VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Estudio experimental de la valorización de neumáticos fuera de uso mediante pirólisis

Experimental study of the valorization of end-of-life tires through pyrolysis

Dulce María Mota Godínez, Alexia Sabine Smith Ortega, Juan Antonio Villanueva Rangel, Victoria Paola Cabrera Madera, José Manuel Riesco Avila.
Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca.
Carretera Salamanca - Valle de Santiago, km 3.5 + 1.8, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Guanajuato, C.P. 36787, México.
dm.motagodinez@ugto.mx, as.smithortega@ugto.mx, ja.villanuevarangel@ugto.mx, vp.cabrera@ugto.mx, riesco@ugto.mx

Resumen

Se presenta la caracterización del proceso de pirólisis de neumáticos fuera de uso. Se analizaron neumáticos de automóvil clasificados como de verano. El proceso se desarrolló en un reactor de lecho fijo semicontinuo, evaluando el efecto de la temperatura de pirólisis y del tamaño de partícula sobre la distribución de los productos obtenidos: aceite pirolítico, carbón negro, gas y metal. En términos generales, el aumento de la temperatura favorece la descomposición térmica del material, incrementa la formación de productos volátiles y modifica la distribución entre aceite, gas y carbón. Mediante un diseño de experimentos y la metodología de superficie de respuesta, se identificó que la condición óptima para maximizar el producto líquido corresponde a una temperatura de 570°C y un tamaño de partícula de 3 divisiones, con un rendimiento ajustado de aceite pirolítico de 42.45% y una deseabilidad compuesta igual a 1. El análisis de varianza evidenció que la temperatura de pirólisis es la variable operativa de mayor influencia en el proceso. Para el producto sólido, la temperatura y el tamaño de partícula influyeron de manera significativa; para el aceite pirolítico, el tamaño de partícula presentó una contribución menor; y, en el caso del gas, la temperatura fue el único factor con efecto estadísticamente significativo.

Palabras clave: pirólisis; neumáticos fuera de uso.

Introducción

Los neumáticos fuera de uso (NFU) representan una problemática ambiental y social significativa debido a su elevada generación, su lenta degradación, su compleja composición físico-química y su manejo inadecuado. Su composición, rica en caucho natural y sintético, negro de humo, aditivos químicos y acero, dificulta su disposición final segura, ya que estos materiales pueden permanecer en el ambiente durante décadas. Cuando no se gestionan correctamente, los neumáticos abandonados se convierten en focos de contaminación del suelo, del agua y del aire, además de favorecer la proliferación de enfermedades y aumentar el riesgo de incendios de difícil control (SEMARTAT, 2020). Ante este escenario, resulta indispensable el desarrollo de tecnologías sostenibles que permitan su valorización y aprovechamiento energético, reduciendo su impacto ambiental y promoviendo una economía circular.

En este contexto, la pirólisis surge como una alternativa tecnológica viable para el tratamiento de NFU, al permitir su valorización mediante la descomposición térmica en atmósfera inerte (Costa et al., 2022). Este proceso posibilita la recuperación de productos de interés como aceites pirolíticos, gases combustibles y sólidos carbonosos, contribuyendo a la reducción del volumen de residuos y al aprovechamiento energético y material, en concordancia con los principios de la economía circular y la sostenibilidad ambiental.

En la pirólisis de NFU, los rendimientos promedio suelen distribuirse entre 35–45% de líquidos (aceite pirolítico), 35–40% de sólidos (carbón negro) y 10–30% de gases, dependiendo de la composición de la materia prima, la temperatura y el tipo de reactor (Maganinho et al., 2025). Estos valores son consistentes con estudios realizados en México y en otros países, lo que confirma la viabilidad del proceso como estrategia de valorización de residuos.

Metodología

En este trabajo se utilizaron NFU de automóvil, clasificados comercialmente como de verano. El NFU se dividió en secciones de aproximadamente 1 kg cada una. Estas secciones, a su vez, se dividieron en 3, 4, 6, 8 y 9 partes, de acuerdo con el diseño de experimentos utilizado.

Se realizó un diseño de experimentos de superficie de respuesta (RSM, por sus siglas en inglés), que constituye un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para modelar y analizar problemas en los que una variable de respuesta depende de varios factores, con el propósito de optimizar dicha respuesta. Esta metodología permite aproximar el comportamiento del sistema mediante modelos polinomiales, generalmente de segundo orden, capaces de describir efectos de interacción y de curvatura presentes en procesos no lineales (Montgomery, 1997).

Entre los diferentes diseños disponibles en RSM, se seleccionó el Diseño Central Compuesto (DCC), que permite optimizar el proceso y construir modelos matemáticos cuadráticos con un número eficiente de experimentos, evaluando los efectos lineales, de interacción y de curvatura de las variables. Este diseño se construye a partir de un diseño factorial a dos niveles, al que se incorporan puntos axiales (o de estrella) y puntos centrales. Los puntos factoriales permiten estimar los efectos lineales e interacciones entre factores, mientras que los puntos axiales permiten capturar la curvatura del sistema. Por su parte, los puntos centrales proporcionan una estimación del error experimental y permiten evaluar la reproducibilidad de los datos (STATGRAPHICS, 2006). Los puntos axiales se ubican a una distancia de ±α respecto al centro del diseño, lo que permite explorar regiones fuera del espacio factorial original; en este caso, se utilizó un valor de α = 1.41421, correspondiente a un diseño rotacional. Asimismo, al variar cada factor, los demás se mantienen en sus niveles centrales, lo que garantiza una exploración adecuada del espacio experimental. En la Tabla 1 se muestra el diseño experimental, que consideró dos factores: la temperatura [°C] y el tamaño de partícula [No. de partes o divisiones], con un total de 13 corridas experimentales, incluyendo 4 puntos factoriales, 4 puntos axiales y 5 puntos centrales. La inclusión de puntos centrales permite estimar el error experimental y evaluar la reproducibilidad del proceso.

***Tabla 1**. Diseño de experimentos central compuesto (DCC).*

No. de prueba	Temperatura [°C]	Tamaño de partícula [No. de partes]
1	572	8
2	500	6
3	500	6
4	428	4
5	400	6
6	500	6
7	500	6
8	572	4
9	500	3
10	600	6
11	500	6
12	500	9
13	428	8

Las fracciones de aceite pirolítico, carbón negro y metal se estimaron en función de sus respectivas masas. La masa de la fase gaseosa se determinó a partir del balance de masa como la diferencia entre la masa total de la materia prima, m_{tot}, y la suma de las masas de la fase líquida, m_l, la fase sólida, m_s, y la de metal, m_m:

$$m_g = m_{tot} - (m_l + m_s + m_m)$$

Los rendimientos de las fracciones de los productos de la pirólisis se calcularon utilizando la siguiente ecuación:

$$Producto\ pirolítico\ (\%wt.) = \frac{m_{producto}}{m_{tot}} \times 100$$

Reactor

El proceso de pirólisis se realizó en un reactor de lecho fijo semicontinuo, que consiste en un contenedor de acero inoxidable térmicamente aislado. El calentamiento del reactor se realiza mediante una resistencia eléctrica de 4,5 kW, instrumentada con un relé de estado sólido (SSR, por sus siglas en inglés), dos termopares tipo K y un controlador proporcional-integrador-derivativo (PID, por sus siglas en inglés) para controlar la velocidad de calentamiento con una precisión de ±0,25 °C/min y la temperatura de prueba con una precisión de ±1,0 °C.

Una vez introducidos los NFU en el reactor, se sella herméticamente y se inicia el calentamiento. Conforme aumenta la temperatura del reactor, el aire contenido en él se desaloja, lo que genera una atmósfera inerte. Cuando se alcanzan las temperaturas de evaporación de los residuos de neumáticos y en ausencia de oxígeno, se produce la pirólisis. Los gases generados se conducen a una unidad de condensación. En la Figura 1 se muestra un diagrama del reactor.

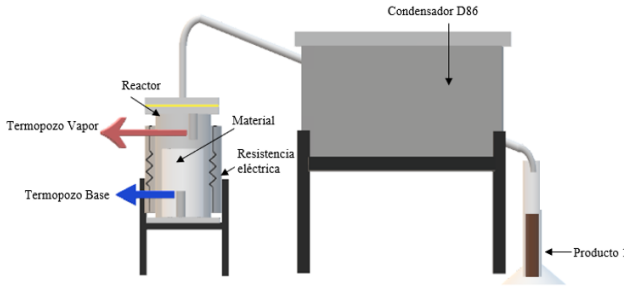


Figura 1. Reactor de lecho fijo semicontinuo.

Resultados

Carbón negro

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis de varianza del rendimiento del carbón negro. El análisis mostró que el modelo de superficie de respuesta fue estadísticamente significativo ($F = 18.28$, $p = 0.001$), lo que indica que la temperatura de pirólisis y el tamaño de partícula influyen de manera significativa en el porcentaje de producto sólido obtenido. La temperatura es el factor con mayor influencia sobre el rendimiento de sólido ($p < 0.05$); mientras que, dentro del intervalo estudiado, variar el tamaño de partícula por sí solo no modifica significativamente la producción de carbón ($p > 0.05$).

La temperatura, como factor más influyente en la producción de carbón, coincide con el comportamiento típico de los procesos de pirólisis. A medida que aumenta la temperatura, se favorecen las reacciones de descomposición térmica y la formación de productos volátiles, lo que reduce la fracción sólida remanente (Williams, 2013 y Gao et al., 2022). La significancia del término cuadrático de la temperatura indica, además, que esta relación no es estrictamente lineal en el intervalo estudiado. Por otra parte, el tamaño de partícula no mostró un efecto lineal significativo, aunque su interacción con la temperatura sí resultó significativa, lo que sugiere que los fenómenos de transferencia de calor dentro de las partículas pueden modificar la respuesta del sistema en función de las condiciones de operación.

El diagrama de Pareto de efectos estandarizados (Figura 2) confirma que la temperatura fue el factor con mayor influencia sobre el rendimiento del carbón, seguida del término cuadrático de la temperatura y de la interacción entre la temperatura y el tamaño de partícula. Los tres efectos superaron el valor crítico de referencia (2.365), por lo que fueron considerados estadísticamente significativos al 95% de confianza. En contraste, los efectos lineal y cuadrático del tamaño de partícula no resultaron significativos. Estos resultados indican que la temperatura es la variable operativa predominante en la producción de carbón negro, mientras

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

que el tamaño de partícula cobra relevancia únicamente cuando interactúa con la temperatura. La significancia del término cuadrático de la temperatura evidencia, además, un comportamiento no lineal de la respuesta, lo que sugiere la existencia de regiones de operación en las que pequeñas variaciones de temperatura producen cambios importantes en el rendimiento del sólido.

***Tabla 2**. Análisis de varianza del carbón negro.*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	1282.61	256.522	18.28	0.001
Lineal	2	814.86	407.431	29.04	0.000
Temperatura	1	772.47	772.473	55.06	0.000
Tamaño de partícula	1	42.39	42.389	3.02	0.126
Cuadrado	2	375.91	187.955	13.40	0.004
Temperatura*Temperatura	1	310.11	310.109	22.10	0.002
Tamaño de Partícula*Tamaño de Partícula	1	28.87	28.872	2.06	0.195
Interacción de 2 factores	1	91.84	91.836	6.55	0.038
Temperatura*Tamaño de Partícula	1	91.84	91.836	6.55	0.038
Error	7	98.22	14.031		
Falta de ajuste	3	83.10	27.699	7.33	0.042
Error puro	4	15.12	3.779		
Total	12	1380.82			

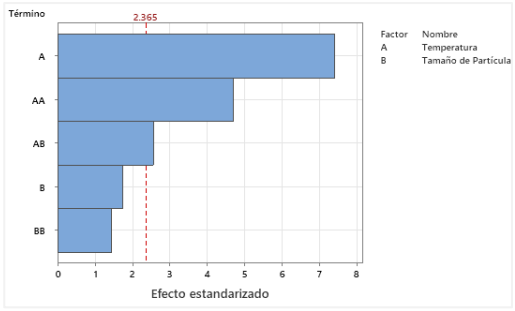


Figura 2. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados (la respuesta es Producto Sólido [%], α = 0.05).

La gráfica de contorno (Figura 3) se observan los mayores rendimientos (>70 %) a temperaturas cercanas a 400–450 °C y con tamaños de partícula grandes (3–5 divisiones). Conforme la temperatura aumentó hasta 600 °C, el rendimiento de sólido disminuyó progresivamente debido al incremento de las reacciones de degradación térmica y a la mayor formación de productos volátiles. Por otro lado, el tamaño de partícula presentó un efecto menos pronunciado, en concordancia con los resultados del ANOVA, en el que su efecto lineal no resultó significativo. Sin embargo, la curvatura de las líneas de contorno evidencia una interacción significativa entre la temperatura y el tamaño de partícula, lo que indica que el efecto del tamaño de partícula depende de la temperatura de operación. Asimismo, la curvatura observada en la superficie confirma la significancia del término cuadrático de la temperatura, lo que sugiere un comportamiento no lineal del rendimiento del producto sólido en el intervalo experimental estudiado.

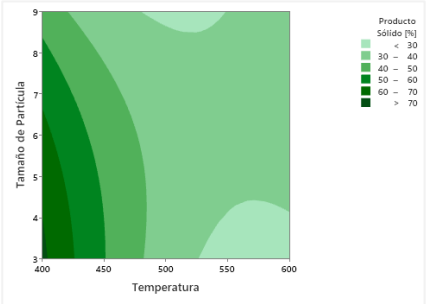


Figura 3. Gráfica de contorno del producto sólido [%] en función del tamaño de partícula y de la temperatura.

Aceite pirolítico

En la Tabla 3 se presentan los resultados del análisis de varianza del rendimiento del aceite pirolítico. Este análisis muestra una tendencia similar a la observada en el producto sólido. La temperatura fue el factor más influyente en la respuesta, mientras que el tamaño de partícula presentó una contribución menor. La interacción entre temperatura y tamaño de partícula presentó un valor de p = 0.050, ubicándose en el límite del nivel de significancia establecido (α = 0.05). Este resultado sugiere que el efecto del tamaño de partícula sobre la producción de líquido depende parcialmente de la temperatura de operación, aunque dicha dependencia es menos pronunciada que la observada en el producto sólido. Desde el punto de vista físico, este comportamiento puede atribuirse a que la formación de líquidos está dominada por las reacciones de volatilización y condensación inducidas por la temperatura, lo que reduce la influencia relativa del tamaño de partícula (Williams, 2013, Laresgoiti et al.,2004, Quek y Balasubramanian, 2013).

***Tabla 3**. Análisis de varianza del aceite pirolítico.*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	624.773	124.955	14.97	0.001
Lineal	2	341.778	170.889	20.48	0.001
Temperatura	1	315.297	315.297	37.78	0.000
Tamaño de partícula	1	26.481	26.481	3.17	0.118
Cuadrado	2	236.216	118.108	14.15	0.003
Temperatura*Temperatura	1	223.104	223.104	26.73	0.001
Tamaño de Partícula*Tamaño de Partícula	1	1.783	1.783	0.21	0.658
Interacción de 2 factores	1	46.780	46.780	5.61	0.050
Temperatura*Tamaño de Partícula	1	46.780	46.780	5.61	0.050
Error	7	58.419	8.346		
Falta de ajuste	3	55.415	18.472	24.59	0.005
Error puro	4	3.004	0.751		
Total	12	683.192			

En la Figura 4 se presenta el diagrama de Pareto de la respuesta del producto líquido. En este diagrama se confirma que la temperatura fue el factor de mayor influencia sobre el rendimiento del aceite pirolítico, con el mayor efecto estandarizado. Este resultado indica que la formación de la fracción líquida estuvo controlada principalmente por las condiciones térmicas del proceso. Esto es totalmente consistente con la pirólisis de neumáticos, ya que la generación de aceite pirolítico depende principalmente de la ruptura térmica de las cadenas poliméricas, la volatilización de compuestos orgánicos y la formación y condensación de vapores (Williams, 2013, Han et al., 20123). Por ello, la temperatura suele controlar la mayor parte de la variación observada en el rendimiento líquido. Por otro lado, la interacción entre la temperatura y el tamaño de partícula tuvo una influencia más marcada en el producto sólido que en el líquido. Esto sugiere que los fenómenos de transferencia de calor asociados al tamaño de partícula afectan principalmente la cantidad de residuo carbonoso remanente, mientras que la formación de líquidos está gobernada en mayor medida por las condiciones térmicas del proceso y se asocia a cambios en los mecanismos de descomposición térmica y de craqueo secundario.

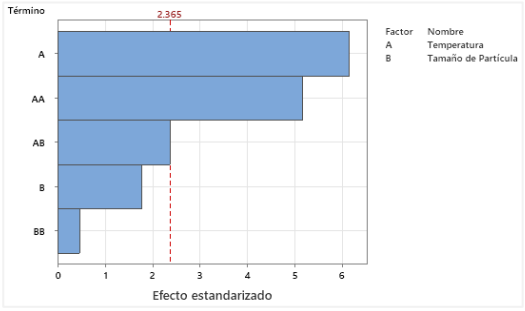


Figura 4. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados (la respuesta es Producto Líquido [%], α = 0.05).

La gráfica de contorno de la Figura 5 muestra que la temperatura fue el factor de mayor influencia en la respuesta, con un incremento progresivo del rendimiento a medida que aumentó la temperatura de pirólisis de 400 a 600 °C. Los mayores porcentajes de producto líquido (> 40%) se observaron en la región comprendida entre aproximadamente 500 y 575 °C, mientras que los menores rendimientos se registraron a temperaturas cercanas a 400 °C. La curvatura observada en las líneas de contorno confirma la naturaleza no lineal de la respuesta y coincide con la significancia del término cuadrático de la temperatura obtenida en el análisis de varianza. Por otra parte, el tamaño de partícula mostró una influencia menor sobre el rendimiento líquido, aunque se observó una ligera tendencia a mayores rendimientos al emplear partículas más pequeñas (9 divisiones). La inclinación de las líneas de contorno sugiere, además, una interacción moderada entre la temperatura y el tamaño de partícula, en concordancia con el valor límite de significancia obtenido para dicho término en el modelo estadístico.

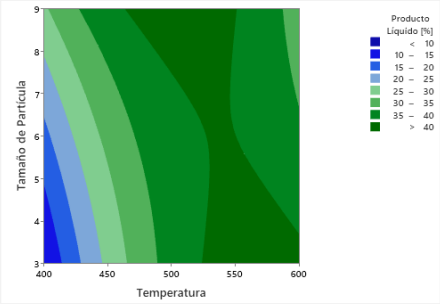


Figura 5. Gráfica de contorno del producto líquido [%] en función del tamaño de partícula y de la temperatura.

Gas pirolítico

El análisis de varianza del rendimiento del producto gaseoso (Tabla 4) mostró que la temperatura fue el único factor con efecto estadísticamente significativo sobre la respuesta ($p < 0.05$), mientras que el tamaño de partícula no presentó efectos estadísticamente significativos. Asimismo, los términos cuadráticos y la interacción entre temperatura y tamaño de partícula resultaron no significativos ($p > 0.05$), lo que indica la ausencia de curvatura e interacción dentro del intervalo experimental evaluado. Estos resultados sugieren que la formación de gases está gobernada principalmente por la temperatura de pirólisis y que su comportamiento puede describirse mediante una tendencia aproximadamente lineal. Desde el punto de vista físico, este comportamiento se atribuye a que la generación de gases depende principalmente de las reacciones de craqueo térmico de los compuestos volátiles, procesos que están controlados fundamentalmente por la temperatura y presentan menor sensibilidad a las variaciones del tamaño de partícula (Williams, 2013, Han et al., 20123).

***Tabla 4**. Análisis de varianza del gas pirolítico.*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	84.434	16.8868	5.22	0.026
Lineal	2	65.200	32.5998	10.07	0.009
Temperatura	1	64.691	64.6905	19.99	0.003
Tamaño de partícula	1	0.509	0.5091	0.16	0.703
Cuadrado	2	8.909	4.4543	1.38	0.313
Temperatura*Temperatura	1	0.022	0.0219	0.01	0.937
Tamaño de Partícula*Tamaño de Partícula	1	8.555	8.5552	2.64	0.148
Interacción de 2 factores	1	10.326	10.3259	3.19	0.117
Temperatura*Tamaño de Partícula	1	10.326	10.3259	3.19	0.117
Error	7	22.653	3.2362		
Falta de ajuste	3	11.411	3.8035	1.35	0.376
Error puro	4	11.243	2.8107		
Total	5	84.434	16.8868	5.22	0.026

La producción de gases está controlada principalmente por la temperatura de pirólisis, mientras que el tamaño de partícula y los efectos de segundo orden no ejercen una influencia estadísticamente significativa dentro del intervalo experimental estudiado.

El diagrama de Pareto (Figura 6) del rendimiento del producto gaseoso mostró que únicamente la temperatura superó el valor crítico de referencia correspondiente a α = 0.05. Los efectos asociados al tamaño de partícula, los términos cuadráticos y la interacción entre factores permanecieron por debajo del umbral de significancia. Estos resultados coinciden con el análisis de varianza y confirman que la temperatura es la variable dominante en la formación de gases durante la pirólisis. La ausencia de efectos cuadráticos significativos sugiere que la respuesta presenta un comportamiento aproximadamente lineal en el intervalo de 400-600 °C, mientras que la falta de interacción indica que el efecto de la temperatura es similar para todos los tamaños de partícula evaluados.

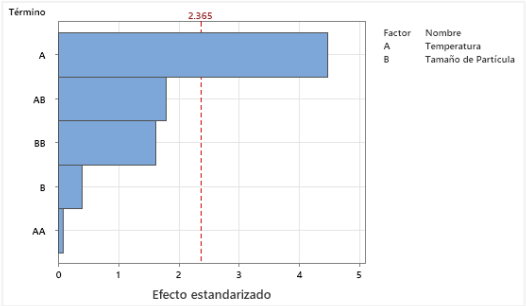


Figura 6. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados (la respuesta es Producto Gaseoso [%], α = 0.05).

La gráfica de contorno presentada en la Figura 7, relativa al rendimiento gaseoso, mostró que la temperatura fue la variable predominante en la respuesta, observándose un incremento progresivo del porcentaje de gas a medida que aumentó la temperatura de pirólisis de 400 a 600 °C. Los mayores rendimientos (>17.5%) se localizaron en la región de altas temperaturas (cerca de los 600 °C), mientras que los menores valores (<5%) se registraron alrededor de 400 ~ 425 °C. Las líneas de contorno presentaron una distribución relativamente uniforme, sin deformaciones pronunciadas, lo que indica la ausencia de efectos de interacción o de curvatura significativos. Estos resultados concuerdan con el análisis de varianza y el diagrama de Pareto, que identificaron la temperatura como el único factor significativo en la producción de gases dentro del intervalo experimental evaluado.

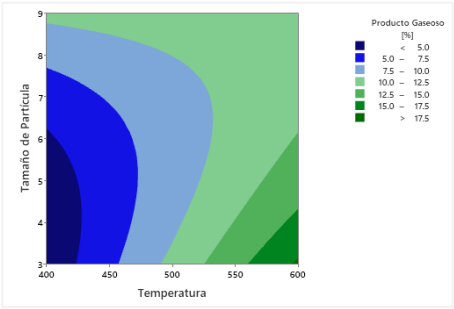


Figura 7. Gráfica de contorno del producto gaseoso [%] en función del tamaño de partícula y de la temperatura.

Optimización del proceso de pirólisis

Con base en los resultados obtenidos en el diseño de experimentos desarrollado previamente para los NFU, se planteó una etapa de optimización orientada a maximizar el rendimiento del producto líquido. Para ello, se emplearon los modelos ajustados mediante la metodología de superficie de respuesta, considerando como variables de decisión la temperatura de pirólisis y el tamaño de partícula. La respuesta objetivo correspondió al porcentaje de producto líquido obtenido durante el proceso.

La optimización se realizó dentro de los intervalos experimentales evaluados para cada factor, es decir, temperatura entre 400 y 600 °C y tamaño de partícula entre 3 y 9 divisiones. A partir del análisis estadístico previo, se identificó que la respuesta líquida presentó un comportamiento no lineal, especialmente asociado al término cuadrático de la temperatura. Por esta razón, la optimización no se limitó a seleccionar el nivel máximo de temperatura, sino a localizar la región en la que se favorece la formación de vapores condensables sin promover en exceso reacciones secundarias de craqueo hacia productos gaseosos.

El criterio de optimización consistió en maximizar el porcentaje de producto líquido mediante una función de deseabilidad compuesta. Esta herramienta permite transformar la respuesta ajustada en una escala adimensional entre 0 y 1, donde valores cercanos a 1 indican una condición altamente favorable respecto al objetivo definido. De esta manera, se buscó la combinación de temperatura y tamaño de partícula que permitiera obtener el mayor rendimiento estimado de aceite pirolítico dentro del dominio experimental.

La optimización de la respuesta indicó que la mejor condición para maximizar el producto líquido se obtuvo a una temperatura de 570 °C y con un tamaño de partícula de 3 divisiones. Bajo estas condiciones, el modelo predijo un rendimiento ajustado de producto líquido de 42,5 %, con una deseabilidad compuesta igual a 1. Este resultado indica que la combinación seleccionada cumple de manera óptima el objetivo de maximización establecido para la fracción líquida. Estos resultados se presentan en la Tabla 5.

***Tabla 5**. Solución óptima para la maximización del producto líquido.*

Solución	Temperatura [°C]	Tamaño de partícula [No. de partes]	Producto líquido [%]	Deseabilidad compuesta
1	570	3	42.5	1

La condición óptima se ubica en una temperatura alta, pero no necesariamente en el extremo superior del intervalo experimental. Esto concuerda con el comportamiento observado en las gráficas factoriales y de contorno del producto líquido, donde la respuesta aumenta hasta una región intermedia-alta de temperatura y posteriormente tiende a disminuir por la intensificación de reacciones secundarias de craqueo. Asimismo, el tamaño de partícula óptimo correspondió al menor número de divisiones evaluado, lo que sugiere que, para esta respuesta, la variable térmica tiene mayor peso relativo que la reducción del tamaño de partícula.

La predicción de respuesta múltiple muestra un valor ajustado de 42.5 % para el producto líquido, con un error estándar de ajuste de 3.33. El intervalo de confianza del 95 % se ubicó entre 34.57 y 50.33 %, mientras que el intervalo de predicción del 95 % se encontró entre 32.02 y 52.88 %. Estos intervalos reflejan la variabilidad experimental asociada al proceso y deben considerarse al interpretar la condición óptima, especialmente si se desea trasladar la operación a una escala mayor o validar la respuesta mediante corridas experimentales adicionales. En la Tabla 6 se presentan los resultados de la predicción de respuesta múltiple para la condición óptima.

***Tabla 6**. Predicción de respuesta múltiple para la condición óptima.*

Variable		Valor de configuración		
Temperatura [°C]		570		
Tamaño de partícula [No. de partes]		3		
Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
Producto líquido [%]	42.5	3.33	(34.57, 50.33)	(32.02, 52.88)

El perfil de optimización confirma que la mayor deseabilidad se obtiene en la región de temperatura cercana a 570 °C y con un tamaño de partícula de 3 divisiones. La línea de respuesta del producto líquido evidencia que la temperatura tiene un efecto determinante sobre la maximización de la fracción líquida, mientras que el tamaño de partícula presenta una contribución menor. En términos prácticos, esta condición representa una zona de operación favorable para maximizar la obtención de aceite pirolítico a partir de neumáticos fuera de uso, manteniendo el proceso dentro del intervalo experimental validado por el diseño de experimentos.

Finalmente, la etapa de optimización permitió integrar los resultados estadísticos del diseño experimental con la interpretación física del proceso. La temperatura óptima favorece la descomposición térmica del material polimérico y la generación de vapores condensables, mientras que evita, en la medida de lo posible, el desplazamiento excesivo de la reacción hacia la formación de gases. Por tanto, la condición de 570 °C y tamaño de partícula de 3 divisiones se propone como punto de operación recomendado para maximizar el rendimiento del producto líquido, sujeto a validación experimental en corridas confirmatorias. Sin embargo, es importante señalar que la condición óptima identificada corresponde a una predicción obtenida a partir del modelo estadístico de superficie de respuesta y no ha sido validada experimentalmente en esta etapa del estudio. Por tanto, aunque el modelo sugiere que la mayor producción de aceite pirolítico se alcanza a 570 °C y con un tamaño de partícula de 3 divisiones, se requiere realizar ensayos experimentales posteriores bajo estas condiciones para confirmar el rendimiento estimado, evaluar la reproducibilidad del proceso y verificar la confiabilidad de la predicción del modelo.

Conclusiones

La pirólisis de neumáticos fuera de uso se confirmó como una alternativa tecnológica viable y sostenible para su valorización. Esta tecnología permite recuperar productos valiosos como aceite pirolítico, gases combustibles y sólidos carbonosos (carbón negro). En este trabajo se presentan los resultados de la pirólisis de dos tipos de neumáticos fuera de uso. Se analiza la influencia de la temperatura y el tamaño de la muestra en el rendimiento de conversión de los productos pirolíticos. A partir de los resultados experimentales, del análisis estadístico y de la optimización del proceso, se establecen las siguientes conclusiones:

1. La temperatura de pirólisis fue la variable operativa de mayor influencia en la distribución de productos. A medida que aumentó la temperatura, se favorecieron las reacciones de descomposición térmica, la ruptura de cadenas poliméricas y la formación de compuestos volátiles, lo que modificó directamente las fracciones de aceite, gas y sólido obtenidas.
2. El rendimiento de aceite pirolítico presentó un comportamiento no lineal con la temperatura. Inicialmente, el aumento de temperatura favoreció la formación de vapores condensables y, por tanto, incrementó la fracción líquida; sin embargo, a temperaturas más elevadas se promovieron reacciones secundarias de craqueo, favoreciendo la formación de gas y reduciendo parcialmente el rendimiento líquido.
3. El mayor rendimiento experimental de aceite pirolítico se obtuvo en una región intermedia de temperatura, cercana a 550 °C. De forma complementaria, la optimización estadística del proceso indicó que la condición más favorable para maximizar el producto líquido correspondió a una temperatura aproximada de 570 °C y un tamaño de partícula de 3 divisiones, con un rendimiento ajustado de aceite pirolítico cercano al 42,5 %.
4. Para el producto sólido, el análisis de varianza evidenció que la temperatura tuvo una influencia significativa sobre el rendimiento de carbón negro. El aumento de temperatura redujo la fracción sólida debido al incremento de la volatilización y de la degradación térmica del material. El tamaño de partícula presentó una influencia menor, asociada principalmente a fenómenos de transferencia de calor dentro de la muestra.
5. En el caso del aceite pirolítico, el efecto más relevante estuvo asociado al comportamiento cuadrático de la temperatura, lo que confirma la existencia de una región óptima de operación. El tamaño de partícula tuvo una contribución secundaria, por lo que la formación de la fracción líquida estuvo gobernada principalmente por las condiciones térmicas del proceso.
6. El análisis de varianza del producto gaseoso mostró que la temperatura fue el único factor con efecto estadísticamente significativo sobre esta respuesta. El rendimiento de gas aumentó progresivamente con la temperatura, lo cual se relaciona con el incremento de reacciones de craqueo térmico y con la conversión de compuestos condensables hacia especies gaseosas.
7. La optimización del proceso permitió identificar la condición operativa más favorable para maximizar el rendimiento del aceite pirolítico. De acuerdo con el modelo de superficie de respuesta, la mayor producción de líquido se alcanza a una temperatura de 569,7 °C y con un tamaño de partícula de 3 divisiones, obteniéndose un rendimiento ajustado de 42,45 % y una deseabilidad compuesta igual a 1. Este resultado confirma que la operación en una región intermedia-alta de temperatura favorece la formación de vapores condensables antes de que predominen las reacciones secundarias de craqueo hacia productos gaseosos.

Bibliografía/Referencias

Cristiana Maganinho, Clara M.C. Silva, Sebastião M.R. Costa, Adélio Mendes, João Rocha, Carlos M. Silva, Inês Portugal. Advances in the pyrolysis of end-of-life tires: A critical review of reactor systems, process conditions and industrial applications, Journal of Environmental Chemical Engineering 13 (2025) 118667, https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118667.

Gao, N., Wang, F., Quan, C., Santamaria, L., Lopez, G., Williams, P. T. (2022). Tire pyrolysis char: Processes, properties, upgrading and applications. Progress in Energy and Combustion Science, 93, pp. 101022, doi: 10.1016/j.pecs.2022.101022.

Han, W., Han, D., Chen, H. (2023). Pyrolysis of waste tires: a review. Polymers, 15, (7), pp. 1604, doi: 10.3390/polym15071604.

Laresgoiti, M. F., Caballero, B. M., de Marco, I., Torres, A., Cabrero, M. A., Chomón, M. J. (2004). Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 71, (2), pp. 917-934, doi: 10.1016/j.jaap.2003.12.003.

Montgomery, Douglas C. (1997). Design and Analysis of Experiments (5th ed.). John Wiley & Sons, Inc., United States.

Papuga, S., Djurdjevic, M., Tomović, G., Vecchio Ciprioti, S. (2023). Pyrolysis of tyre waste in a fixed-bed reactor. Symmetry, 15, (12), pp. 2146, doi: 10.3390/sym15122146.

Quek, A., Balasubramanian, R. (2013). Liquefaction of waste tires by pyrolysis for oil and chemicals-A review. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, pp. 101, 1-16, doi: 10.1016/j.jaap.2013.02.016.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos. Ciudad de México: Gobierno de México, 2020.

S.M.R. Costa, D. Fowler, G.A. Carreira, I. Portugal, C.M. Silva. Production and upgrading of recovered carbon black from the pyrolysis of End-of-Life tires, Materials 15 (2022) 2030, https://doi.org/10.3390/ma15062030.

STATGRAPHICS. (2006, 14 septiembre). Diseño de Experimentos – Diseño de Superficie de Respuesta. StatPoint, Inc.

Williams, P. T. (2013). Pyrolysis of waste tyres: A review. Waste Management, 33, (8), pp. 1714-1728, doi: 10.1016/j.wasman.2013.05.003.