

ESTUDIO TERMOGRAVIMETRICO DE LA GENERACIÓN DE CALOR A PARTIR DEL COPROCESAMIENTO DE CARBON Y BIOMASA

Data de submissão: 08/02/2024

Data de aceite: 01/03/2024

Mario Jozef Cutimbo Quispe

Universidad Nacional de Juliaca, Facultad de Ingeniería de procesos industriales, Juliaca – Perú
<https://orcid.org/0009-0000-1291-9709>

José Luis Pineda Tapia

Universidad Nacional de Juliaca, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Juliaca – Perú
<https://orcid.org/0000-0001-9498-1169>

Yazmin Yaneth Agamez-Pertuz

Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Química.
<https://orcid.org/0000-0003-3326-4603>

Eduard Ricardo Romero Malagón

Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Química.
<https://orcid.org/0000-0002-5065-9116>

R. Alfredo Palomino Infante

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-6453-586X>

Roxana Tacuri Robles

Universidad Nacional de Juliaca, Facultad de Ingeniería de procesos industriales, Juliaca – Perú
<https://orcid.org/0000-0002-0056-7109>

Godofredo Huanca Chambi

Universidad Nacional de Juliaca, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Juliaca – Perú
<https://orcid.org/0000-0003-0107-8056>

RESUMEN: la continua búsqueda de alternativas más eficientes en el aprovechamiento de los recursos energéticos a nivel industrial, ha permitido la implementación de diferentes propuestas como el co-procesamiento de combustibles para la generación y aprovechamiento de calor. En este estudio, se realizó una evaluación termogravimétrica de cinco muestras de carbón pertenecientes a las categorías bituminosas de los departamentos colombianos de La Guajira, Cundinamarca y Boyacá, los cuales se caracterizaron mediante análisis proximal, elemental, índice de hinchamiento libre y potencia, según Normas ASTM (ref). El bagazo de caña de azúcar también fue evaluado mediante análisis proximal, contenido de azufre y composición lignocelulósica. Estos materiales fueron sometidos a un análisis termo gravimétrico (TGA) en atmósfera de aire para seleccionar el combustible con las mejores características para el proceso

de combustión. Complementariamente se determinaron parámetros adicionales tales como la temperatura de combustión (T_m), la velocidad máxima a la que se obtiene la mayor conversión, así como las regiones en las que los principales eventos relacionados que se presentan en condiciones no isotérmicas. Los resultados muestran que los carbones de mejor comportamiento en el proceso de combustión son aquellos que contienen alto contenido de materia volátil, bajo contenido de cenizas y que no tengan propiedades aglomerantes, en tal sentido la muestra A-10, proveniente de la Guajira es el carbón más apropiado y de mejores características, ya que presenta condicionantes fisicoquímicas con valores de 40.16 % m, slmm de MV; 5,14 %m, bs de CZ y un índice de hinchamiento libre de $\frac{1}{2}$, constituyendo una clasificación de material no aglomerante, así mismo se concluye que el análisis TGA es una herramienta rápida y versátil para evaluar el comportamiento de los combustibles, durante el co-procesamiento carbón/biomasa, para su selección final.

PALABRAS-CLAVE: carbón-biomasa, co-procesamiento, generación de calor, Termogravimétrico.

THERMOGRAVIMETRIC STUDY OF HEAT GENERATION FROM THE COPROCESSING OF COAL AND BIOMASS

ABSTRACT: The continuous search for more efficient alternatives in the use of energy resources at industrial processes has allowed the implementation of different proposals such as the co-processing of fuels for the generation and use of heat. In this study, a thermogravimetric evaluation was carried out on five coal samples belonging to the bituminous categories from the Colombian departments of La Guajira, Cundinamarca and Boyacá, which were characterized by proximal, elemental analysis, free swelling index and power, according to Standards. ASTM (ref). Sugarcane bagasse was also evaluated by proximate analysis, sulfur content and lignocellulosic composition. These materials were subjected to a thermogravimetric analysis (TGA) in an air atmosphere to select the fuel with the best characteristics for the combustion process. Additionally, additional parameters were determined such as the combustion temperature (T_m), the maximum speed at which the highest conversion is obtained, as well as the regions in which the main related events occur under non-isothermal conditions. The results show that the coals with the best behavior in the combustion process are those that contain a high content of volatile matter, a low content of ash and that do not have agglomerating properties. In this sense, sample A-10, from La Guajira, is the more appropriate coal with better characteristics, since it presents physicochemical conditions with values of 40.16% m, slmm of MV; 5.14 %m, bs of CZ and a free swelling index of $\frac{1}{2}$, constituting a classification of non-binding material, it is also concluded that the TGA analysis is a quick and versatile tool to evaluate the behavior of fuels, during the coal/biomass co-processing, for final selection.

KEYWORDS: carbon-biomass, co-processing, heat generation, thermogravimetric.

INTRODUCCIÓN

La estructura energética, depende en gran parte de los combustibles fósiles generando grandes problemas en un futuro cercano, relacionados con el suministro y con las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), (ERH, 1979) y (Zhao, et al. 2013); por ello existe la imperiosa necesidad de encontrar otros sistemas de producción de energía (Essenhigh, 1979) (Gani, *et al.* 2005). La biomasa es neutra en emisión de dióxido de carbono (CO_2) (Scala, *et al.*, 2006), por tanto, es una alternativa atractiva para mitigar la generación de este gas contaminante y reducir el consumo de combustibles fósiles (U.U.P.M.E, 2015) (Porteiro, *et al.*, 2012); sin embargo, sola no puede suplir las necesidades energéticas mundiales (NussBaumer, 2003) (Smith, 1981).

El proceso de co-combustión de carbón y biomasa en industrias y centrales térmicas puede ser una alternativa para dar flexibilidad a los sistemas energéticos sustituyendo parcialmente el carbón (Gatterning, 2015) (De Diego, et al., 2002). La tecnología de co-combustión es un proceso en el cual la interacción térmica y química entre la biomasa (en este caso el bagazo de la caña de azúcar), el carbón y la mezcla oxidante permite producir energía sostenible (Diaz, 2012)

Dada la complejidad de los combustibles sólidos es necesario definir sus características químicas y físicas que son determinantes en el proceso de combustión (Manuel, 2008) (Cadena,2015). Entre estas características se tienen el análisis próximo, elemental, poder calorífico e índice de hinchamiento libre para el caso del carbón y para la biomasa los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina (Zhang, et al., 1992). Sin embargo, el análisis termogravimétrico (TGA), proporciona una evaluación rápida del combustible mediante la determinación del tiempo de combustión total, de las temperaturas de inicio, finalización y máxima combustión (Sis, 2007) (Jing, 2014). La técnica consiste en determinar la variación de peso con la temperatura bajo una rampa de calentamiento, o con respecto al tiempo para procesos isotérmicos (Barrera, 2007).

Como un primer acercamiento para examinar y seleccionar el tipo de carbón y de biomasa más adecuados para un proceso de co-combustión, en este trabajo se caracterizaron cinco carbones de Colombia de diferentes zonas y una biomasa residual (bagazo de caña de azúcar) acondicionados para un co-procesamiento y la posterior determinación de los parámetros termogravimétricos a partir del perfil de combustión de cada material.

MATERIALES Y METODOS

Carbón y biomasa

Para el presente estudio se seleccionaron carbones de la Guajira, Cundinamarca y Boyacá, departamentos conocidos por poseer abundantes reservas de carbones de diferentes calidades. Las muestras fueron suministradas por el Laboratorio de Investigación en Combustibles y Energía (LICE), que cuenta con un banco de muestras debidamente selladas y almacenadas. La biomasa es bagazo de caña de azúcar proveniente de la zona de Villeta (Cund.) La nomenclatura empleada se presenta en el Tabla 1

Departamento	Muestra	Codificación
La Guajira	Cerrejón	A – 10
	Cerrejón	A – 6
	Cerrejón	A – 3
Boyacá	Mina “El Pajonal”	B – 6
Cundinamarca	Mina “El silencio”	C – 16
Cundinamarca	Bagazo de caña de azúcar	B

Tabla 1 Identificación de las muestras

Preparación de las muestras

La preparación de las muestras de carbón se realizó por trituración, molienda y tamizado en una trituradora de mandíbulas Preiser Scientific Inc que lleva hasta un tamaño de partícula de 10 mm y un pulverizador Holmes Bros Technologies localizados en el LICE. El tamizado se realizó usando un agitador automático y la serie de tamices Tyler de mallas 50, 60, 70, 100, 200 de acuerdo con las normas ASTM D 410 y D 43.

El bagazo de caña de azúcar (biomasa) se secó al aire y se sometió a reducción de tamaño en un molino de cuchillas RETSCH SM 100, del laboratorio de productos naturales de la Facultad Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia.

Métodos de análisis

El análisis próximo de los carbones y la biomasa se realizó aplicando las normas ASTM D2013, D5142, D3172 y D7582 en un equipo Automatic Multiple Sample Thermogravimetric Analyzer TGA – 2000, NAVAS Instruments. Para la determinación del poder calorífico se emplearon las normas ASTM D2013, D3177 y D5865 en un calorímetro PARR 1261.

Para la determinación del índice de hinchamiento libre, se utilizó la norma ASTM D720.

El análisis elemental (C, N, H, S y O) se determinó acorde con las normas ASTM D3176, D4239, D5016 y D5373 en los equipos LECO Sulfur Determinator SC-132 y el analizador CHN de LECO 600 para los elementos carbono, hidrógeno y nitrógeno. El oxígeno se obtuvo por diferencia como se describe en la norma ASTM D3177.

Los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina se determinaron en el laboratorio de nutrición animal de la Universidad Nacional de Colombia.

Análisis termogravimétrico

El analizador empleado es Mettler Toledo TGA/DSC 1, que opera con un software STAR® versión 11.0, que contiene un controlador de gases GC 200 y un robot para alimentación de muestras disponible en el LICE. Los ensayos se trabajaron con 5 mg de muestra, entre 25 y 1000 °C en aire enriquecido en oxígeno (30%O₂ /70%N₂) en un flujo de 30 ml/min y una velocidad de calentamiento 10°C/min.

RESULTADOS Y DISCUSION

Métodos de análisis

El análisis próximo da información valiosa del comportamiento durante el calentamiento del carbón y la biomasa. Los parámetros que se determinan son: humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo por diferencia que se muestran en la tabla 2.

El contenido de la humedad es fundamental en un combustible porque afecta negativamente los procesos de transporte, molienda y combustión. De la tabla 2. se observa que los materiales tienen contenidos de humedad diferentes destacándose la biomasa y el carbón A-3 con un contenido de humedad relativamente alto. Sin embargo, la biomasa, material con alto contenido de humedad, disminuyó su contenido hasta 6.36% en condiciones de laboratorio.

Muestra	Humedad (%)	CZ (%m, bs)	MM (%m,bs)	MV (%m, slmm)	FC (%m, slmm)	PC BTU/lb (%m, bhmm)
A-10	4.38	5.14	1.65	40.16	59.84	12885
A - 6	3.96	5.74	1.42	37.55	62.45	14311
A - 3	7.19	15.97	17.08	39.83	60.17	13209
B - 6	0.90	4.69	5.93	25.53	74.47	15282
C - 16	0.74	15.04	14.44	20.79	79.21	15833
B	6.36	3.87	4.25	83.80	16.20	6200

Tabla 2. Análisis proximal de combustibles y biomasa. Donde: MV: materia volátil, CZ: Cenizas, CF: Carbón fijo, PC: Poder calorífico, %m: porcentaje en masa, bs: base seca, bsmm: base seca libre de materia mineral, bhmm: base húmeda libre de materia mineral.

El contenido de materia volátil establece las características de combustión cuando se calienta el carbón y la biomasa. Después del secado se inicia la desvolatilización o pirólisis liberándose gases compuestos principalmente de óxidos de carbono, vapor de agua e hidrocarburos ligeros que al encontrar una atmósfera rica en oxígeno reacciona en fase homogénea, siendo un indicador de la reactividad. A partir de los datos de la tabla 2 se infiere que se dispone de materiales con diferente reactividad. Entre los carbones existen diferencias hasta un 100% de materia volátil lo cual será útil para el estudio de su comportamiento en la combustión. El contenido de materia volátil del bagazo es 80.23% y este alto contenido puede ser beneficioso en el proceso de co-combustión contribuyendo a incrementar la velocidad de reacción.

El contenido de cenizas afecta el proceso de combustión, reduciendo la capacidad de liberar energía en el quemado e incrementa la pérdida de carbono y los costos de manipulación del residuo. Además, un alto contenido de cenizas es perjudicial porque no deja que el oxígeno pase a través de esa capa hasta la parte carbonosa que está dentro de la partícula ocasionando inquemados en la ceniza. En este sentido, los materiales B, A-10, A-6 y B-6, tienen el menor contenido de ceniza, en tanto que los carbones A-3 y C-16 tienen un alto contenido.

El carbono fijo junto con la materia volátil representa la parte combustibles del carbón y biomasa, un alto contenido de carbono fijo indica mayor presencia de carbonizado y la combustión de éste es la etapa controlante del proceso. Por lo tanto, los materiales C-16, B-6 podrían mostrar mayor tiempo de reacción.

El poder calorífico representa la energía química almacenada en el material que es liberada en la combustión. Las muestras B-6, C-16, tienen el mayor poder calorífico que corresponde con el mayor contenido de carbono fijo y los más bajos contenidos de materia volátil lo cual puede incidir en el proceso combustión. La biomasa presenta un poder calorífico aceptable a pesar de su bajo contenido de carbono fijo.

Algunos carbones presentan propiedades aglomerantes que no son deseables en el proceso de generación de calor si se utilizan reactores y calderas de lecho fijo o parrillas. Esta propiedad se determina mediante el índice de hinchamiento como se muestra en la tabla 3. Los carbones A-10 y A-3 son no aglomerantes, mientras que A-6, es medianamente aglomerante y los demás son fuertemente aglomerantes.

Procedencia	Muestra	Índice de hinchamiento libre	Clasificación
La Guajira	A – 10	½	No Aglomerante
	A – 6	2½	Medianamente Aglomerante
	A – 3	½	No Aglomerante
Boyacá	B – 6	9	Fuertemente Aglomerante
Cundinamarca	C – 16	9	Fuertemente Aglomerante

Tabla 3. Clasificación de carbones según índice de hinchamiento libre

El análisis elemental proporciona información de los elementos C, H, N, O y S. Los resultados de la tabla 4 indican que el bajo contenido de azufre y nitrógeno (<1%) de las muestras es una ventaja de estos materiales por la baja emisión de NOx y SOx.

Muestra	Carbono (m/m)%	Hidrógeno (m/m)%	Nitrógeno (m/m)%	Azufre (m/m)%	Oxígeno (m/m)%
A – 10	74.70	5.88	2.79	0.45	11.12
A – 6	81.50	5.69	1.43	0.64	10.74
A – 3	64.61	5.09	1.43	0.67	28.20
B – 6	85.37	5.01	1.47	0.55	7.60
C – 16	78.40	4.32	1.67	0.88	14.73
B*	49.27	5.67	0.58	0.13	42.87

Tabla 4 Análisis elemental B: El C, H, N y O por Escalante et al. (2011) y el azufre. Fuente: resultados de LICE

En la Tabla 5 se presenta la composición del bagazo de caña de azúcar, observándose que su contenido de celulosa y hemicelulosa es del 69.5%, mientras que la lignina es del 7.0%.

Componentes	(m/m, bs)%
Celulosa	40.2
Hemicelulosa	29.3
Lignina	7.0
Ceniza	3.0
Proteína cruda	2.1

Tabla 5 Composición del bagazo de caña de azúcar. bs: Base seca, m: masa

Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico se empleó para caracterizar y observar el comportamiento de combustión de los materiales. Las curvas TGA de la figura 1a muestran la pérdida de masa con respecto al tiempo y, la figura 1b la primera derivada o perfil de combustión. Se observa que el carbón A-3, presenta una mayor pérdida de masa en la etapa de secado atribuible a su alto contenido de humedad; sin embargo, en la etapa final muestra la menor pérdida de masa asociada con su alto contenido de cenizas que puede interferir con el acceso del oxígeno a los sitios activos de la partícula. Por otra parte, las muestra B-6 y C-16, al comienzo muestran una ligera ganancia de masa y luego en la etapa intermedia de pirólisis y/o combustión las curvas están por encima de las otras. La ganancia de masa puede atribuirse a la quimisorción de oxígeno y dado que estos dos carbones son altamente aglomerantes, se funden e hinchan y sus productos de pirólisis se recombinan retardando la combustión.

Para describir el comportamiento de los perfiles de combustión en la figura 2 se definen regiones asociadas con los procesos dominantes y se establecen las temperaturas características para cada región.

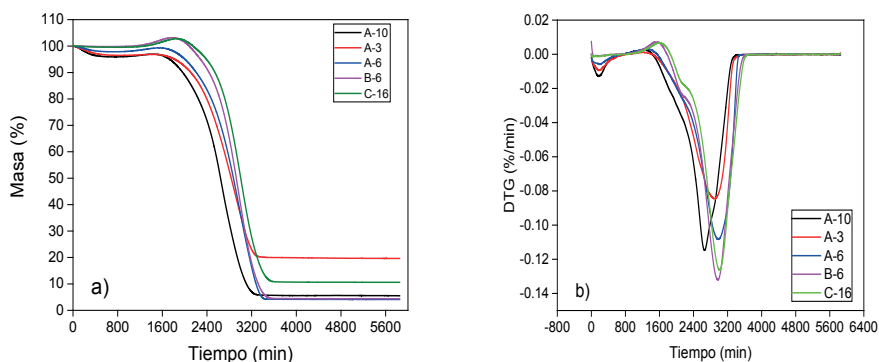


Figura 1: Perfiles de combustión (a) TGA y (b) DTGA para los carbones

El secado es la primera etapa del proceso de combustión que se manifiesta por el primer pico en el perfil de combustión y finaliza a temperatura final de secado (T_f). La adsorción del oxígeno es la segunda etapa donde se observa una ligera ganancia de masa hasta una temperatura T_{fa}, que para esta investigación es aproximadamente 280°C; en esta zona se presentan los fenómenos de adsorción física y quimisorción.

Alrededor de esta temperatura, empiezan las reacciones de pirólisis o desvolatilización, observándose una pérdida de masa ocasionada por el desprendimiento de una cierta cantidad de volátiles que salen de la partícula, evidenciándose una mayor velocidad en los carbones no aglomerantes o medianamente aglomerantes que en los

aglomerantes B-6 y C-16. Los volátiles liberados se encuentran con una atmósfera rica en oxígeno reaccionando rápidamente en fase homogénea a la T_{fv} , liberando la energía que se retroalimenta a la partícula iniciando la combustión hasta alcanzar la temperatura (T_m) donde se desarrolla la velocidad máxima de quemado. El proceso continúa con la combustión del carbonizado o char, y la transformación de la materia mineral en óxidos o cenizas hasta la temperatura final (T_{fc}) o temperatura en la cual no se presenta cambio de masa.

La figura 3 muestra las regiones y temperaturas características para el bagazo de la caña de azúcar. En la curva de pérdida de masa se observan varios cambios de pendiente asociados con la pirólisis o desvolutización de biomasa, combustión de estos volátiles y combustión del residuo carbonoso que se detallan mejor en el perfil de combustión.

En el perfil de combustión del bagazo, la primera zona corresponde al secado con T_{fs} de 99°C. La segunda zona o de adsorción de oxígeno está solapada con el inicio del proceso de pirólisis, por el rompimiento de los enlaces más débiles presentes en la hemicelulosa y luego con la celulosa que aporta la mayor parte de la materia volátil y finalmente la lignina que es el componente más estable (Ru, et al., 1996) (Lo, et al., 2010). Sin embargo, por la presencia de oxígeno estos volátiles son muy reactivos facilitando la combustión que se observa por la altura del pico y el ancho de la banda. Finalmente, se observa una región con un pico alrededor de 441°C, que representa la combustión del carbonizado o char.

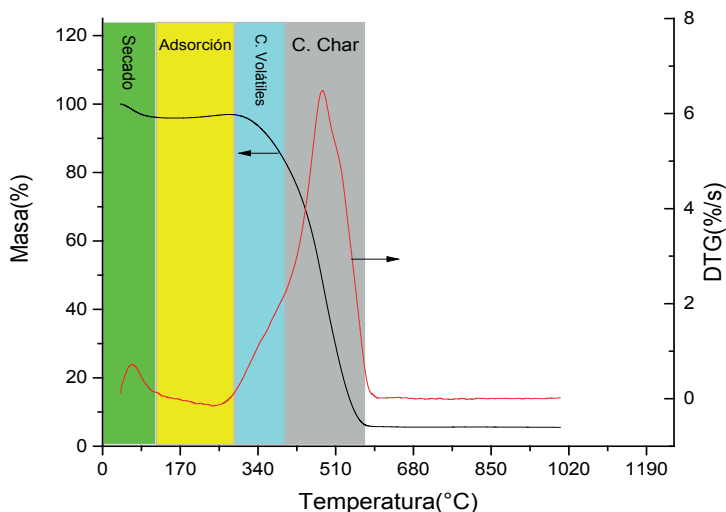


Figura 2. Regiones del perfil de combustión para el carbón A - 10

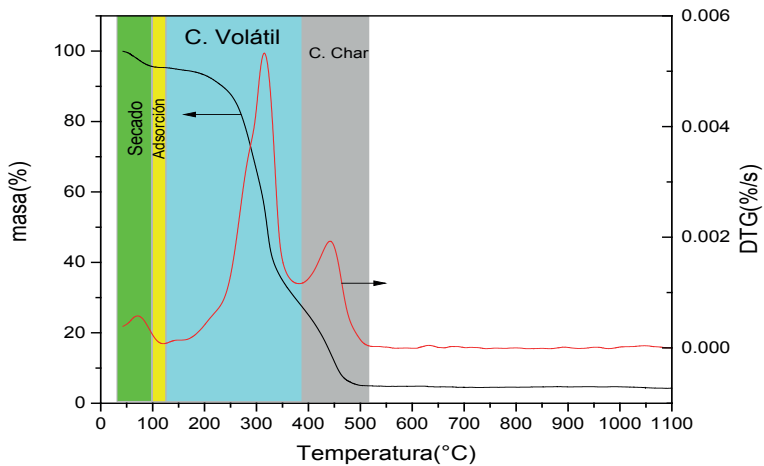


Figura 3. Regiones del perfil de combustión del bagazo

En la tabla 6 se muestran las temperaturas características de cada una de las regiones del perfil de combustión y la velocidad máxima de combustión. Las temperaturas de secado T_{fs} , varían entre 99°C para el bagazo y 120°C para el carbón A-6. En la zona de adsorción de oxígeno se observa un incremento de la T_{fd} a media que aumenta el contenido de carbono fijo que puede relacionarse con una estructura aromática más organizada con menor disponibilidad de sitios de adsorción o de anclaje de la especie reactiva.

En la región de desvolatilización no se observa una tendencia clara para las T_{fv} , lo cual puede atribuirse a una serie de reacciones paralelas y consecutivas que involucran a los radicales libres y especies reactivas producto del rompimiento térmico de los componentes del material. Estas reacciones pueden ser de combustión, condensación y/o polimerización. La temperatura característica de combustión del char aumenta con el contenido de carbono fijo indicando que esta es la etapa controlante del proceso de combustión.

En el perfil de combustión, el pico principal o máximo es representativo del proceso global de la combustión y la temperatura asociada con el máximo de este pico, T_m , puede relacionarse con la velocidad máxima de combustión que es una medida de la reactividad o combustibilidad; cuanto más baja es T_m más reactivo es el material. De esta manera, el bagazo y los carbones con alto contenido de materia volátil son los más reactivos (B, A-10, A-6 y A-3) en tanto que, los carbones con mayor contenido de carbono fijo y fuertemente aglomerantes son los más difíciles de quemar (B-6 y C-16).

De acuerdo con los resultados del análisis termogravimétrico puede inferirse que usar o adicionar el bagazo al carbón o mezclas de carbones podría contribuir a mejorar la combustibilidad. Los carbones que mejor se comportan en el proceso de combustión son aquellos que contienen alto contenido de materia volátil, bajo contenido de cenizas y que

no tengan propiedades aglomerantes. De esta manera, para continuar con el estudio de co-combustión de carbón/biomasa, se selecciona el carbón A-10 en mezclas de diferentes proporciones.

Muestra	Región Secado (T_{fs} °C)	Región Adsorción (T_{fa} °C)	Pirólisis/Combustión		Pico principal	
			Región desvolatilización (T_{fv} °C)	Región combustión Char (T_{fc} °C)	$-(dm/dt)_{m\acute{a}x}$ (%/s)	T_m (°C)
A – 10	105.81	240.35	424.19	601.21	0.114	481.00
A- 6	120.13	256.01	433.35	629.97	0.108	533.36
A- 3	111.69	237.01	395.23	627.19	0.084	519.98
B -6	103.12	298.52	399.20	646.67	0.131	530.54
C-16	111.35	306.96	396.39	643.07	0.126	536.94
B	99.14	133.57	376.64	513.81	0.002	441.15

Tabla 6 Temperaturas características y velocidad máxima de quemado

CONCLUSIONES

El estudio termogravimétrico de las muestras evaluadas concluyó que la muestra A-10, proveniente de La Guajira es el carbón más apropiado y de mejor comportamiento ya que presenta las mejores condiciones fisicoquímicas para el proceso de combustión.

En el análisis efectuado se establecieron cuatro regiones asociadas con eventos principales tales como secado, adsorción de oxígeno, combustión de volátiles y combustión del carbonizado en condiciones no isotérmicas, relacionadas al co-procesamiento de los carbones y biomasa

Se estableció también que, tanto para el carbón como para el bagazo, la velocidad de calentamiento, la concentración de oxígeno y el tamaño de partícula inciden sobre los parámetros característicos de la combustión, E_a , T_m y R_m . por otro lado, para el caso del carbón la etapa controlante del proceso es la combustión del carbonizado, mientras que, para el bagazo la etapa controlante es la desvolatilización.

Con estos resultados se demuestra que a través del análisis termogravimétrico puede describirse de manera sistemática el comportamiento de la co-combustión de carbón y bagazo encontrando que la adición del bagazo (residuo renovable) mejora la ignición del carbón, con lo cual contribuye a la disminución de costos relacionados con el proceso de generación de calor.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Investigación en Combustibles y Energía (LICE), de la Universidad Nacional de Colombia, por el apoyo en la realización de los análisis y la disponibilidad de todos los equipos utilizados en la presente investigación.

REFERENCIAS

- Barrera, Julián Esteban, et al. Estudio de la degradación térmica de poli (alcohol vinílico) mediante termogravimetría y termogravimetría diferencial. *Ingeniería e investigación*, vol. 27, no 2, p. 100-105. 2007
- De Diego, L. F.; García, F.; Abad, A. and Gaya, P. "Modeling of the Devolatilization of Nonspherical Wet Pine Wood Particles in Fluidized Beds," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 41, pp. 3642–3650, 2002.
- Díaz Barreto, A. F., et al. Modelo de co-combustión con biomasa y carbón en una cámara de combustión dual. 2012.
- Essenhig, R.H., "Coal conversion Technology." Addison-Wesley Publishing Company, p. Cap. 3, 1979.
- Essenhig R. H., "Alternate Coal Conversion Technologies," The Ohio State University, 1979.
- Gani, A.; Morishita, K.; Nishikawa, K.; and Naruse, I. "Characteristics of co-combustion of low-rank coal with biomass," *Energy and Fuels*, vol. 19, no. 4, pp. 1652–1659, 2005.
- Gatternig, B. and Karl, J. "Investigations on the Mechanisms of Ash-Induced Agglomeration in Fluidized-Bed Combustion of Biomass," *Energy & Fuels*, vol. 29, pp. 931–941, 2015.
- J. D. J. D. V. Ariel Oswaldo Cadena Sanchez, Laura Rosa Conde Rivera, "Análisis petrográfico de carbones colombianos mediante análisis de imágenes." 2011
- Jiang, G. and Sanxia, X. "Chemical reaction kinetics of coal combustion investigated by thermogravimetric analysis," vol. 6, no. 7, pp. 2450–2455, 2014.
- Manuel, J. and Burgos, B. "Caracterización morfológica del carbonizado de carbones pulverizados : determinación experimental Char morphology characterization from pulverized coals : experimental determination," 2008.
- Nussbaumer, T. "Combustion and Co-combustion of Biomass : Fundamentals , Technologies , and Primary Measures for Emission Reduction †," pp. 1510–1521, 2003.
- Lo, K.-C.; Wu, K.-T., Chyang, C.-S. and Su, K.-C. "Modeling the Woody Biomass Combustion in a Vortexing Fluidized-Bed Combustor," *Energy & Fuels*, vol. 24, no. 2, pp. 1316–1322, 2010.
- Porteiro, J.; Patiño, D.; Miguez, J. L.; Granada, E.; Moran, J. and Collazo, J. "Study of the reaction front thickness in a counter-current fixed-bed combustor of a pelletised biomass," *Combust. Flame*, vol. 159, no. 3, pp. 1296–1302, 2012.
- Ru, H.; Kicherer, A.; Greul, U.; Spliethoff, H., and Hein, K. R. G. "Investigations in Combined Combustion of Biomass and Coal in Power Plant Technology," *Energy & Fuels*, pp. 789–796, 1996.

Scala, F.; Chirone, R. and Salatino, P. "Combustion and attrition of biomass chars in a fluidized bed," *Energy and Fuels*, vol. 20, no. 1, pp. 91–102, 2006.

Sis, H. "Evaluation of combustion characteristics of different size elbistan lignite by using TG / DTG and DTA," vol. 88, pp. 863–870, 2007.

Smith I.W., "19th Symp. on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg PA." 1982.

Unidad de Planeación Minero Energética, "Boletín Estadístico de minas y energía." Colombia, p. 235, 2015.

Zhang, D.; F, T. W. and Tate, Anthony G. "The reactivity of pulverized coal char particles : experiments using ignition, burnout and DTG techniques and partly burnt chars," *Fuel*, vol. 71, no. 4, pp. 1247–1253, 1992.

Zhao, K.; Glarborg, P.; and Jensen, A. D. "NO reduction over biomass and coal char during simultaneous combustion," *Energy and Fuels*, vol. 27, no. 12, pp. 7817–7826, 2013.