicación de la técnica. Con base en esto, se elaboró una revisión de las posturas y enfoques de la aplicación de la técnica donde se determinó que los estudios publicados se pueden categorizar en una de tres siguientes posturas: (1) negativa, en donde se encuentran limitantes para su aplicación, (2) positiva parcial, en donde se visualiza la aplicación de la técnica para solamente tratar algunos tipos de residuos sólidos y en condiciones específicas, y (3) positiva total, que indica la posibilidad de abarcar múltiples tipos de residuos sólidos, llevando al desarrollo de biorefinerías. Cualquiera que sea la postura de los autores, se evidencia que el tratamiento con esta técnica genera la oportunidad de tratar residuos sólidos, por lo que con base en los estudios publicados, se determinó que el modelo de negocio que se utilice es determinante para llevar la técnica a una realidad aplicable.

Palabras clave: Biorefinerías, pirólisis, prefactibilidad, valorización de residuos sólidos.

Abstract: Given the alarming global figures on solid waste generation and the concerning statistics regarding how it is treated, a wide range of solid waste treatment technologies have been proposed. Among these, the pyrolysis technique represents a form of thermal treatment that enables the valorization of treated waste by generating biofuels of various specifications that can be commercialized. Several studies have focused on specific types of waste, leading the authors to take positions regarding the application of the technique. Based on this, a review was conducted on the positions and approaches regarding the application of the technique, which determined that the published studies can be categorized into one of the following three positions: (1) negative, where limitations for its application are identified, (2) partial positive, where the application of the technique is considered viable only for treating certain types of solid waste under specific conditions, and (3) fully positive, which suggests the potential to handle multiple types of solid waste, leading to development of biorefineries. Regardless of the authors' position, it is evident that treatment using this technique presents an opportunity for managing solid waste. Based on the published studies, it was determined that the business model adopted is decisive in making the technique a viable and applicable reality.

Keywords: Biorefinery, prefeasibility, pyrolysis, solid waste valorization.

INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos, su manejo y tratamiento son uno de los principales problemas con que la humanidad debe tratar en la actualidad. De acuerdo con Kaza *et al.* (2018), en el mundo se generan más de 2010 millones de toneladas métricas de residuos sólidos con más del 33% sin tratamiento y gestión que depende del desarrollo socioeconómico de la región. Latinoamérica es una región con baja tasa de generación de residuos sólidos, pero que contribuye con más de 231 millones de toneladas métricas anuales, de las cuales solamente el 30% son gestionados en zonas rurales (70% con descarte indiscriminado) y más del 50% son gestionados en vertederos o basureros (Kaza *et al.* 2018; Banco Mundial 2022). Esto ocasiona que se tenga problemas sanitarios y de cuidado ambiental, derivado de acumulaciones de residuos, lixiviados generados y emisiones gaseosas, que terminan por causar diferentes tipos de enfermedades, producción de olores o la generación de circunstancias que disminuyen la calidad de vida humana (Le Courtois 2012).

En Latinoamérica los principales tipos de residuos sólidos son: residuos alimenticios, cartones y papeles, y plásticos (Kaza *et al.* 2018; Banco Mundial 2022). Dentro de ellos, los plásticos suelen ser fuertemente criticados, llegan a una producción anual de más de 300 millones de toneladas métricas a nivel mundial (Ratnasari *et al.* 2017; Miandad *et al.* 2019; Núñez *et al.* 2019). Sin embargo, están hechos de hidrocarburos petroquímicos con aditivos como retardantes de llama, estabilizadores y oxidantes que dificultan su biodegradación (Gandidi *et al.* 2018). Por otro lado, los residuos alimenticios y celulósicos suelen ser menos criticados, pero generan considerables problemas de contaminación, asociados a la proliferación de plagas y emisiones gaseosas (Le Courtois 2012).

En medio de las posibilidades de tratamiento que puedan idearse, surge la técnica de pirólisis como una opción para convertir residuos sólidos en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Dicha técnica es una degradación térmica de los residuos a diferentes temperaturas (300-900 °C) y velocidades de calentamiento, que se tratan en reactores especializados en ausencia de oxígeno para valorizar diferentes tipos de residuos sólidos (Rehan *et al.* 2016). Sin embargo, las posturas y enfoques de estudio de dicha técnica son variadas y no coinciden.

Para contar con la información necesaria sobre las posturas de aplicar la técnica de pirólisis y con ello identificar el tratamiento de los residuos sólidos, es esencial contar con una descripción detallada de cada uno de los puntos de vista y hallazgos científicos publicados. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue el presentar una clasificación de las posturas encontradas junto con un análisis de cada una de ellas con su argumentación y enfoque.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la consecución del objetivo buscado, se partió de una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica relacionada con la problemática generada de residuos sólidos en el mundo y la aplicación de la reacción de pirólisis como técnica de tratamiento de los mismos. La búsqueda se realizó utilizando los motores de búsqueda Google Scholar y Research Gate, procesando publicaciones encontradas de los años 1995 al 2025, y empleando las palabras clave: pirólisis, residuos sólidos, valorización y potencial aplicación. Las publicaciones fueron depuradas inicialmente de acuerdo a la relevancia de lo presentado, que implicó principalmente el contar con una postura clara del autor respecto a la potencial aplicación de la técnica estudiada. Posteriormente, las publicaciones finales que se presentan y citan en este artículo, se seleccionaron considerando publicaciones actualizadas y los criterios de confiabilidad, relevancia, reputación, autoridad de los autores y pertinencia, que fueron evaluados de acuerdo con el criterio profesional de los investigadores del Centro de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala. Esto redujo a 16 publicaciones depuradas, que fueron la base para el análisis efectuado.

El análisis de la información recopilada se abordó mediante un enfoque holístico y referencial, organizando las posturas encontradas en categorías temáticas que facilitaron la comparación entre distintos enfoques y resultados. Esta categorización incluyó aspectos técnicos, ambientales, económicos y sociales asociados a la pirólisis y su implementación en contextos de baja infraestructura. Con esto, se identificaron similitudes, diferencias y vacíos en el conocimiento actual sobre el tema.

Las posturas teóricas y técnicas fueron reforzadas mediante la incorporación de resultados típicos obtenidos en estudios representativos del área, lo que permitió validar las categorías establecidas y construir la clasificación deseada. Esta estrategia metodológica facilitó la generación de conclusiones pertinentes sobre las diferentes posturas de la aplicación de la pirólisis a residuos sólidos de composición variada. En conjunto, el método empleado fortaleció la solidez argumentativa del estudio, proporcionando una base empírica para futuras aplicaciones e investigaciones en el campo.

RESULTADOS

Se procesaron 132 posibles publicaciones de acuerdo a sus características, llegando a 16 publicaciones relevantes y representativas de las posturas encontradas, que son los analizadas en el marco de este artículo. Se determinó que muchos autores han investigado con diferentes perspectivas la técnica de pirólisis, abarcando desde la parte ambiental, hasta los detalles fisicoquímicos y cinéticos de la reacción.

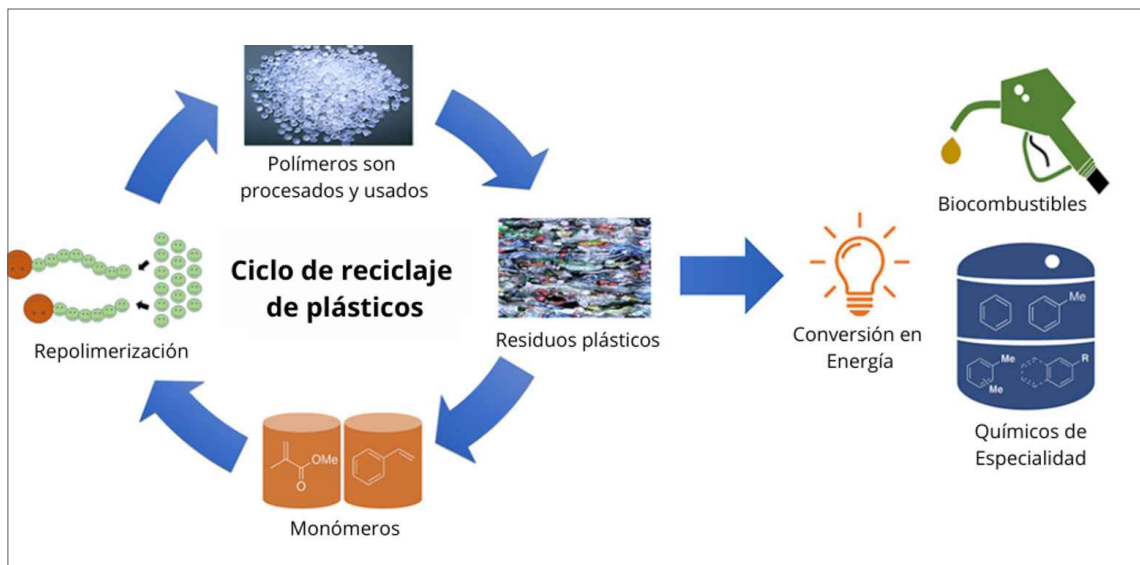


Figura 1. Proceso general de reciclaje químico de plásticos y la opción de tratamiento con pirólisis, generación de energía o producción de químicos especializados (basado en Baranski 2021).

Figure 1. General process of chemical recycling of plastics and the treatment options of pyrolysis, energy generation, or production of specialized chemicals (based on Baranski 2021).

Para cada autor, el enfoque del estudio obedece a una necesidad específica, pero se logró interpretar que en general los autores consultados tienen una de las siguientes tres posturas con respecto a la aplicación de la técnica: (1) corriente y autores que visualizan una viabilidad negativa de tratar residuos sólidos con esta técnica (con únicamente dos autores argumentando en esta línea), (2) postura que reporta una viabilidad parcial, es decir, que solamente entienden o visualizan el tratamiento aplicado a un tipo particular de residuos (con 12 autores que de forma directa o indirecta evidencian esta tendencia), y (3) las posturas que reportan el potencial de la técnica, como el punto de partida de una posible Biorefinería que abarca varios posibles tipos de residuos como base para la generación de biocombustibles y otros productos (con dos autores siendo los promotores de este tipo de argumentación).

Corriente con postura negativa. Baranski (2021) y Radhakrishnan *et al.* (2023) han reportado argumentos en contra de la técnica de pirólisis, que van desde razones energéticas y técnicas, hasta las estimaciones económicas efectuadas con diferentes tipos de metodologías. Las principales limitantes encontradas son:

- **Ambientales:** Mencionando que en investigaciones previas, se ha estudiado que los fuelóleos procedentes de la pirólisis de diferentes publicaciones producen mayores emisiones de escape que el diésel obtenido directamente del procesamiento de hidrocarburos tradicionales. Se reporta entonces una posible necesidad de regulaciones técnicas para utilizar los biocombustibles producidos, pero en muchos países o regiones, la elaboración de dichas regulaciones

carece de sustento o de expertos que promuevan su correcto uso, por lo que el riesgo ambiental es evidente.

- **Energéticas:** Los fuelóleos extraídos a altas temperaturas pueden producir mayores emisiones que los producidos con otras técnicas. Además, se reporta la utilización de fuentes energéticas para obtener productos con menos potencial energético que los materiales originalmente empleados, con lo que se argumenta que no hace sentido aplicar la técnica con un balance negativo energético.
- **Tecnológicas y económicas:** En este caso, Baranski (2021) y Radhakrishnan *et al.* (2023) indican que los métodos de conversión son relativamente nuevos, con lo que se necesitan más investigaciones o estudios para elaborar normas y guías que estandaricen las actividades de recuperación de energía con esta técnica. Por otro lado, existen algunos estudios preliminares, que muestran que el proceso de conversión en combustibles con pirólisis tiene una tasa negativa de consumo energético, lo cual en términos de rentabilidad puede llegar a ser adverso si no se encuentran los modelos de negocio adecuados.

A pesar de estas limitantes (Ratnasari *et al.* 2017; Miandad *et al.* 2019), es importante comprender que como sucede con cualquier técnica de procesamiento, la pirólisis no tiene una aplicación universal, sino que representa una posible línea de tratamiento para residuos mixtos, contaminados o no procesables por otros métodos (ver Fig. 1 para lógica central publicada del proceso con plásticos). Esto implica que la técnica funciona como una última opción de valorización de residuos,

cuyo tratamiento implica que ya no puede usarse las populares 3R (Prevenir residuos, reusar y reciclar). Y además, el tratamiento implica el rompimiento de enlaces químicos para formar combustibles o monómeros funcionales, lo que se traduce en una demanda energética considerable.

Corriente con postura positiva parcial. Antal Jr. *et al.* (1996), Demirbas (2004), Sun *et al.* (2014), Ionescu & Bulmău (2019) y Viltres & Alarcón (2022) han estudiado principalmente el aprovechamiento de residuos de tipo lignocelulósico o alimenticio, generando principalmente combustibles sólidos. Dichos autores buscaron describir, analizar y aplicar métodos analíticos para la estimación del poder calorífico de los productos sólidos generados por la pirólisis de estos materiales, determinando que el impacto de las propiedades de la biomasa o masa residual y las condiciones operativas de la pirólisis son determinantes en los combustibles producidos.

A pesar de esto y debido a la amplia gama de composiciones de dichos residuos, de acuerdo con Ionescu & Bulmău (2019), se ha publicado poco sobre la relación entre los tipos de residuos y el contenido energético de los carbones generados con pirólisis, con lo que dicho campo de investigación continúa en auge a nivel de laboratorio. Por otro lado, Ionescu & Bulmău (2019) lograron determinar el valor calorífico máximo (HHV: *Higher Heating Value*) de diferentes biomásas crudas, residuos plásticos y mezclas de biomasa-residuos plásticos y sus subproductos (biocarbón y carbón vegetal), comprobando que existe una correlación entre el HHV conseguido del carbón producido y el tipo de residuos procesado. Como se muestra en Cuadro 1, diferentes porcentajes elementales componen a cada uno de los residuos estudiados.

Los resultados experimentales de esta investigación (Ionescu & Bulmău (2019) reflejaron que el contenido de cenizas es la propiedad principal que influencia en el contenido energético

de los el biocarbón/carbón, debido a que esto representa una masa que no genera energía durante el proceso de combustión. El porcentaje de materia volátil es la segunda propiedad que influencia en el HHV (Ionescu & Bulmău 2019). Además, estos autores reportan valores desde 24,000kJ/kg hasta 36,000kJ/kg para el combustible sólido en dependencia del tipo de residuo tratado, con lo que es posible competir con otros combustibles sólidos tradicionales.

Por otro lado, analizando otro tipo de residuos, muchos autores han estudiado la aplicación de pirólisis en residuos plásticos (Serrano *et al.* 2012; Ratnasari *et al.* 2017; Gandidi *et al.* 2018; Miandad *et al.* 2019). En general, han establecido que la aplicación de esta técnica con este tipo de residuos genera combustibles sólidos y líquidos con poderes caloríficos por encima de otros materiales, incluso equiparándose al poder calorífico de derivados del petróleo. Este hecho se ha correlacionado con su composición elemental, generando interés por su alto potencial, alcanzado los niveles energéticos de la combustión de diésel o gasolina.

Dentro de las técnicas empleadas para el tratamiento de plásticos y/o polímeros, Serrano *et al.* (2012) reportan buenos rendimientos y poderes caloríficos sin el uso de catalizadores, pero Miandad *et al.* (2019) especifican que los mejores rendimientos se obtienen con procesos catalizados (ver Fig. 2 para resultados obtenidos con este tipo de materiales). Dentro de estos últimos, Ratnasari *et al.* (2017) publicaron que los catalizadores más utilizados son el ZSM-5, zeolita, zeolita Y, FCC y MCM-41. Además, establecieron que las reacciones catalíticas durante la pirólisis de residuos plásticos sobre catalizadores ácidos sólidos incluyen craqueo, oligomerización, ciclación, aromatización y reacciones de isomerización, que dan como resultado mejores propiedades de los combustibles obtenidos.

Cuadro 1. Composición de los residuos analizados por análisis proximal y elemental (basado en Ionescu & Bulmău 2019, p. 79).

Table 1. Composition of the residues based on proximate and elemental analysis (based on Ionescu & Bulmău 2019, p. 79).

Tipo de Muestra	Análisis Elemental [% m/m]						Análisis Proximal [% m/m]			
	Carbono	Hidrógeno	Nitrógeno	Azufre	Oxígeno	Total	Material Volátil	Carbono Fijado	Cenizas	Total
Períodicos	47.00	7.00	2.00	1.00	43.00	100.00	88.4	3.5	8.1	100.0
Cartón	48.00	8.00	2.00	1.00	41.00	100.00	87.5	6.6	5.9	100.0
Residuos de madera	49.52	5.81	0.31	0.02	44.34	100.00	84.9	15.0	0.1	100.0
Polipropileno	85.50	12.50	1.20	0.10	0.70	100.00	99.1	0.3	0.6	100.0
Polietileno de alta densidad	84.70	14.47	0.11	0.12	0.60	100.00	99.7	0.1	0.2	100.0

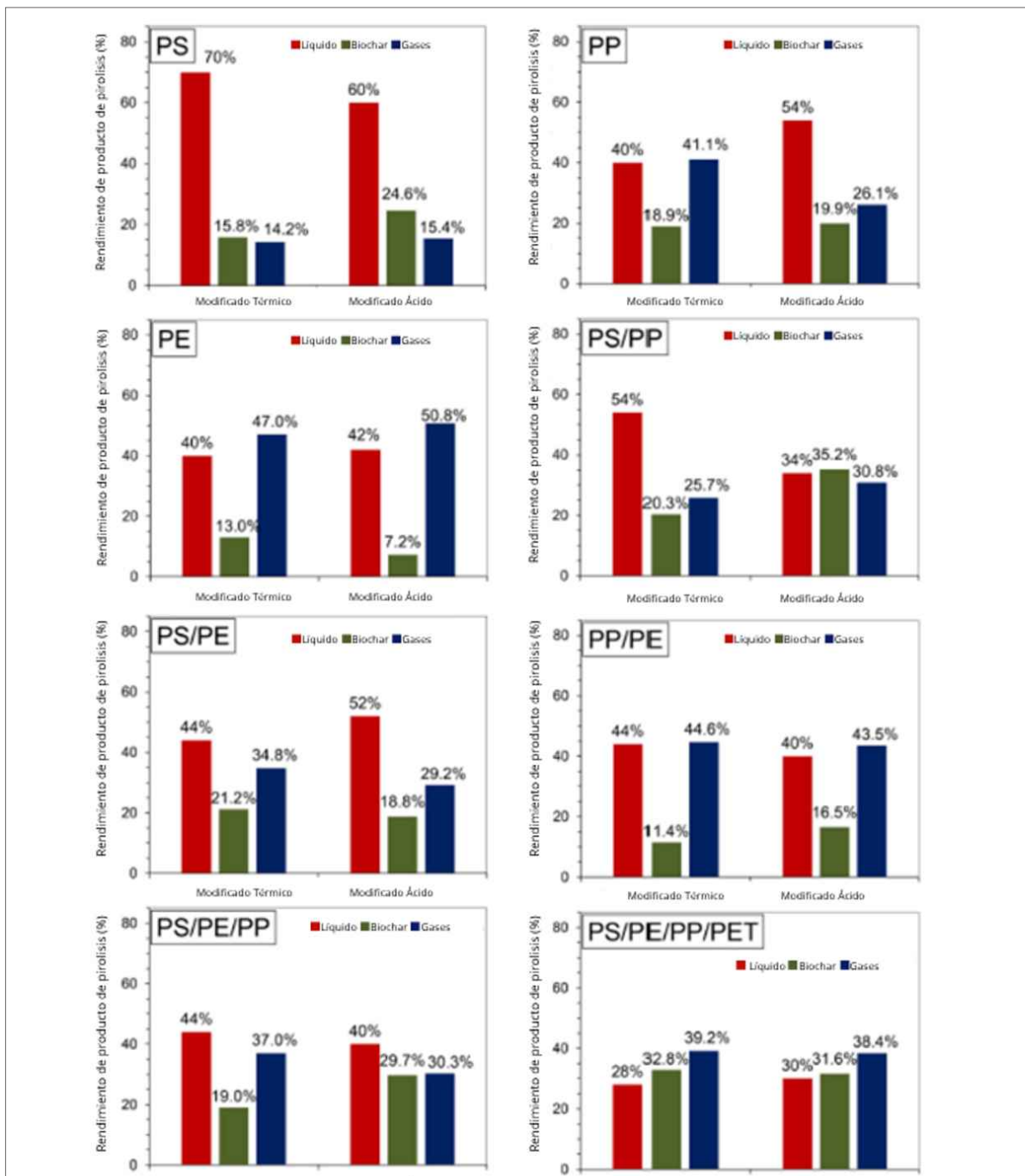


Figura 2. Rendimientos de combustibles líquido, sólido y gaseoso para polímeros puros y combinaciones de Poliestireno-PS, Polipropileno-PP, Polietileno-PE y Polietileno tereftalato-PET con tratamiento térmico y ácido (basado en Miandad et al. 2019, p. 5).

Figure 2. Yields of liquid, solid and gaseous fuels from pure polymers and combinations of Polystyrene-PS, Polypropylene-PP, Polyethylene-PE and Polyethylene terephthalate-PET with thermal and acid treatments (based on Miandad et al. 2019, p. 5).

Corriente con postura positiva total. Ratnasari et al. (2017) y Miandad et al. (2019) sostienen un enfoque con alto potencial para la pirólisis, y han generado publicaciones donde se proponen biorrefinerías basadas en dicha técnica. Dichas publicaciones indican que la técnica tiene un gran potencial para convertir residuos como el plástico y biomasa, en energía

y otros productos valiosos, para lograr el máximo económico y beneficios medioambientales.

En el estudio efectuado por Miandad et al. (2019), se llevó a cabo la pirólisis de diferentes tipos de residuos plásticos (poliestireno-PS, polietileno-PE, polipropileno-PP y Poliestileno tereftalato-PET) solos o mezclados en diferentes

proporciones y en presencia de catalizadores de zeolita natural (NZ) modificados. En general, la pirólisis catalítica de PS produjo un mayor aceite líquido (70 y 60%) que el PP (40 y 54%) y el PE (40 y 42%), mostrando una gama amplia de resultados en función de los catalizadores y tipo de plástico tratado. Pero lo más alentador de esta publicación es que el aceite líquido tiene un rango de valor calorífico máximo (HHV) de 41,7-44,2 MJ/kg, cercano al diésel convencional (ver Cuadro 2). Por lo tanto, tiene el potencial de ser utilizado como fuente alternativa de energía y como combustible para el transporte después de refinar o mezclar con combustibles convencionales. De esto y de los anteriores estudios con combustibles sólidos con alto poder calorífico, se sustentan Miandad *et al.* (2019) para formular su propuesta sobre biorefinerías basadas en la técnica de pirólisis.

A pesar de que, existe esta exploración práctica y teórica de la técnica, y a videos informales de casos que narran modelos de negocio exitosos, no se han encontrado publicaciones dedicadas a generar herramientas que permitan el análisis de los tipos de desechos tratados, su correlación con los productos que generan, el proceso que necesitan para efectuarse y el potencial económico que presentan. Es por esto que algunos autores mencionan que sería de mucha utilidad el hacer estudios para generar herramientas de evaluación de proyectos, diseño de plantas industriales y modelaje de reacciones químicas, que permitan esclarecer el potencial de la aplicación de la técnica desde el punto de vista técnico y económico. Por otro lado, algunos de los autores (Ionescu & Bulmău 2019) consultados mencionan que la influencia del contexto y marco legal son fundamentales para aplicar la técnica.

Cuadro 2. Valor calorífico máximo (HHV) y valor calorífico catalizado del aceite de pirólisis de diversos polímeros puros o combinados (basado en Miandad *et al.* 2019, p. 14). [Poliestireno-PS, Polipropileno-PP, Polietileno-PE y Polietilen tereftalato-PET]

Table 2. Higher heating value (HHV) and catalyzed calorific value of pyrolysis oil from various pure or combined polymers (basado on Miandad *et al.* 2019, p. 14). [Polystyrene-PS, Polypropylene-PP, Polyethylene-PE and Polyethylene terephthalate-PET]

Plásticos usados	Valor calorífico catalizado(MJ/kg)	Valor calorífico Máximo (MJ/kg)
PS	41.7	42.1
PP	43.4	42.9
PE	42.9	43.5
PS/PP	42.5	42.9
PS/PE	42.6	43.7
PP/PE	44.1	43.7
PS/PE/PP	42.4	44.2
PS/PE/PP/PET	41.9	43.7
Gasolina comercial	-	44 a 46
Diésel comercial	-	42 a 46

DISCUSIÓN

Dentro de las posturas que se encontraron durante la revisión de literatura, se encuentra una diversidad amplia de argumentos para cada postura encontrada, que van desde consumos energéticos y costos asociados a la técnica, hasta cinéticas de reacción, posibilidades de tratar múltiples residuos y técnicas de escalamiento. Pero en ninguno de los casos se ha encontrado estudios que abarquen la totalidad del proceso, sino que se presentan resultados parciales de alguna etapa o estudio específico que obedece a un vacío de conocimiento que se buscó solucionar (ver Fig. 2 y Cuadro 2). Hasta los autores como Ratnasari *et al.* (2017) y Miandad *et al.* (2019) no presentan el enfoque completo del proceso, a pesar de argumentar el alto potencial de la técnica.

Con la variedad de estudios que se categorizan en las tres posturas mencionadas, pueden encontrarse una gama amplia de residuos investigados con respecto a la posible aplicación de la técnica de pirólisis para valorizarlos (ver Cuadro 2). La mayoría de los estudios determinan que técnicamente el tratar los residuos con esta técnica, representa una forma viable para reducir la contaminación que los mismos pueden introducir al descartarse indiscriminadamente. El consenso general es que, el aplicar esta técnica genera la posibilidad de minimizar el impacto ambiental y de salud adverso que los mismos pueden tener, a la vez que se producen biocombustibles que pueden comercializarse como parte del tratamiento. Esto representa un indicio claro de una prefactibilidad técnica de aplicar este tipo de reacciones en el tratamiento de cada uno de dichos residuos estudiados.

Tomando en cuenta el alto potencial mencionado por Miandad *et al.* (2019) con las variables analizadas y los argumentos en contra que Baranski (2021) y Radhakrishnan *et al.* (2023) mencionan, se concluye de manera deductiva que la factibilidad de aplicar la técnica estudiada depende de múltiples factores, que se pueden categorizar en factores técnicos y económicos. De los 16 autores citados el 69% identifica una prefactibilidad técnica positiva y el 31% no identifica prefactibilidad positiva o negativa en su análisis de forma directa. Por el otro lado, solamente Ratnasari *et al.* (2017) y Miandad *et al.* (2019) analizaron la parte económica levemente, pero dado que en esta parte la rentabilidad e indicadores financieros son clave en la determinación de viabilidad, se deduce que el modelo de negocio que se lleve al mercado y las regulaciones medio ambientales del lugar donde busque aplicarse serán determinantes.

Otra conclusión obtenida durante el análisis es que para poder analizar prefactibilidades de modelos de negocio que apliquen la técnica de pirólisis, se necesita contar con herramientas específicas. Por un lado se encuentran las herramientas de tipo técnico, que permiten predecir los resultados del tratamiento en función del tipo de residuo como las mostradas por Ionescu

& Bulmău (2019), el tener modelos válidos de escalamiento y aplicaciones que permitan verificar la capacidad de llevar el tratamiento de cada residuo. Mientras que por otro lado, se tiene las herramientas de tipo económico que permite contar con modelos de evaluación económica de proyectos, en función de la escala y las estrategias de ventas. Estos campos de estudio, permiten la evaluación completa del proceso de tratamiento y dan la información necesaria para incentivar la utilización y aceptación de esta técnica por parte los grupos involucrados, incluyendo generadores de residuos sólidos, inversionistas y potenciales clientes de los subproductos generados. Estas líneas de investigación, sin duda son prometedoras como futuras líneas de investigación aplicada para el tratamiento y la valorización de residuos sólidos, además de las otras posibilidades de tratamiento que se han investigado para residuos contaminados o para plásticos que puedan ser complementarias a la técnica de pirólisis (ver Fig. 1).

Finalmente, es importante destacar a partir de lo analizado de los autores citados, que para cumplir con las nuevas exigencias ambientales y realizar procedimientos que involucren economía circular, la pirólisis es una de tantas transformaciones o técnicas que sumadas, tienen el potencial de aportar cambios significativos para el adecuado manejo de residuos sólidos, que lleven a la mejora de la compleja situación de tratamiento que se tiene a nivel mundial y que es uno de los grandes desafíos de nuestra era. Por esta razón, es recomendable continuar con estudios técnicos, económicos y de posible impacto social y ambiental, que se complementen y generen la información necesaria para poder tomar decisiones informadas sobre la aplicación de la técnica estudiada y otras técnicas de tratamiento.

REFERENCIAS

- Antal Jr., M. J., Croiset, E., Dai, X., DeAlmeida, C., Mok, W. S.-L. & Norberg, N. (1996). High-yield biomass charcoal. *Energy & Fuels* 10(3): 652-658. <https://doi.org/10.1021/ef9501859>
- Banco Mundial. (2022). *More growth, less garbage*. World Bank Group. [<https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/publication/more-growth-less-garbage>]. Consultado: 3 de junio 2025.
- Baranski, A. (2021). *Plastic pyrolysis pros and cons: Converting plastics into energy*. Profolus. [<https://www.profolus.com/topics/plastic-pyrolysis-pros-and-cons-converting-plastics-into-energy/>]. Consultado: 3 de junio 2025.
- Demirbas A. (2004). Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 72(2): 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.003>
- Gandidi, I. M., Susila, M. D., Mustofa, A. & Pambudi, N. A. (2018). Thermal-catalytic cracking of real MSW into bio-crude oil. *Journal of the Energy Institute* 91: 304-310. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.11.005>
- Ionescu, G., & Bulmău, C. (2019). Estimation of energy potential for solid pyrolysis by-products using analytical methods. In: *Analytical pyrolysis*, P. Kusch (ed.), IntechOpen; pp. 71-84. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80861>
- Kaza, S., Yao, L., C.; Bhada-Tata, P. & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications. [<https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>]. Consultado: 3 de junio 2025.
- Le Courtois, A. (2012). Municipal solid waste: turning a problem into resource. *Private Sector & Development* 15: 1-28.
- Miandad, R., Rehan, M., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Khan, H., Ismail, I. M. I., Dhavamani, J., Gardy, J., Hassanpour, A. & Nizami, A.-S. (2019). Catalytic pyrolysis of plastic waste: Moving toward pyrolysis based biorefineries. *Frontiers in Energy Research* 7: 27. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00027>
- Núñez, L., Zambrano, G. & Rossi, C. (2019). *Plásticos biodegradables: terminología y normativa como referencia en el ámbito científico y legislativo*. Centro de Procesos Industriales, Universidad del Valle de Guatemala.
- Radhakrishnan, K., Senthil Kumar, P., Rangasamy, G., Praveen Perumal, L., Sanaulla, S., Nilavendhan, S., Manivasagan, V. & Saranya, K. (2023). A critical review on pyrolysis method as sustainable conversion of waste plastics into fuels. *Fuel* 337: 126890. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126890>
- Ratnasari, D. K., Nahil, M. A. & Williams, P. T. (2017). Catalytic pyrolysis of waste plastics using staged catalysis for production of gasoline range hydrocarbon oils. *Journal of Analytic and Applied Pyrolysis* 124: 631-637. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.12.027>
- Rehan, M., Nizami, A. S., Shahzad, K., Ouda, O. K. M., Ismail, I. M. I., Almeelbi, T., et al. (2016). Pyrolytic liquid fuel: a source of renewable energy in Makkah. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 38(17): 2598-2603. <http://dx.doi.org/10.1080/15567036.2016.1153753>
- Serrano, D. P., Aguado, J. & Escola, J. M. (2012). Developing advanced catalysts for the conversion of polyolefinic waste plastics into fuels and chemicals. *ACS Catalysis* 2(9): 1924-1941. <https://doi.org/10.1021/cs3003403>
- Sun, Y., Gao, B., Yao, Y., Fang, J., Zhang, M. & Zhou, Y. (2014). Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. *Chemical Engineering Journal* 240: 574-578. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.10.081>
- Viltres, R. & Alarcón, A. (2022). Caracterización química del bio-aceite de pirólisis rápida de biomasa. *Revista Cubana de Química* 34(1): 131-158.