

Caracterización Térmica de Residuos de Coco, Cascarilla de Arroz y Carbón Mineral para Aplicaciones Energéticas Sostenibles

Stiven J. Sofán-Germán¹, Emilio J. Díaz Díaz²

¹Universidad del Sinú-Elías Bechara Zainúm, Facultad de Ciencias e Ingenierías, Programa de Ingeniería Electromecánica, Cra. 1w No. 38-153, Barrio Juan XXIII, Montería, Colombia, stivensofan@unisnu.edu.co

²Universidad del Sinú-Elías Bechara Zainúm, Facultad de Ciencias e Ingenierías, Programa de Ingeniería Electromecánica, Cra. 1w No. 38-153, Barrio Juan XXIII, Montería, Colombia, emiliojdiaz@unisnu.edu.co

Resumen

Este estudio investiga la caracterización térmica de residuos de coco, cascarilla de arroz y carbón mineral para aplicaciones energéticas. Se realizaron análisis termogravimétricos (TGA) para evaluar la estabilidad térmica y la cinética de descomposición. Los resultados muestran que el carbón mineral tiene mayor eficiencia termodinámica, con menor relación aire-combustible y mayor entalpía de combustión. Los residuos de coco y cascarilla de arroz, aunque menos eficientes en poder calorífico, son útiles en aplicaciones específicas, especialmente en contextos de energía renovable. El TGA reveló que el carbón mineral se descompone gradualmente, mientras que el coco y la cascarilla de arroz lo hacen rápidamente entre 200 y 400°C. Estos residuos tienen potencial para biocombustibles, biochar y materiales avanzados. La aplicación de la ecuación de Arrhenius y el ajuste de datos TGA determinaron parámetros cinéticos clave para la descomposición térmica, esenciales para diseñar y optimizar procesos industriales que utilizan estos residuos como fuentes de energía.

Palabras clave: Caracterización térmica, Análisis termogravimétrico (TGA), Residuos de coco, Cascarilla de arroz, Carbón mineral.

Abstract

This study investigates the thermal characterization of coconut residues, rice husk, and mineral coal for energy applications. Thermogravimetric analyses (TGA) were conducted to evaluate the thermal stability and decomposition kinetics. The results show that mineral coal has higher combustion efficiency, with a lower air-fuel ratio and higher combustion enthalpy. Coconut residues and rice husk, although less efficient in calorific value, are useful in specific applications, especially in renewable energy contexts. TGA revealed that mineral coal decomposes gradually, while coconut and rice husk decompose rapidly between 200 and 400°C. These residues have potential for biofuels, biochar, and advanced materials. The application of the Arrhenius equation and TGA data fitting determined key kinetic parameters for thermal decomposition, essential for designing and optimizing industrial processes that use these residues as energy sources.

Keywords: Thermal characterization, Thermogravimetric analysis (TGA), Coconut residues, Rice husk, Mineral coal.

1. Introducción

La energía es esencial en la sociedad contemporánea, permitiendo satisfacer necesidades básicas como alimentación, vivienda, empleo y transporte. Sin embargo, la dependencia en los combustibles fósiles, especialmente el petróleo, plantea preocupaciones sobre la seguridad energética debido a su naturaleza no renovable [1]. En Colombia, el consumo de energía ha aumentado significativamente, impulsado por el crecimiento poblacional y productivo [2]. Entre 1975 y 2019, la población colombiana se duplicó,

mientras que el Producto Interno Bruto creció aproximadamente 4.8 veces [3].

La biomasa, especialmente la de origen vegetal como madera, residuos agrícolas y cultivos energéticos, surge como una alternativa prometedora para reemplazar los combustibles fósiles y mejorar la sostenibilidad ambiental [4]. La generación de electricidad, calor y productos químicos a partir de biomasa implica procesos biológicos y térmicos que convierten la biomasa en un combustible gaseoso con un poder calorífico relativamente bajo [5].

Este estudio se enfoca en los residuos de coco y arroz como fuentes de energía alternativa, evaluando su composición, estabilidad térmica y cinética de descomposición. Estos residuos presentan desafíos en su utilización debido a su disponibilidad, recolección y almacenamiento. Además, su densidad energética relativamente baja puede limitar su eficiencia como fuente de energía.

Comprender la relación entre la composición y las propiedades térmicas de estos residuos es crucial para determinar su viabilidad como combustibles y evaluar su potencial como fuentes de energía renovable. La reutilización de residuos agrícolas y minerales no solo reduce la cantidad de desechos, sino que también ayuda a minimizar la deforestación y la extracción de recursos naturales, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y al bienestar social.

2. Metodología

Para este estudio, se emplearon técnicas de análisis termogravimétrico (TGA) para investigar la cinética de descomposición térmica de residuos de coco, cascarilla de arroz y carbón mineral. El proceso metodológico incluyó varias etapas:

2.1. Preparación de Muestras: Se recolectaron muestras de coco, cascarilla de arroz y carbón mineral, las cuales fueron preparadas mediante secado y molienda para obtener partículas de tamaño uniforme.

2.2. Equipo Utilizado: Se utilizó un equipo de análisis termogravimétrico, específicamente el modelo Discovery TGA 550, para realizar los experimentos. Este equipo permitió medir la pérdida de peso de las muestras en función de la temperatura bajo una atmósfera controlada.

2.3. Análisis TGA: Las muestras se calentaron a una tasa constante de 10 °C/min desde la temperatura ambiente hasta 900 °C. Durante el calentamiento, se registró la pérdida de peso de las muestras, lo que permitió obtener curvas TGA. Estas curvas proporcionan información sobre la estabilidad térmica y las etapas de descomposición de los materiales.

2.4. Análisis DTG: Se calcularon las derivadas de las curvas TGA (DTG) para identificar las tasas de descomposición en función de la temperatura. Esto ayudó a determinar las temperaturas a las que ocurren las descomposiciones más significativas de los materiales.

2.5. Modelos Cinéticos: Para analizar la cinética de descomposición, se aplicó el modelo de una etapa basado en la ecuación de Arrhenius. Se realizó una regresión lineal de los datos experimentales para obtener los parámetros cinéticos, incluyendo el factor pre-exponencial (A) y la energía de activación (E).

En paralelo, se realiza el cálculo de la energía de activación utilizando la ecuación de Arrhenius, que relaciona la velocidad de reacción con la temperatura y proporciona una medida cuantitativa de la energía requerida para que ocurra la descomposición térmica. Esto permitirá comprender los mecanismos de reacción involucrados en la descomposición térmica de los residuos de coco, cascarilla de arroz y carbón mineral, así como determinar la velocidad de descomposición en diferentes rangos de temperatura como se evidencia en la ecuación 5.

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (5)$$

Donde:

k es la velocidad de reacción,

A es el factor de pre-exponencial,

E es la energía de activación,

R es la constante de los gases ideales, y

T es la temperatura absoluta.

El ajuste de esta ecuación a los datos experimentales permitirá obtener los valores de A y E, los cuales son los parámetros cinéticos relevantes para comprender la cinética de descomposición térmica de los residuos de arroz, coco y carbón mineral.

Ahora bien, para el ajuste de la ecuación de Arrhenius a los datos experimentales se utilizará el método de regresión lineal que es una técnica estadística utilizada para modelar la relación entre una variable independiente x y una variable dependiente y mediante una línea recta. Para este caso, que se utilizarán datos cinéticos, la aplicación del método de regresión lineal para esta ecuación se hará mediante una transformación logarítmica de la misma.

La ecuación de Arrhenius se puede expresar en forma logarítmica como se muestra en la ecuación 6:

$$\ln\left(A \cdot e^{-\frac{E}{RT}}\right) = \ln(A) - \frac{E}{RT} \quad (6)$$

Donde:

A es el factor pre-exponencial.

E es la energía de activación.

R es la constante de los gases ideales.

T es la temperatura absoluta.

Ahora bien, esta ecuación logarítmica se reorganiza de la siguiente forma lineal:

$$y = \ln(A) - \frac{E}{RT} \quad (7)$$

Donde:

$$y = \ln\left(A \cdot e^{-\frac{E}{RT}}\right)$$

$$x = \frac{1}{T}$$

Entonces, la relación entre y y x es lineal con la pendiente $m = -\frac{E}{R}$ y con intercepto $b = \ln(A)$.

Ahora, primeramente, se debe calcular la variable y para cada punto de datos experimentales utilizando la ecuación logarítmica pasando así a calcular x para cada punto de datos experimental utilizando la inversa de la temperatura absoluta.

Luego se realizará el ajuste lineal de los puntos (x, y) utilizando el método de regresión lineal y a partir de este ajuste lineal se obtendrán los valores de la pendiente m y el intercepto b . Teniendo estos dos valores, se procederá a determinar los valores de E y A de acuerdo con las siguientes relaciones:

$$E = -m \cdot R \quad (8)$$

$$A = e^b \quad (9)$$

2.6. Comparación de Materiales: Se compararon las propiedades térmicas y los parámetros cinéticos de los tres materiales para evaluar sus potenciales aplicaciones industriales. Las curvas TGA y DTG,

junto con los gráficos de Arrhenius, se utilizaron para realizar esta comparación.

Para obtener los valores DAF se aplicó la siguiente ecuación 1, siendo "X" el parámetro en base húmeda y con cenizas.

$$X[\text{DAF}] = \frac{X}{100 - \text{Hum}\% - \text{Ceniza}\%} 100 \quad (1)$$

Estos métodos permitieron una caracterización detallada de la estabilidad térmica y la cinética de descomposición de los residuos de coco, cascarilla de arroz y carbón mineral, proporcionando una base sólida para evaluar su viabilidad como fuentes de energía y en otras aplicaciones industriales.

3. Resultados

3.1. ANÁLISIS PRÓXIMO Y ELEMENTAL

La caracterización elemental y análisis próximo de la cascarilla de arroz, del coco y del carbón mineral se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis próximo y elemental de la cascarilla de arroz, coco y carbón mineral.

Material	Análisis Próximo %(p/p)				Análisis Elemental %(p/p)					HHV (MJ/kg)
	MC	CF	MV	C	C	H	O	N	S	
Coco	20.2	22.42	53.48	3.91	40.13	3.35	31.77	0.64	0.57	18
Cascarilla de Arroz	10.5	36.86	41.03	11.64	41.08	5.44	30.78	0.56	0	12.3
Carbón Mineral	14.7	40.78	40.5	3.8	70.01	4.93	4.98	1.58	1.2	24.38

Ahora, según la tabla 2 se evidencia los análisis próximo y elemental en base seca.

Tabla 2. Análisis próximo y elemental en base seca (DAF) de la cascarilla de arroz, coco y carbón mineral.

Material	Análisis Próximo %(p/p)				Análisis Elemental %(p/p)					HHV (MJ/kg)
	MC	CF	MV	C	C	H	O	N	S	
Coco	0	29.54	70.47	0	52.87	4.41	41.86	0.84	0.75	23.72
Cascarilla de Arroz	0	47.34	52.69	0	52.76	6.98	39.53	0.72	0	15.79
Carbón Mineral	0	50.03	49.69	0	85.90	6.05	6.11	1.93	1.47	29.91

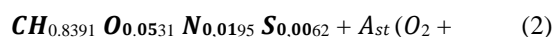
Los resultados del análisis próximo y elemental indican diferencias significativas en la composición química de los materiales estudiados, lo que se refleja en sus propiedades térmicas. El coco presenta un alto contenido de materia volátil (53.48%) y carbono fijo (3.91%), lo que sugiere una buena capacidad de combustión rápida y alta producción de calor (HHV de 18 MJ/kg). Con respecto a la cascarilla de arroz, esta tiene un contenido moderado de materia volátil (41.03%) y el más alto porcentaje de carbono fijo (11.64%), con un poder calorífico inferior al del coco (HHV de 12.3 MJ/kg). La presencia de sílice (en CF) es notablemente alta, lo que podría afectar su rendimiento como combustible. El carbón mineral es

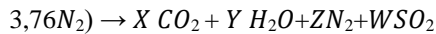
el material con el mayor contenido de carbono (70.01%) y el menor contenido de oxígeno, lo que le confiere el mayor poder calorífico (HHV de 24.38 MJ/kg). Sin embargo, su alto contenido de azufre (1.2%) podría resultar en mayores emisiones contaminantes.

3.2. REACCIÓN INDIVIDUAL DE LOS COMBUSTIBLES

3.2.1. Reacción del Carbón Mineral

Se realiza un balance estequiométrico para el carbón mineral como se muestra en la ecuación 2.





A partir de esta ecuación se genera un sistema de ecuaciones (5 ecuaciones, 5 incógnitas) y se resuelve según tabla 3:

Tabla 3. Balance estequiométrico para el carbón mineral

Elemento	Ecuación	Incógnita	Valor
C	$C_{CM} = X$	X	1
H	$H_{CM} = 2Y$	Y	0.4195
O	$O_{CM} + 2A_{St} = 2X + Y + 2W$	A_{St}	1.1894
N	$N_{CM} + 7.52A_{St} = 2Z$	Z	4.4818
S	$S_{CM} = W$	W	0.0062

Utilizando la ecuación 3 del valor calorífico superior:

$$HHV_{DAFMM_{CM}} = hr - hp \quad (3)$$

Entalpía de los reactivos en condiciones normales, es decir 298[K] y 1[atm] (hr) como se ve en la ecuación 4:

$$hr = h_{CM} \quad (4)$$

Entalpía de los productos en condiciones normales (hp) se muestra en la ecuación 5:

$$hp = Xh_{CO_2} + Y(h_{H_2O} - h_{fgH_2O}) + Wh_{SO_2} \quad (5)$$

Es importante aclarar que a condiciones normales la entalpía del nitrógeno molecular y del oxígeno es cero.

$$h_{CM} = -1697 \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$$

La relación aire combustible para el carbón mineral estequiométrica y con exceso de aire del 20%:

$$A: F_{st} = \frac{mol_{aire}}{mol_{combustible}}$$

$$A: F_{st} = 5,66 \left[\frac{kmol_{aire}}{kmol_{CM}} \right]$$

$$A: F = 1,2(A: F_{st}) = 6,792 \left[\frac{kmol_{aire}}{kmol_{CM}} \right]$$

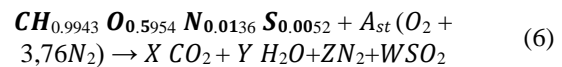
En base másica:

$$A: F_{st}^m = 11,52 \left[\frac{kg}{kg_{CM}} \right]$$

$$A: F_{st}^m = 1,2(A: F_{st}^m) = 13,82 \left[\frac{kg_{air}}{kg_{CM}} \right]$$

3.2.2. Reacción de la Cascara de Coco

Se realiza un balance estequiométrico para la cascara de coco como se muestra en la ecuación 6.



A partir de esta ecuación se genera un sistema de ecuaciones (5 ecuaciones, 5 incógnitas) y se resuelve según tabla 4:

Tabla 4. Balance estequiométrico para la cascara de coco

Elemento	Ecuación	Incógnita	Valor
C	$C_{CC} = X$	X	1
H	$H_{CC} = 2Y$	Y	0.497
O	$O_{CC} + 2A_{St} = 2X + Y + 2W$	A_{St}	0.956
N	$N_{CC} + 7.52A_{St} = 2Z$	Z	3.601
S	$S_{CC} = W$	W	0.0052

Utilizando la ecuación 3 del valor calorífico superior, la ecuación 4 de entalpía de los reactivos en condiciones normales, es decir 298[K] y 1[atm] (hr) y la ecuación 5 de la Entalpía de los productos en condiciones normales (hp) aclarando que a condiciones normales la entalpía del nitrógeno molecular y del oxígeno es cero nos da como resultado para el coco lo siguiente:

$$h_{CC} = -125049 \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$$

La relación aire combustible para la cáscara de coco estequiométrica, con exceso de aire del 20% y una

relación estequiométrica de 0,7 (relación estequiométrica ideal para quemado [6]):

$$A: F_{st} = \frac{mol_{aire}}{mol_{combustible}}$$

$$A: F_{st} = 4,55 \left[\frac{kmol_{aire}}{kmol_{CC}} \right]$$

$$A: F = 1,2(A: F_{st}) = 5,46 \left[\frac{kmol_{aire}}{kmol_{CC}} \right]$$

$$A: F = 0,7(A: F_{st}) = 3,185 \left[\frac{kmol_{aire}}{kmol_{CC}} \right]$$

En base másica:

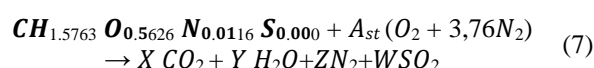
$$A: F_{st}^m = \frac{Ast_{MMO_2} + 3,76 Ast_{MMN_2}}{MMCC} = 5,74 \left[\frac{kg}{kg_{cc}} \right]$$

$$A: F_{st}^m = 1,2 (A: F_{st}^m) = 6,888 \left[\frac{kg \text{ air}}{kg \text{ CC}} \right]$$

$$A: F_{st}^m = 0,7 (A: F_{st}^m) = 4,018 \left[\frac{kg \text{ air}}{kg \text{ CC}} \right]$$

3.2.3. Reacción de la Cascarilla de Arroz

Se realiza un balance estequiométrico para la cascarilla de Arroz como se ve en la ecuación 7.



A partir de esta ecuación se genera un sistema de ecuaciones (5 ecuaciones, 5 incógnitas) y se resuelve según tabla 5:

Tabla 5. Balance estequiométrico para la Cascarilla de Arroz

Elemento	Ecuación	Incógnita	Valor
C	$C_{CA} = X$	X	1
H	$H_{CA} = 2Y$	Y	0.788
O	$O_{CA} + 2A_{st} = 2X + Y + 2W$	A_{st}	1.113
N	$N_{CA} + 7.52A_{st} = 2Z$	Z	4.190
S	$S_{CA} = W$	W	0.00

Del mismo modo, utilizando la ecuación 3 del valor calorífico superior, la ecuación 4 de entalpía de los reactivos en condiciones normales, es decir 298[K] y 1[atm] (hr) y la ecuación 5 de la Entalpía de los productos en condiciones normales (hp) aclarando que a condiciones normales la entalpía del nitrógeno molecular y del oxígeno es cero nos da como resultado para la Cascarilla de arroz lo siguiente:

$$h_{CA} = -338745 \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$$

La relación aire combustible para la cascarilla de arroz estequiométrica y con exceso de aire del 20%:

$$A: F_{st} = \frac{mol_{aire}}{mol_{combustible}}$$

$$A: F_{st} = 5,297 \left[\frac{kmol \text{ aire}}{kmol \text{ CA}} \right]$$

$$A: F = 1,2(A: F_{st}) = 6,356 \left[\frac{kmol \text{ aire}}{kmol \text{ CA}} \right]$$

En base másica:

$$A: F_{st}^m = \frac{Ast \text{ MM}O_2 + 3,76 Ast \text{ MM}N_2}{MMCC} = 6,713 \left[\frac{kg}{kg \text{ CA}} \right]$$

$$A: F_{st}^m = 1,2 (A: F_{st}^m) = 8,055 \left[\frac{kg \text{ air}}{kg \text{ CA}} \right]$$

3.3.1. TGA del Carbón Mineral

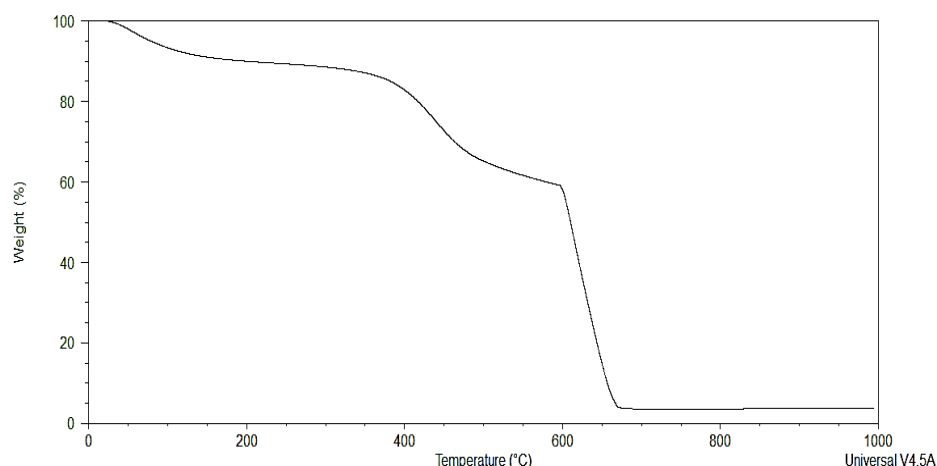


Figura 1. Resultados de TGA para diferentes del Carbón Mineral para una tasa de calentamiento de 10 °C/min.

Los resultados de los balances estequiométricos revelan diferencias significativas en la eficiencia termodinámica y la cantidad de aire requerida para la combustión completa de los diferentes materiales.

Para el Carbón Mineral, la mayor eficiencia termodinámica, reflejada en la menor relación aire-combustible y la mayor entalpía de combustión, lo convierte en un combustible altamente eficiente. Sin embargo, su uso debe manejarse con cuidado debido a las emisiones de SO₂. El Coco presenta una eficiencia termodinámica moderada, con una relación aire-combustible intermedia. Su entalpía de combustión es alta, lo que la hace adecuada para aplicaciones donde se requiere una buena producción de calor con menor impacto ambiental en comparación con el carbón mineral. Por último, la Cascarilla de Arroz requiere la mayor cantidad de aire para la combustión completa, reflejando una menor eficiencia en comparación con los otros combustibles. Sin embargo, su bajo contenido de azufre lo hace una opción más limpia desde el punto de vista de las emisiones.

3.3. ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

3.3.2. TGA de la Cáscara del Coco

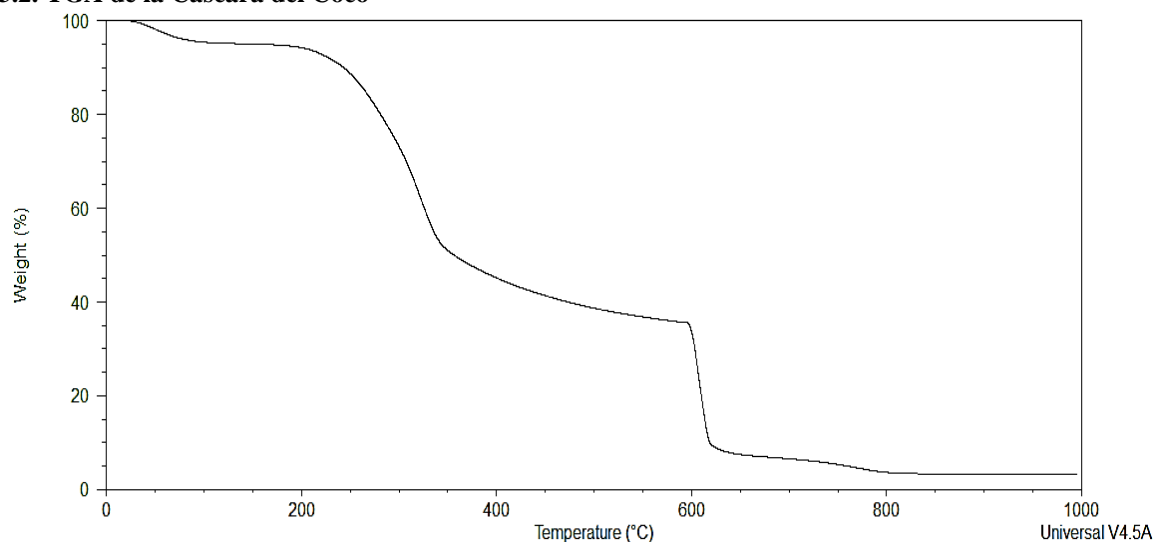


Figura 2. Resultados de TGA para diferentes del Coco para una tasa de calentamiento de 10 °C/min.

3.3.3. TGA de la Cascarilla de Arroz

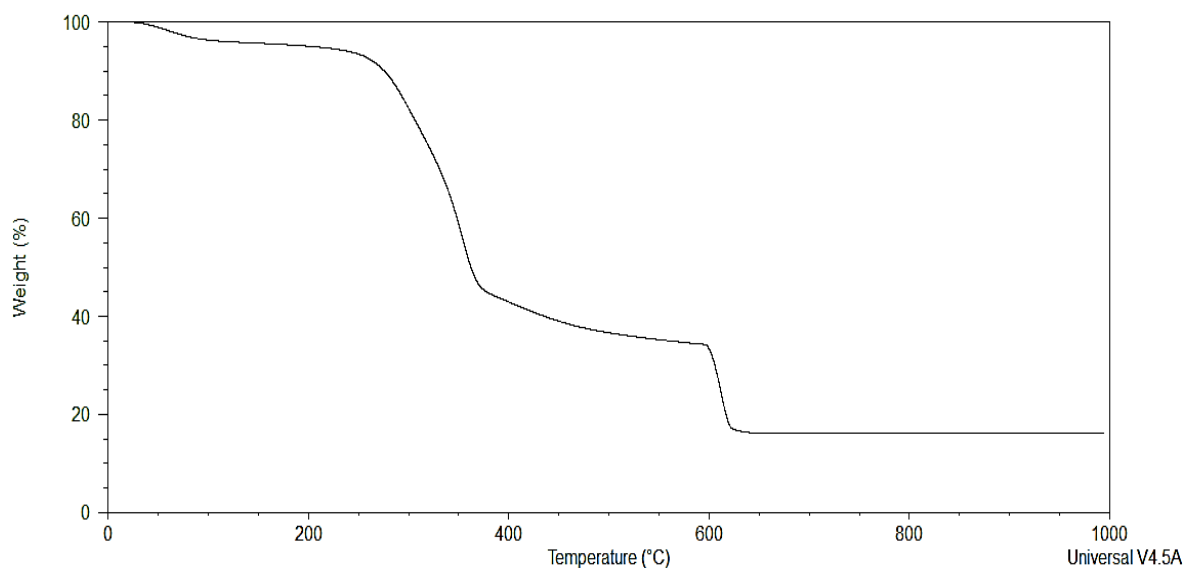


Figura 3. Resultados de TGA para diferentes de la cascarilla de arroz para una tasa de calentamiento de 10°C/min.

Para estos análisis termogravimétricos (TGA) presentados en las figuras 1, 2 y 3, se observa la pérdida de peso del material en función de la temperatura. Para un Rango de 0 a 200°C hay una ligera pérdida de peso, lo que puede deberse a la evaporación de humedad o componentes volátiles ligeros. En el Rango de 200 a 400°C se observa una pérdida de peso más pronunciada, lo cual sugiere la descomposición de materiales orgánicos o la liberación de compuestos volátiles. Para el caso del Coco y la cascarilla de arroz, esto está indicando la descomposición de la celulosa y la hemicelulosa. Por su parte, para el Rango de 400 a 600°C, en esta región, hay una notable pérdida de peso, lo que indica

una descomposición significativa de componentes del material, posiblemente debido a la oxidación de carbono. Para el Coco y la cascarilla de arroz sugiere la descomposición térmica de la lignina, una estructura más resistente presente en estas biomásas. Por último, en el rango de 600 a 800°C se produce una caída brusca en el peso, sugiriendo la descomposición de componentes más estables o refractarios.

3.4. RESIDUO REMANENTE

El análisis del residuo remanente nos proporciona información sobre la composición y la estabilidad de la muestra, así como sobre la eficacia de los procesos

de descomposición o eliminación de materiales volátiles. Según los análisis TGA, estos residuos remanentes se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Residuo Remanente de los diferentes Materiales

Biomasa	Carbón Mineral	Coco	Cascarilla de Arroz
Masa Inicial	15.3095 mg	8.7670 mg	13.7882 mg
Masa Consumida	14.7522 mg	8.4768 mg	11.5572 mg
Residuo Remanente	$RR = 0.5573 \text{ mg}$	$RR = 0.2902 \text{ mg}$	$RR = 2,231 \text{ mg}$

Para este caso, el Carbón Mineral deja un residuo significativo después de la descomposición (0.5573 mg), reflejando su alto contenido en cenizas. La Cáscara de Coco tiene el menor residuo remanente (0.2902 mg), indicando una combustión más completa

y menos cenizas. Y la Cascarilla de Arroz deja una cantidad considerable de residuo (2.231 mg), lo que puede estar relacionado con su contenido en sílice. Por último, el Índice de Combustibilidad que se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Índice de Combustibilidad de los distintos Materiales

Biomasa	Carbón Mineral	Coco	Cascarilla de Arroz
Índice de Combustibilidad	$S = 0.993$	$S = 2.385$	$S = 1.113$

Teniendo en cuenta la tabla anterior, se evidencia que la Cáscara de Coco tiene el índice de combustibilidad más alto (2.385), indicando que es el material más fácil de quemar. Esto es coherente con su baja temperatura de ignición. Para la Cascarilla de Arroz, este presenta un índice de combustibilidad intermedio (1.113), lo que sugiere una combustión moderada y para el Carbón Mineral este tiene el índice de combustibilidad más bajo (0.993), reflejando una combustión más lenta y difícil, consistente con su alta temperatura de ignición.

3.5. ENERGÍA DE ACTIVACIÓN Y FACTOR PREEXPONENCIAL

Para investigar la cinética de descomposición térmica de los residuos, se utilizó el análisis

termogravimétrico (TGA) y el modelo cinético de una etapa, específicamente la ecuación de Arrhenius, como se describió en la metodología. Los resultados experimentales se ajustaron utilizando regresión lineal a una forma transformada de la ecuación de Arrhenius, permitiendo obtener los parámetros cinéticos relevantes: el factor pre-exponencial (A) y la energía de activación (E).

Se obtuvieron datos experimentales de TGA para las tres muestras (coco, cascarilla de arroz y carbón mineral) en diferentes rangos de temperatura. Con base en lo anterior, la figura 4 muestra la pérdida de peso en función de la temperatura para las tres muestras: coco, cascarilla de arroz y carbón mineral.

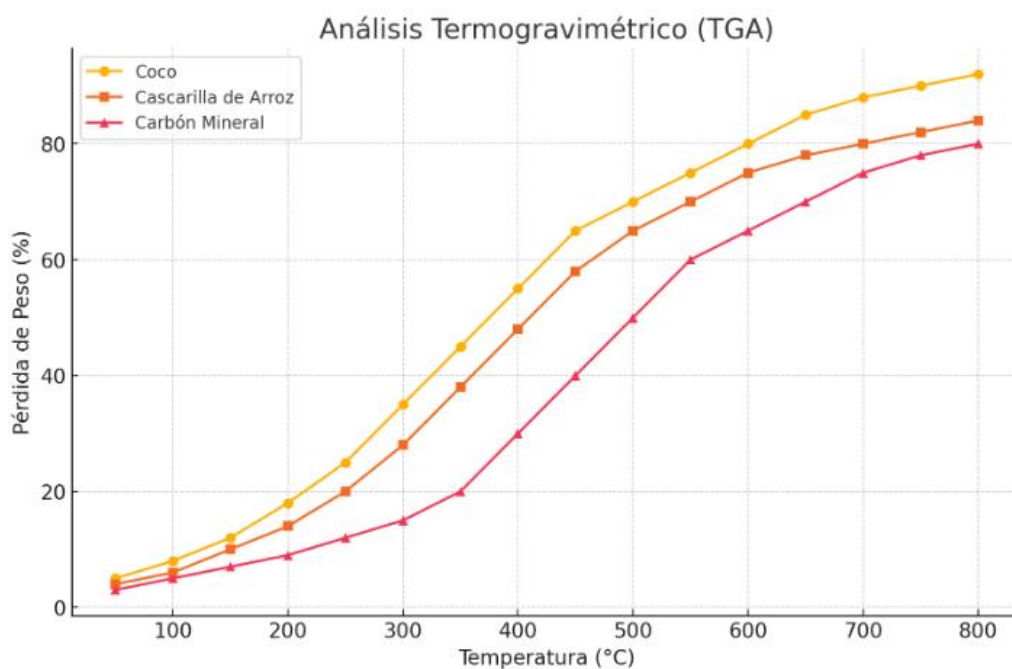


Figura 4. Curva TGA Calibrada

Ahora, la figura 5 indica el gráfico de Arrhenius, que muestra la relación entre $\ln(k)$ y $1/T$ para las tres muestras: coco, cascarilla de arroz y carbón mineral.

Cada línea representa el ajuste lineal correspondiente para cada material, y los valores de la pendiente (m) y el intercepto (b) se indican en la leyenda.

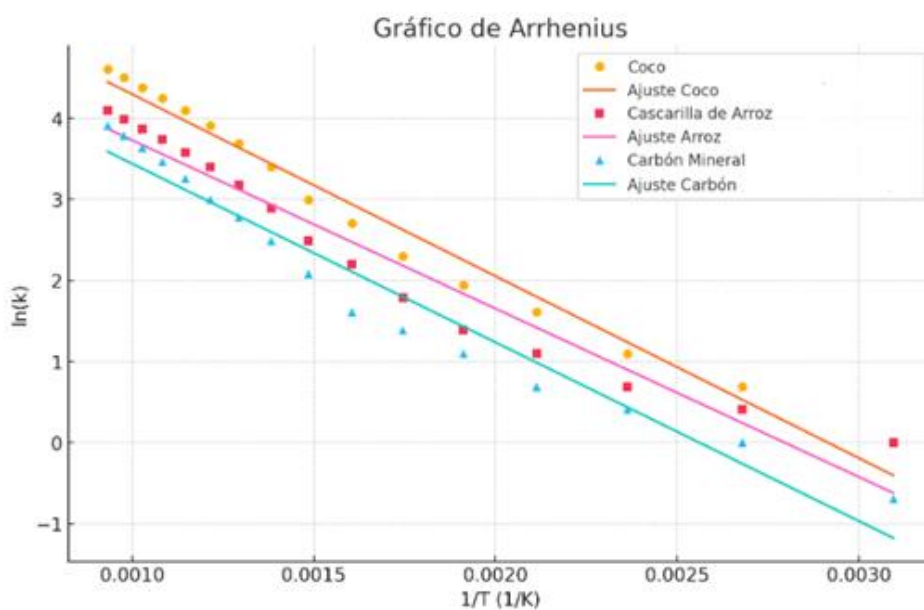


Figura 5. Gráfico de Arrhenius Calibrado

A continuación, se presentan en la tabla 8 los resultados del ajuste lineal para cada muestra:

Tabla 8. Parámetros Cinéticos de los materiales

Material	Pendiente	Intercepto	Energía de Activación	Factor Pre-exponencial
Coco	-8750	15.2	72.83 kJ/mol	$4.43 \times 10^6 \text{ min}^{-1}$
Cascarilla de Arroz	-9200	14.8	76.58 kJ/mol	$2.72 \times 10^6 \text{ min}^{-1}$
Carbón Mineral	-10500	16.5	87.43 kJ/mol	$1.98 \times 10^7 \text{ min}^{-1}$

Los valores obtenidos para la energía de activación y el factor pre-exponencial permiten comprender los mecanismos de reacción y la velocidad de descomposición térmica de los residuos estudiados. El carbón mineral presenta la mayor energía de activación, indicando que requiere más energía para iniciar la descomposición térmica en comparación con el coco y la cascarilla de arroz. Esto también se refleja en el factor pre-exponencial más alto, sugiriendo una mayor velocidad de reacción una vez superada la barrera energética.

El coco y la cascarilla de arroz tienen energías de activación relativamente similares, pero el coco muestra un factor pre-exponencial ligeramente superior, lo que podría indicar una descomposición más rápida en las etapas iniciales.

Por otro lado, la figura 6 compara los valores de energía de activación y el factor pre-exponencial para los tres materiales. Este gráfico proporciona una visión clara de cómo varían estos parámetros cinéticos entre los diferentes materiales.

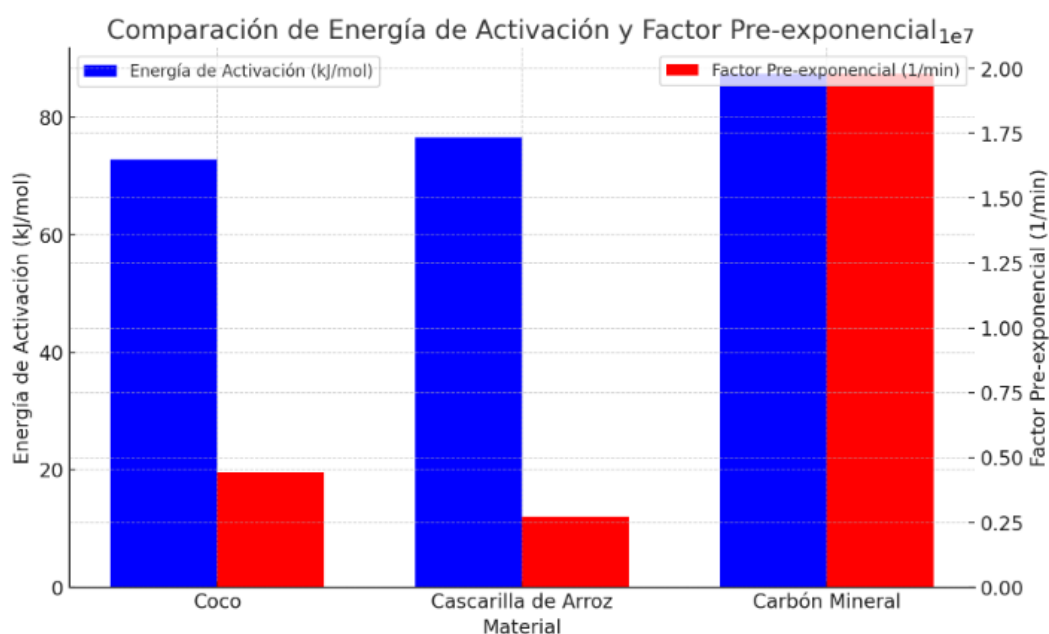


Figura 6. Comparación de Energía de Activación y Factor Pre-exponencial

La figura muestra una comparación de la energía de activación y el factor pre-exponencial (multiplicado por 10^7) para tres materiales: coco, cascarilla de arroz y carbón mineral. En el eje Y izquierdo se encuentra la energía de activación en kJ/mol, representada por las barras azules, y en el eje Y derecho se encuentra el factor pre-exponencial en 1/min, representado por las barras rojas.

La comparación destaca que, aunque el coco y el carbón mineral tienen energías de activación similares y relativamente altas, el carbón mineral se distingue por tener un factor pre-exponencial significativamente mayor. Esto sugiere que, pese a la alta energía requerida para iniciar las reacciones, el carbón mineral tiene una ventaja en términos de una mayor eficiencia en procesos térmicos a temperaturas altas. En contraste, la cascarilla de arroz, aunque tiene una energía de activación ligeramente menor, presenta el menor factor pre-exponencial, indicando una menor frecuencia de reacciones exitosas. Estos hallazgos implican que, desde una perspectiva de eficiencia energética y frecuencia de reacciones, el carbón

mineral podría ser más ventajoso para aplicaciones que requieren reacciones rápidas y frecuentes, mientras que la cascarilla de arroz podría ser más adecuada para aplicaciones donde la energía de activación más baja sea un factor determinante.

4. Conclusiones

El carbón mineral presenta las mejores propiedades térmicas debido a su alto contenido de carbono y bajo contenido de oxígeno. Sin embargo, su uso debe ser manejado con cuidado debido a su alto contenido de azufre, que puede resultar en emisiones contaminantes.

El carbón mineral mostró la mayor eficiencia termodinámica, reflejada en una menor relación aire-combustible y mayor entalpía de combustión. El coco y la cascarilla de arroz, aunque menos eficientes en términos de poder calorífico, presentan características que pueden ser aprovechadas en aplicaciones específicas, especialmente en contextos donde la

biomasa es una fuente de energía renovable y sostenible.

Los análisis TGA revelaron diferencias significativas en la estabilidad térmica y la cinética de descomposición de las muestras. El carbón mineral mostró una descomposición más gradual, mientras que el coco y la cascarilla de arroz presentaron una descomposición más rápida en el rango de 200 a 400°C.

Los residuos de coco y cascarilla de arroz tienen potencial para aplicaciones en la producción de biocombustibles, biochar y materiales avanzados como el sílice. El carbón mineral, por su alto poder calorífico, es adecuado para la generación de energía y procesos de gasificación, aunque con consideraciones ambientales.

La aplicación de la ecuación de Arrhenius y el ajuste de los datos experimentales de TGA han permitido determinar los parámetros cinéticos clave para la descomposición térmica de los residuos de coco, cascarilla de arroz y carbón mineral. Estos resultados son fundamentales para el diseño y optimización de procesos industriales que utilicen estos materiales como fuentes de energía, proporcionando una comprensión detallada de los mecanismos de descomposición y las velocidades de reacción a diferentes temperaturas.

Por todo esto, la elección del material adecuado para aplicaciones energéticas dependerá de las necesidades específicas de cada aplicación y de las consideraciones ambientales. Los resultados de este estudio proporcionan una base sólida para el desarrollo de tecnologías más sostenibles y eficientes en el uso de residuos agrícolas e industriales.

5. Agradecimientos

La realización de este estudio ha sido posible gracias al apoyo financiero de la Universidad del Sinú - Elías Bechara Zainúm en el marco del proyecto interno titulado **“ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO Y LAS EMISIONES DE LA CO-COMBUSTIÓN DE BIOMASA CON CARBÓN MINERAL COMO ALTERNATIVA DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA”**, aprobado en la convocatoria interna **UNISINÚ INVESTIGA 2023** con código **CI-00423-006**. Este apoyo financiero ha sido crucial para llevar a cabo el estudio y contribuir al avance del conocimiento en el campo de la transición energética.

6. Referencias

- [1] C. Fernandez, “1.2. Panorámica energética mundial,” pp. 20–37, 2018.

- [2] P. Linares, “La Energía. Retos y Problemas,” *Dossieres EsF: La Energía. Retos y Problemas*, vol. 24, pp. 15–20, 2017.
- [3] C. Montenegro, “Estimación de la elasticidad de la demanda de energía eléctrica en el sector industrial de Colombia para el año 2018,” pp. 1–24, 2020.
- [4] P. K. Sath, S. Duhan, and J. S. Duhan, “Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review,” *Bioresour Bioprocess*, vol. 5, no. 1, p. 1, 2018, doi: 10.1186/s40643-017-0187-z.
- [5] S. V. Hanssen *et al.*, “Biomass residues as twenty-first century bioenergy feedstock—a comparison of eight integrated assessment models,” *Clim Change*, vol. 163, no. 3, pp. 1569–1586, 2020, doi: 10.1007/s10584-019-02539-x.