

# Pirólisis de llantas usadas: Estudio cinético

Rosa del Carmen Miranda Guardiola, Ciro César Segovia Martínez,  
César Alberto Sosa Blanco

Facultad de Ciencias Químicas, UANL  
rmiranda@fcq.uanl.mx

## RESUMEN

*La cinética de pirólisis de llantas usadas de automóviles ha sido investigada mediante termogravimetría bajo condiciones dinámicas y cuasi-isotérmicas usando diferente rapidez de calentamiento, en un amplio rango de temperatura y en atmósfera inerte. Se utilizaron dos modelos de simulación, el modelo en serie y el modelo en paralelo. Se demostró un efecto significativo de la rapidez de calentamiento sobre el proceso de pirólisis. También se encontró un efecto importante del tamaño de partícula y el peso de muestra sobre la cinética de degradación térmica de llantas.*



## PALABRAS CLAVE

Pirólisis de llantas, análisis termogravimétrico, cinética de descomposición, degradación.

## ABSTRACT

*The kinetics of pyrolysis of used tires for cars has been investigated by means of thermogravimetry under dynamic and stepwise conditions using different heating rates, in a wide temperature range in inert environment. Two simulation models, serial and parallel, were used. It was demonstrated that the heating rate has an important effect over the pyrolysis process. It was also found an important effect by the particle size and sample size on the pyrolysis kinetics.*

## KEYWORDS

Tire pyrolysis, thermogravimetric analysis, decomposition kinetics, degradation.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas de nuestra sociedad es la generación y disposición de residuos sólidos. Debido al incremento en el uso vehicular miles de toneladas de llantas usadas son generadas en todo el mundo. Lee & Kim<sup>1</sup> reportan que en países desarrollados se desecha una llanta por persona anualmente. La disposición final de las llantas usadas es el confinamiento en rellenos sanitarios a modo de pilas al aire libre, generando así problemas de salud y riesgo de incendio.<sup>2,3</sup>

Las llantas son una buena alternativa para obtener energía, debido a que están compuestas de caucho en la forma de  $C_xH_y$  con un valor calorífico de 33 MJ/kg.<sup>4</sup>

Se han presentado diferentes opciones para el tratamiento de llantas: Incineración, gasificación y pirólisis.<sup>5</sup> La incineración permite obtener energía fácilmente, sin embargo las emisiones producidas como dioxinas y furanos no favorecen este proceso, desde el punto de vista ambiental.

Una alternativa para la conversión de materiales que no son fácilmente reprocessados es la pirólisis. El proceso de pirólisis consiste en la descomposición térmica de macromoléculas en ausencia de oxígeno para la obtención de productos de menor peso molecular (líquidos, gases y carbón residual). Estos productos pueden ser útiles como combustibles o materias primas para otros procesos.<sup>6, 7, 8</sup>

El estudio cinético de la pirólisis de llantas usadas es de gran importancia debido a que constituye la etapa inicial para el desarrollo de los procesos de gasificación, incineración y pirólisis. La cinética de degradación de materiales puede ser estudiada mediante termogravimetría (TGA).<sup>2, 9, 10, 11</sup>

La técnica de termogravimetría mide la pérdida de peso de una muestra en función del tiempo y la temperatura. Bajo condiciones controladas las limitaciones de transferencia de calor y masa entre la muestra, la charola porta-muestra y el gas acarreador pueden ser consideradas despreciables, para seguir únicamente la cinética química y no otros procesos.<sup>12, 13</sup> La pirólisis de llantas ha sido reportada por varios investigadores a nivel laboratorio y a escala industrial.<sup>14, 15, 16, 17</sup>

Boukadir *et al.*<sup>18</sup> encontraron que el mecanismo de degradación del caucho presenta dos etapas de reacción en condiciones isotérmicas, reportan un orden de reacción para la primera etapa de 1-1.5 y de 3 para la segunda, pero no reportan un buen ajuste del modelo a las curvas experimentales. Bouvier *et al.*<sup>19</sup> reportaron una sola etapa de degradación y propusieron una reacción de primer orden. Los autores obtuvieron una energía de activación aparente de 125.5 kJ/mol y un factor de frecuencia de  $1.08 \times 10^9 \text{ min}^{-1}$  usando TGA. Sin embargo, Kim *et al.*<sup>20</sup> propusieron que los 3 componentes de la llanta degradan de manera independiente y sin interacción, siguiendo una reacción irreversible y de primer orden.

Yang *et al.*<sup>9</sup> identificaron y cuantificaron los componentes principales de la llanta (NR: Caucho



natural, BR: Poli-butadieno y SBR: Estireno-Butadieno), aditivos y plastificantes (PLZ), utilizando la simulación de las curvas DTG.

Teng *et al.*<sup>6</sup> usaron un modelo de tres etapas para evaluar la evolución de volátiles durante la pirólisis de llantas. Leung & Wang<sup>2</sup> investigaron el comportamiento cinético de los procesos de pirólisis y combustión de llantas usadas, mediante TGA. Los autores simularon y determinaron los parámetros cinéticos usando el modelo de tres componentes y el modelo de tres elastómeros.

El objetivo del presente trabajo es el modelamiento matemático de la cinética de pirólisis de llantas usadas. Además de estudiar la influencia de las principales variables de operación sobre la cinética de degradación de polvo de llantas mediante el uso de la técnica de termogravimetría.

Con el uso del método de termogravimetría dinámica se puede identificar la presencia de plastificantes, caucho natural y caucho sintético (SR), pero no se logra diferenciar entre las señales de caucho de poli-butadieno (BR) y caucho de estireno-butadieno (SBR). Una de las principales contribuciones del presente trabajo es la identificación y cuantificación de los componentes BR y SBR mediante el uso del método de cuasi-isotermas.

## EXPERIMENTACIÓN

### Materiales

Las llantas usadas fueron proporcionadas por el relleno sanitario de Cd. Sabinas Hidalgo en Nuevo León, México. El contenido de humedad al recibir la muestra fue de 2 % en peso. La muestra fue obtenida cortando la llanta con utensilios de acero inoxidable, para después ser pulverizada con un molino de aspas

y nitrógeno líquido. El polvo de llanta se clasificó por el tamaño de la partícula utilizando diferentes tamices (0.250 a 0.895 mm), después fue secado en un horno convencional a 105°C por 24 horas. La muestra pulverizada y clasificada se mantuvo en desecador a temperatura ambiente para evitar la contaminación de la muestra y minimizar la humedad.

### Termogravimetría

Los experimentos de análisis térmico fueron desarrollados con un microprocesador controlador de termogravimetría TGA Modelo TA Q500. El equipo de termogravimetría registra la pérdida de peso con respecto a la temperatura (TG, % en peso) y su primera derivada (DTG, %/min). El DTG es la rapidez de degradación puntual.

Se utilizaron 5 mg de muestra con un tamaño de partícula medio menor a 0.250 mm. La muestra fue calentada de temperatura ambiente hasta 1000°C a presión atmosférica y los volátiles fueron extraídos durante todo el proceso mediante el uso de un flujo de gas acarreador (60 mL/min). Para la determinación de la cinética de reacción la rapidez de calentamiento se evaluó en el intervalo de 1 a 40°C/min, en modo dinámico.

Las curvas de pérdida de peso y rapidez de pérdida de peso fueron obtenidas en función del tiempo y la temperatura. La cuantificación de cenizas se realizó en ambiente oxidante (O<sub>2</sub>, puro). Se identificó la presencia del NR, SBR y BR mediante el uso de estándares de cada uno de los materiales y su posterior simulación.

### Cuasi-Isotermas

Con el propósito de identificar y cuantificar los diferentes componentes de la llanta se utilizó el método cuasi-isotérmico. Este método consiste en la combinación de rampas de calentamiento e isotermas. Cada isoterma corresponde a una reacción de descomposición.

El algoritmo utilizado fue el siguiente: 1) Rampa de calentamiento de 20°C/min hasta que la rapidez de degradación sea mayor al 0.1 % en peso/min. 2) Isoterma hasta que la velocidad de degradación sea menor a 0.025 % en peso/min. 3) Vuelve al paso 1 hasta alcanzar 1000°C.

### Variables de operación

Para el estudio de las variables de operación se establecieron el límite mínimo y máximo para cada una de las variables que pueden afectar al proceso: Tamaño de partícula (polvo y trozo), flujo de gas acarreador (80 y 200mL/min) y peso de muestra inicial (1 y 20 mg). Las pruebas se realizaron fijando dos variables, con el fin de observar el efecto de la tercera variable. Como condiciones iniciales se utilizaron: 5mg, 0.250mm y 60mL/min.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Termogravimetría: Modo dinámico

La figura 1 presenta la curva TG vs temperatura a diferentes rapidezces de calentamiento, en ella se puede observar que a mayor rapidez de calentamiento mayor desplazamiento de las curvas hacia mayores temperaturas, lo cual indica un efecto de los procesos de transferencia de calor intraparticular sobre el proceso de degradación global.

Las temperaturas iniciales ( $T_I$ ) y finales ( $T_F$ ), así como las temperaturas de máxima rapidez de descomposición (temperatura pico,  $T_{pi}$ ) para diferentes rapidezces de calentamiento ( $H_R$ ) y el % en peso del residuo sólido ( $W_R$ ) obtenido al final de la reacción, se muestran en la tabla I.

La temperatura inicial se encuentra en el rango de 120 a 152°C y la temperatura final entre 455 y

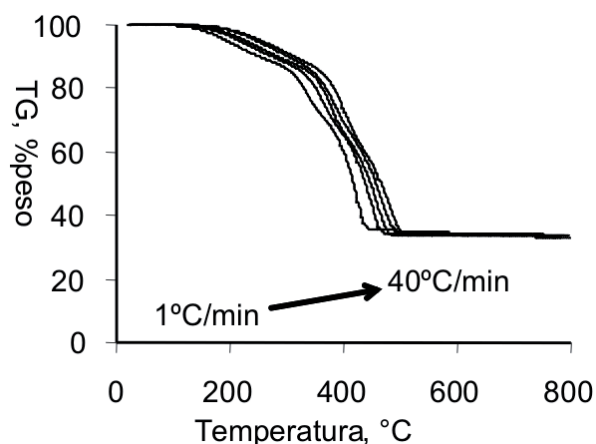


Fig. 1. Curvas TG vs Temperatura de la pirólisis de llantas usadas a diferentes rapidezces de calentamiento: 1, 5, 10, 20 y 40°C/min (de izquierda a derecha) usando 60 ml/min de N<sub>2</sub>.

Tabla I. Resultados de TGA de la descomposición de llantas a diferentes rapidezces de calentamiento.

$H_R$	$T_{P1}$	$T_{P2}$	$T_{P3}$	$W_R$	$T_I$	$T_F$
1	205	339	425	33	120	455
5	235	368	449	33	124	486
10	256	380	460	33	125	495
20	268	392	471	33	150	500
40	288	404	481	33	152	520

$H_R$ : Rapidez de calentamiento en °C/min;  $T_{P1}$ ,  $T_{P2}$  y  $T_{P3}$ : Temperaturas de pico en las etapas 1, 2 y 3 respectivamente, en °C;  $T_I$  = Temperatura de inicio del proceso, en °C;  $T_F$  = Temperatura de fin del proceso en °C;  $W_R$  = Residuo final, % en peso.

520°C, cambiando significativamente con la rapidez de calentamiento.

La descomposición de llantas exhibe tres etapas principales de degradación, las cuales se definen por sus picos máximos, sin embargo estos se encuentran sobrepuestos como se observa claramente en la figura 2, que muestra las curvas DTG vs temperatura.

La primera etapa se presenta entre 120 y 320°C con un pico máximo a 256°C. La segunda etapa ocurre entre 280 y 440°C con un pico máximo a 380°C. La tercera etapa se encuentra entre 400 y 520°C con un pico a 460°C.

Los resultados son similares a los reportados por otros autores.<sup>2,9</sup> La pirólisis de llantas a presión

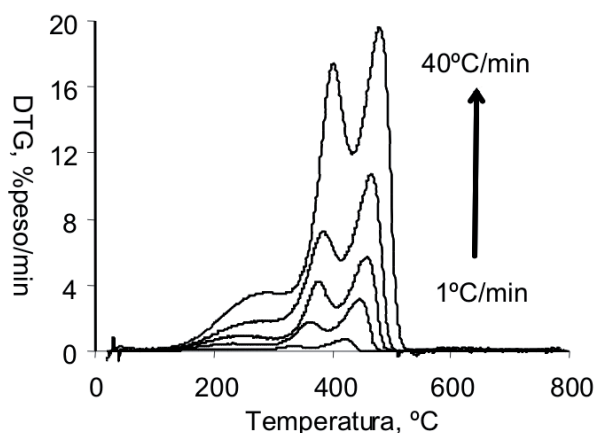


Fig. 2. Curvas DTG de la pirólisis de llantas usadas a diferentes rapidezces de calentamiento: 1, 5, 10, 20 y 40°C/min (de abajo hacia arriba) en ambiente N<sub>2</sub>, flujo de gas 100 mL/min, peso 5.5 mg.

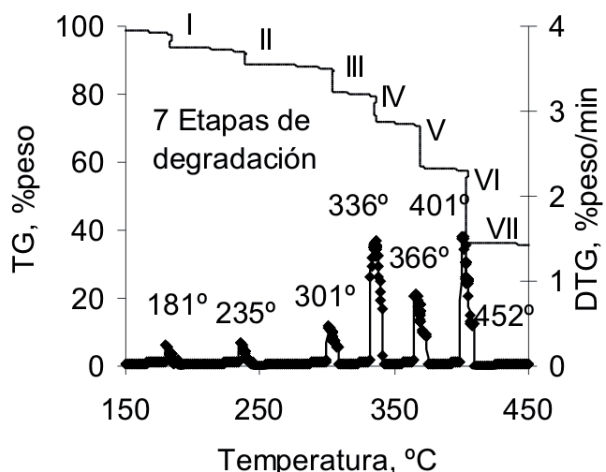


Fig. 3. Curvas TG y DTG de la pirólisis de llantas usadas por el método de cuasi-isotermas, usando 60 ml/min de N<sub>2</sub>.

atmosférica da como resultado la formación de 67% en peso de volátiles y 33% en peso de sólido residual.

### Termogravimetría: Modo cuasi-isotérmico

Los resultados obtenidos por el método cuasi-isotérmico se presentan en la figura 3. Los datos experimentales muestran 7 etapas de degradación, las primeras 2 muestran una pérdida del 11% en peso y pueden ser asignadas a la volatilización de plastificantes.<sup>9</sup> El tercer y cuarto pico corresponden al NR y BR, respectivamente con un 9% en peso cada uno. El quinto está asignado a la descomposición de la mezcla NR con SBR (13% en peso), el sexto y séptimo con una contribución del 24% en peso representan al BR.

El residuo final de la muestra es del 34% en peso, el cual corresponde a 29% en peso a carbón fijo y un 5% en peso a cenizas.

### Parámetros cinéticos: Método de Friedman

Se utilizó el método de Friedman para la determinación de los parámetros cinéticos.<sup>21, 22, 23</sup> La figura 4 presenta las energías de activación obtenidas por el método de Friedman y el software cinético del equipo TGA Q500, basado en el modelo de Flynn.<sup>24, 25</sup>

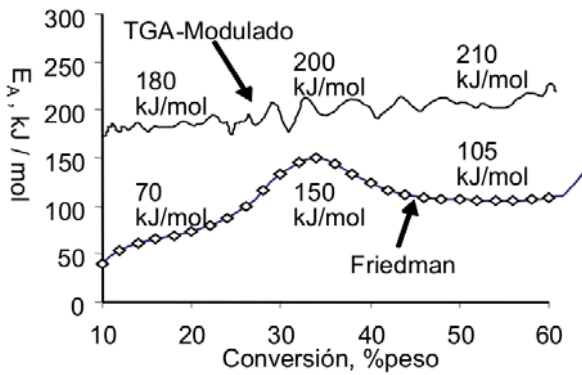


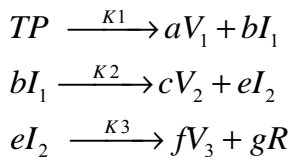
Fig. 4. Energía de activación en función de la conversión.

### Modelos cinéticos

Basados en el trabajo de Leung & Wang<sup>2</sup> se utilizaron dos modelos cinéticos de tres etapas modelo de tres reacciones en serie (M3RS) y modelo de tres reacciones en paralelo (M3RP), los cuales consideran que cada etapa de pérdida de peso en la curva TG corresponde a una reacción aparente. Una reacción aparente se refiere a una etapa de pérdida de peso que ocurre en cierto intervalo de temperatura y está constituida por varias reacciones competitivas (paralelo) y/o consecutivas (serie).

### Modelo en serie (M3RS)

El modelo supone tres reacciones consecutivas y asume que el material de llanta en polvo se degrada formando volátiles e intermediarios y que estos intermediarios se degradan formando más volátiles y residuo. El esquema del modelo se presenta a continuación.



En donde  $TP$  es llanta en polvo,  $V_i$  es la formación de volátiles,  $I$  representa la formación de un intermediario,  $R$  indica el residuo y  $a, b, c, e, f$  y  $g$  son los coeficientes estequiométricos de cada reacción aparente. La nomenclatura permanece sin cambio, sólo se especificarán variables nuevas. Las ecuaciones diferenciales a resolver de manera simultánea se presentan a continuación:

$$\frac{dTP}{dt} = -k_1 TP^{n_1} \quad (1)$$

$$\frac{dI_1}{dt} = b(k_1 TP^{n_1} - k_2 I_1^{n_2}) \quad (2)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = e(k_2 I_1^{n_2} - k_3 I_2^{n_3}) \quad (3)$$

$$\frac{dR}{dt} = g(k_3 I_2^{n_3}) \quad (4)$$

La constante de rapidez  $k_i$  está definida en función de la temperatura, por la expresión de Arrhenius (ecuación 5).

$$k_i = A_i \exp[-Ea_i / RT] \quad (5)$$

Donde:  $i$  es el número de la reacción,  $k_i$  es la constante de rapidez,  $A_i$  es el factor pre-exponencial y  $Ea_i$  es la energía de activación.

La solución de ecuaciones diferenciales se realizó utilizando el algoritmo de Runge Kutta de cuarto orden y el método de optimización Simplex para minimizar el criterio de mínimos cuadrados definido por la ecuación:

$$error = \sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{dTG}{dt} \right)_i^{EXP} - \left( \frac{dTG}{dt} \right)_i^{SIM} \right]^2 \quad (6)$$

Donde:  $\left( \frac{dTG}{dt} \right)_i^{EXP}$  y  $\left( \frac{dTG}{dt} \right)_i^{SIM}$  son la rapidez de descomposición experimental y simulada para el  $i$ -ésimo dato. Las curvas simuladas y experimentales se muestran en la figura 5.

Podemos observar los perfiles de rapidez de reacción (DTG). Las curvas hacia abajo (-) indican el consumo de reactivos y las curvas hacia arriba (+) indican la formación de productos. El polvo de llantas se consume, forma intermediarios, estos se consumen y forman residuo.

### Modelo en paralelo (M3RP)

Este modelo considera que cada componente (PLZ, NR y SR) se degrada independientemente y supone no-interacción entre los productos de reacción, debido a que estos son extraídos rápidamente del reactor. Cada reacción presentada en el esquema siguiente forma productos volátiles ( $V_i$ ) y carbón residual (R).

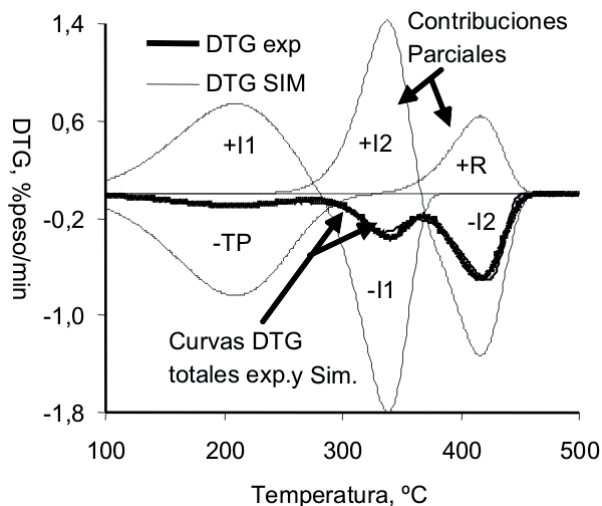
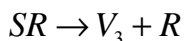
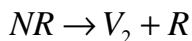
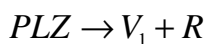


Fig. 5. Curvas DTG Simulada vs. Experimental. Modelo en serie (1°C/min).



Las ecuaciones cinéticas que representan el mecanismo de reacción en paralelo se listan a continuación:

$$\frac{dTP}{dt} = \alpha_1 \frac{dPLZ}{dt} + \alpha_2 \frac{dNR}{dt} + \alpha_3 \frac{dSR}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{dPLZ}{dt} = -K_1 PLZ^{n_1} \quad (8)$$

$$\frac{dNR}{dt} = -K_2 NR^{n_2} \quad (9)$$

$$\frac{dSR}{dt} = -K_3 SR^{n_3} \quad (10)$$

En donde  $\alpha$  representa el coeficiente de participación de cada componente de la llanta.

La figura 6 muestra las curvas de rapidez de pérdida de peso debido a la degradación de cada uno de los componentes de la muestra y la volatilización de los productos. La rapidez de degradación global es la suma de las velocidades parciales de degradación.

Los parámetros cinéticos obtenidos, son similares a los reportados por Leung & Wang.<sup>2</sup> En la tabla II se observa que los parámetros del modelo en serie

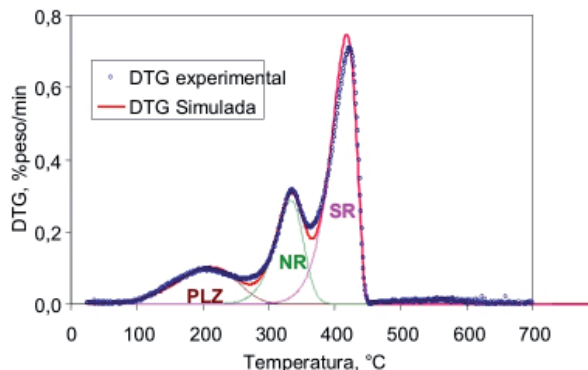


Fig. 6. Curvas DTG Simulada vs. Experimental. Modelo en paralelo (1°C/min) y 60 ml/min de N<sub>2</sub>.

y el modelo en paralelo son similares. Además, los valores de A y Ea de la primera etapa son pequeños, comparados con los de la segunda y tercera etapa, debido a que los plastificantes no se degradan durante el proceso, sólo se volatilizan y salen del horno sin cambios en su estructura química. El orden de reacción obtenido es igual a la unidad. Varios autores han reportado el orden de reacción igual a uno.<sup>2,6,9,18,19,20</sup>

Los resultados del presente trabajo difieren con los reportados por Bouvier *et al.*<sup>19</sup> debido a que los parámetros cinéticos (energía de activación aparente de 125.5 kJ/mol y factor de frecuencia de 1.08 x 10<sup>9</sup> min<sup>-1</sup>) son obtenidos ajustando los datos experimentales a una sola reacción aparente, sin diferenciar entre los diferentes componentes de la llanta.

Tabla II. Parámetros cinéticos (M3RP-M3RS).

Etapa de Reacción	A, min <sup>-1</sup>	Ea, kJ/mol	n
Modelo en serie (3 etapas)			
1	460	34	1
2	5 x 10 <sup>13</sup>	172	1
3	5 x 10 <sup>12</sup>	178	1
Modelo en paralelo (3 etapas)			
1	460	35	1
2	5 x 10 <sup>13</sup>	173	1
3	5 x 10 <sup>12</sup>	178	1

Leung & Wang<sup>2</sup> presentan un modelo de seis reacciones en paralelo, el cual surge de la idea del desprendimiento individual de los aceites plastificantes embebidos en el seno de cada tipo de caucho (NR, SBR y BR).

Los investigadores presentan parámetros de energía de activación similares para las tres etapas de volatilización de plastificantes, lo que hace pensar que es inútil la simulación de tres diferentes etapas de volatilización de plastificantes. Los modelos presentados en el trabajo actual muestran buenos resultados y requieren un menor número de etapas.

### Efectos de transferencia intra e interparticular

La figura 7 muestra la influencia del peso de la muestra sobre las curvas TG y DTG. Como se puede observar la curva DTG de la muestra de llanta de 20 mg se desplaza a la derecha respecto a la muestra de 1 mg, debido al impedimento de las capas superiores de caucho al libre flujo de plastificantes hacia el exterior de la fase sólida. Los picos de la muestra de 1 mg son más definidos y se observan las curvas más separadas. El primero y segundo pico en las curvas DTG se presentan ligeramente desplazadas a la derecha (10°C de diferencia), el tercer pico no muestra diferencia significativa (diferencia de 5 °C) en los dos experimentos. Los resultados muestran que a mayor peso de muestra la transferencia de calor tiene mayor efecto. Por lo tanto existe un efecto importante el peso inicial de la muestra sobre la rapidez de volatilización.

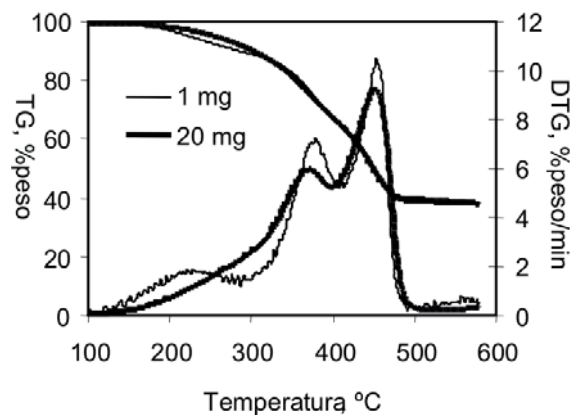


Fig. 7. Influencia del Peso de muestra sobre las curvas TG/DTG de llantas a 20°C/min y 60 ml/min de N<sub>2</sub>.

La figura 8 presenta el efecto del tamaño de partícula sobre el comportamiento térmico de las llantas. Como se puede observar existe un efecto significativo del tamaño de partícula sobre el proceso de degradación.

La curva DTG de la llanta en trozo se degrada a mayor temperatura, desplazándose a la derecha. Los tres picos de DTG se presentan a mayor temperatura. La rapidez de volatilización del pico 1 disminuye (Plastificantes) y la del pico 2 y 3 aumenta (NR y SR) debido a que el plastificante escapa de la fase sólida hasta que el material de caucho comienza a degradarse, esto ocurre por encima de 350°C.

La figura 9 muestra el efecto del flujo de gas acarreador sobre el comportamiento térmico de las llantas. Se puede observar un efecto poco

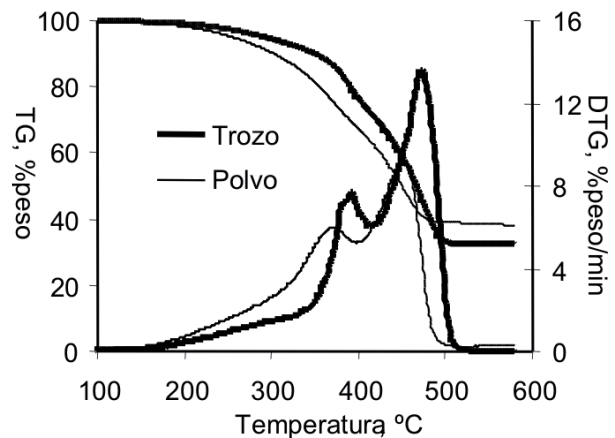


Fig. 8. Efecto del tamaño de partícula sobre las curvas TG/DTG de llantas usando 6 mg de muestra, 20°C/min y 60 ml/min de N<sub>2</sub>.

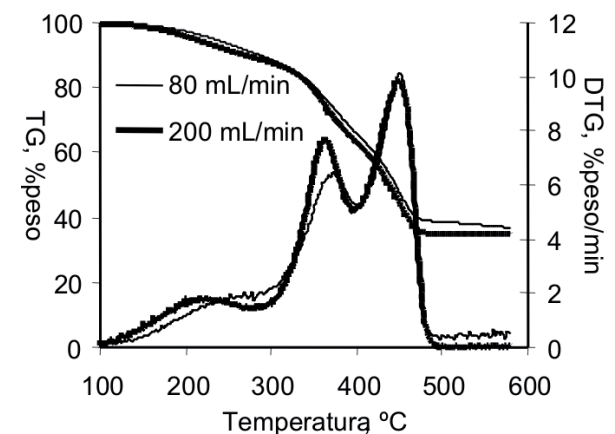


Fig. 9 Influencia del Flujo de Gas Acarreador sobre las curvas TG/DTG de llantas usando 6 mg de muestra y 20°C/min.

significativo del flujo de gas acarreador, por lo que se puede afirmar que no existe influencia de esta variable sobre el proceso.

## CONCLUSIONES

El proceso de pirólisis de llantas usadas presentó tres etapas de descomposición térmica. El rango de temperatura de la descomposición térmica de llantas se encuentra entre 120 y 520°C. Las etapas corresponden a la volatilización de plastificantes, la degradación del caucho natural y sintético, respectivamente.

Los resultados de termogravimetría muestran una pérdida de peso total del 67 % en peso y un peso de sólido residual del 33 % en peso, el cual corresponde a 28 % en peso de carbón fijo y un 5 % en peso de cenizas.

La simulación de datos experimentales a los modelos de degradación de 3 reacciones en serie y en paralelo presenta un buen ajuste a los datos experimentales. Sin embargo se encontró mejor ajuste para el modelo en paralelo, en comparación con el modelo en serie.

El peso de muestra y el tamaño de partícula influyen significativamente en la cinética de degradación del material, siendo el flujo de gas una variable de menor influencia.

Estos resultados son prueba de que los procesos de transferencia de calor y masa afectan la volatilización de plastificantes y la rapidez de degradación global del material.

El escalamiento del proceso, involucra el efecto de variables como peso y tamaño de partícula del material, por lo que es necesario el análisis del proceso a una mayor escala. Estudios posteriores en un reactor semi-continuo a escala banco, serán encaminados hacia estos objetivos particulares.

## REFERENCIAS

1. Lee, J. S. y S. D. Kim, Gasification kinetics of waste tire-char with CO<sub>2</sub> in a thermobalance reactor. *Energy*: 21, 343-352 (1996).
2. Leung, D.Y.C. and C.L. Wang, Kinetic modeling of scrap tire pyrolysis. *Energy and Fuels*: 13, 421-427 (1999).

3. Leung, D.Y.C., X.L. Yin, Z.L. Zhao, B.Y. y Xu, Y. Chen, Pyrolysis of tire powder: influence of operation variables on the composition and yields of gaseous product. *Fuel Processing Technology*: 79,141-155 (2002).
4. Conesa, J.A., A. Fullana y R. Font, Tire pyrolysis: Evolution of volatile and semivolatile compounds. *Energy and Fuels*: 14, 409-418 (2000).
5. Jang, J.W., T.S. Yoo y J.H. Oh, I. Iwasaki, Discarded tire recycling practices in the United States, Japan and Korea resources. *Conservation and Recycling*: 22, 1-14 (1998).
6. Teng, H., M.A. Serio, M.A. Wojtowicz, R. Bassilakis y P.R. Solomon, Reprocessing of used tires into activated carbon and other products. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34, 3102-3111 (1995).
7. Giavarini C., Active carbon from scrap tyres. *Fuel*: 64, 1331-1332 (1985).
8. Roy, C., B. Labrecque y B. D. Caumia, Recycling of scrap tires to oil and carbon black by vacuum pyrolysis, *Resource Conservation & Recycling*: 4, 203-213 (1990).
9. Yang, J., Kaliaguine y S. y Roy, C. Improved quantitative determination of elastomers in tire rubber by kinetic simulation of DTG curves. *Rubber Chemistry and Technology*. 66, 213-229 (1993).
10. Conesa, J.A. y A. Marcilla, Kinetic study of the thermogravimetric behavior of different rubbers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*: 37, 95-110 (1996).
11. Conesa, J.A., A. Marcilla, J.A. Caballero, R. Font. Comments on the validity and utility of the different methods for kinetic analysis of thermogravimetric data. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*: 58-59, 617-633 (2001).
12. Menis, O., H. L. Rook y Garm, P. D, The State-of-the-Art of thermal analysis, U.S. Government Printing Office. Washington, DC, (1980).
13. González, J.F., J.M. Encinar, J.L. Canito y J.J. Rodríguez, Pyrolysis of Automobile Tyre Waste. Influence of operating variables and kinetic study: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 58-59, 667-683. (2001)
14. Conesa J.A., I. Martín-Gullón, R. Font y J. Jauhainen, Complete study of the pyrolysis and



- Gasification of Scrap Tires in a Pilot Plant Reactor: Environ. Sci. & Technol.: March (2004).
15. Ganesh K.S., S. Sundarrajan, K. Kishore, K.N. Ninan, B. George y M. Surianarayanan, Primary pyrolysis of hidroxyterminated polibutadiene: Macromolecules: 33,326-330, 33 (2000).
  16. Huang H., L. Tang, C.Z. Wu, Characterization of Gaseous and solid product from thermal plasma pyrolysis of waste rubber: Environ. Sci. Technol. 37, 4463-4467 (2003).
  17. Roy C., Chaala A., Darmstadt H.; The vacuum pyrolysis of used tire end-uses for oil and carbon lack products; Journal of Analytical and Applied Pyrolysis: 51, 201-221 (1999).
  18. Boukadir D., J.C. David, R. Granger, J. Vergnaud. Preparation of a convenient filler for thermoplastics by pyrolysis of rubber powder recovered from tyres: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis: 3, 83-89. (1981).
  19. Bouvier, J.M., F. Charbel y M. Gelus, Gas-solid pyrolysis of tire wastes kinetics and material balance of batch pyrolysis of used tires. Resource & Conservation: 15, 205-214 (1987).
  20. Kim. S. D., J. K. Park y H. D. Chun, Journal of Environmental Engineering: 121, 507-514 (1995).
  21. Friedman, H.L. Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry. Application to a phenolic plastic. Journal of Polymer Science: Part C6: 183-195 (1965).
  22. Miranda, R., J. Yang, C. Roy y C. Vasile, Vacuum Pyrolysis of PVC Part I: Kinetic Study, Polym Degrad. Stab.: 64(1) 127-144 (1999).
  23. Miranda, R., J. Yang, C. Roy y C. Vasile, Vacuum pyrolysis of commingled plastics containing PVC Part I: Kinetic study, Polym Degrad. Stab.: 72(3) 469-491 (2001).
  24. Blaine, R.L. y B.K. Hahn, Obtaining kinetic parameters by modulated thermogravimetry: J. Thermal Analysis 54, 695-704 (1998).
  25. Flynn, J.H. y L.A. Wall, A Quick, Direct method for the determination of activation energy from thermogravimetric data: Polym. Lett., 4(1966) 323-328.



# XI Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia

LATCYM 2006

6 al 8 de septiembre de 2006

México, D.F.

## Áreas Temáticas

1. Combustión
2. Convección
3. Ingeniería de procesos
4. Optimización y análisis de energía
5. Métodos numéricos en fenómenos de transporte
6. Conducción de calor
7. Transferencia de calor con cambio de fase
8. Instrumentación y técnicas experimentales
9. Transferencia de masa
10. Métodos matemáticos
11. Medios porosos
12. Transferencia simultánea de calor y materia
13. Energía solar
14. Radiación térmica
15. Termodinámica
16. Transferencia de calor y/o masa con reacción química
17. Enseñanza en la transferencia de calor y materia
18. Obtención y caracterización de materiales en ingeniería

### INFORMACIÓN:

Teléfono: (+52) 54 83 20 20

Extensiones: 1547, 2198, 2194, 2182

Fax: (+52) 54 83 21 63

E-mail: [cltcm06.ccm@servicios.itesm.mx](mailto:cltcm06.ccm@servicios.itesm.mx)

<http://dia.ccm.itesm.mx/~rvillaurru/>