

Reactividad de la co-combustión carbón-lodo*

Reactivity of the co-combustion of coal-sludge

Heidy L. Gallego-Ocampo

Doctora en Ingeniería, Docente Investigador Facultad de Ingenierías Universidad La Gran Colombia, Ciudadela del Saber La Santa María, Km 7 Vía La Tebaida-Armenia, Quindío, Colombia.

Resumen

Con el fin de darle un aprovechamiento energético al lodo generado en una PTAR, se estudió la reactividad de la combustión de una mezcla carbón-lodo, buscando la competitividad como combustible y la reducción de su impacto sobre el medioambiente. Se emplearon técnicas termogravimétricas como fuente central para el análisis de la reactividad del lodo y las mezclas carbón-lodo, agrupadas en proporción 1:9, 3:7, 7:3, 9:1, 1:1 utilizando siempre carbón del Valle del Cauca. El lodo fue calentado previamente a 105°C con el fin de evitar que los microorganismos presentes desdoblaran la materia orgánica y alteraran sus condiciones fisicoquímicas. Se determinaron las energías de activación media ponderada, Em, estableciendo así la correlación entre los eventos térmicos y parámetros cinéticos. Los perfiles de combustión mostraron eventos térmicos bien diferenciados para el lodo y el carbón, la mezcla carbón-lodo presentó eventos predecibles derivados de la caracterización de ambos combustibles. El lodo tratado individualmente presentó una alta reactividad (Em de 47.46 KJ/mol), muy superior a la del carbón (Em de 134.69 KJ/mol), lo que alienta su uso como combustible. De las mezclas analizadas, la que presenta mayor reactividad es la mezcla 1:9 (carbón-lodo) con Em de 48.16 KJ/mol, y la que presenta menor índice de reactividad es la 9:1 con Em de 144.59 KJ/mol. A mayor valor de MV/CF se obtiene el menor valor de Em indicando esto una mayor reactividad y viceversa.

Palabras clave: Co-combustión, técnicas termogravimétricas, eventos térmicos, reactividad, energía de activación.

Abstract

In order to give an energy efficiency to sludge generated in a wastewater treatment plant, the reactivity of the combustion of a coal-sludge mixture was studied, looking for competitiveness as fuel and the reducing their impact on the environment. Thermogravimetric techniques were used as a central source for the analysis of reactivity of sludge and the coal-sludge mixture, grouped in proportion 1:9, 3:7, 7:3, 9:1, 1:1, always using coal coming from Valle del Cauca.

The sludge was preheated to 105°C in order to prevent microorganisms and the organic matter unfold and alter their physicochemical conditions. The activation energies weighted average were determined, Em, establishing that way the correlation between thermal events and kinetic parameters. The combustion profiles showed distinct thermal events for sludge and coal. The coal-sludge mixture had predictable events arising from the characterization of both fuels. The sludge individually treated exhibited a high reactivity (Em of 47.46 KJ/mol) higher than coal (Em of 134.69 KJ/mol), which encourage its use as a fuel. From mixtures analyzed, the mixture that exhibited higher reactivity was 1:9 (coal-sludge) with a value Em of 48.16 KJ/mol, while the mixture 9:1 had the lowest reactivity index with Em of 144.59 KJ/mol. At higher value of MV/CF the lower value of Em is obtained, this indicate a greater reactivity and vice versa.

Keywords: Cocombustion, thermogravimetric, thermal events, reactivity, activation energies.

Recibido: 12/04/2015
Revisado: 18/06/2015
Aceptado: 10/12/2015

Correspondencia de autor:

gallegocaheidy@miugca.edu.co

© 2015 Universidad La Gran Colombia. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution License, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que el autor original y la fuente se acrediten.

* Trabajo de opción de grado para optar al título de Ingeniería Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle



Cómo citar:

Gallego-Ocampo, H.L (2015) Reactividad de la co-combustión carbón-lodo. *UGCiencia* 21, 91-102

Introducción

En las diferentes operaciones y procesos unitarios involucrados en el tratamiento de aguas residuales se remueven diferentes tipos de sólidos que incluyen material grueso, así como lodos de tipo orgánico llamados biosólidos e igualmente lodos de tipo inorgánicos, siendo el lodo un producto final inevitable. Cuanto mayor es el grado de tratamiento de las aguas residuales, mayor es el volumen total de los residuos sólidos y lodos generados, por ejemplo, la PTAR-Cañaveralejo de Cali (Valle del Cauca) produce de 120 a 130 Ton/día de biosólido, siendo el lodo uno de los principales problemas que generan un alto costo operacional (Quintana, 2012).

Se ha demostrado que los lodos se pueden utilizar en la agricultura como materia para compostaje o para la generación de energía a través de la combustión (Li et al., 2015; Moreira et al., 2008; Ogada and Werther, 1996; Roca-Pérez et al., 2009; Werther and Ogada, 1999). Para la determinación de la combustión, se utilizan técnicas de análisis como la termogravimetría (TGA) y la termogravimetría diferencial (DTGA) que permiten realizar la evaluación comparativa de varios procesos térmicos en los sistemas de combustión y de co-combustión de lodos con otras sustancias (velocidad máxima de combustión, temperatura de ignición y consumo de materia) por medio del monitoreo de la pérdida de masa del compuesto como función de la temperatura y/o tiempo (Li et al., 2015; Otero et al., 2002; Park and Jang, 2011; Su et al., 2013; Yu and Li, 2014).

En este estudio se analizó la posible interacción entre carbón-lodo durante su co-combustión y para ello se implementó la técnica de análisis termogravimétrico con el fin de explorar el potencial energético del lodo, ya que es poco investigada en nuestra región. El estudio se realizó en el Laboratorio Combustión Combustibles, perteneciente al área de Tecnologías de Producción Limpia de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle (Cali-Colombia).

Metodología

Selección de las muestras

El lodo deshidratado o biosólido se tomó de la banda transportadora en movimiento por contener el lodo proveniente de los diferentes filtoprensas de la Planta de

Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR-CAÑAVERALEJO) y por ser la etapa posterior a la producción del mismo. La recolección de la muestra se realizó a diferentes intervalos de tiempo hasta obtener un tamaño de muestra de 10 Kg.

Para la obtención de la muestra de carbón del Valle, se seleccionó la mina La Yolanda (Buitrera – Cali – Valle del Cauca) por poseer una planta de lavado de carbón. El muestreo en la mina La Yolanda se realizó de acuerdo a las técnicas de muestreo recomendadas por la norma ASTM D2234.

Tratamiento de las muestras

La muestra de lodo se secó previamente en una estufa de laboratorio a 105°C (hasta alcanzar un peso constante), lo que permite conservar sus propiedades fisicoquímicas. Seguidamente se redujo el tamaño de partícula hasta obtener un tamaño menor a 200 μm (pasante malla 60), conforme a la norma ASTM D2013.

Para la preparación del carbón se siguió la norma ASTM D2013. Una vez preparadas las muestras, se procedió a mezclar el lodo y el carbón en las proporciones 1:9, 3:7, 7:3, 9:1, 1:1 para luego realizar el análisis fisicoquímico y termogravimétrico (TGA, DTGA), logrando así una amplia caracterización.

Análisis empleados

La caracterización fisicoquímica comprende el análisis próximo total, elemental y análisis termo gravimétricos. En la tabla 1 se exponen las normas con las que se realizaron los análisis próximo total y elemental, así como los equipos utilizados.

El seguimiento de la velocidad de reacción desde el inicio del calentamiento de las muestras hasta la oxidación completa, se hizo mediante ensayos termo gravimétricos utilizando el equipo TA Instrument SDT 2960 simultáneo DSC TGA con aire como gas de análisis a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min con un rango de temperatura de 25 a 900°C, el cual proporciona tanto la pérdida de masa de la muestra con el tiempo (TGA) como su velocidad (DTGA). Para los análisis termo gravimétricos, el tamaño de partícula debe ser menor a 200 μm (pasante malla 60) para un tamaño de muestra de 10 – 15 mg.

Tabla 1. Equipos utilizados en el análisis próximo total y elemental

Análisis	Equipo	Norma
Humedad residual, materia volátil, ceniza y carbón fijo	Leco TGA - 601	ASTM 5142
Poder calorífico superior	LECO AC - 350	ASTM 1989
Azufre	LECO SC - 32	ASTM 4239
Carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno.	LECO CHN 2000	ASTM 5373

Resultados y discusión

Análisis próximo total

De acuerdo a los valores obtenidos del poder calorífico superior (PCS), el carbón del Valle es un carbón bituminoso medio en volátiles, mientras que las mezclas 1:9, 3:7, 1:1, 7:3, 9:1 se asemejan a un carbón lignito; aunque la mezcla 9:1 presenta características de un lignito tipo A o lignito negro por contener un P.C.S. de 6681.5 Cal/g (P.C.S. entre 6300 a 8300 cal/g) (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados obtenidos del análisis próximo total

Muestra	HR (b.s.a.)	MV (b.s.)	Cz (b.s.)	CF (b.s.)	P.C.S. (Cal/g) (b.s.)	S Total (b.s.)
C. Valle	1.03	25.23	16.16	58.61	7126.7	1.99
C. Valle-Lodo 10 % - 90 %	3.16	38.78	52.46	8.76	2807.9	1.43
C. Valle-Lodo 30 % - 70 %	2.26	36.01	44.21	19.78	3772.2	1.60
C. Valle-Lodo 50 % - 50 %	2.23	33.03	36.01	30.96	4753.8	1.70
C. Valle-Lodo 70 % - 30 %	1.58	29.69	27.31	43.00	5794.2	1.80
C. Valle-Lodo 90 % - 10 %	1.20	27.03	20.15	52.82	6681.5	1.92
LODO	3.38	41.06	57.92	1.02	2249.3	1.28

El contenido de materia volátil (MV) del carbón del Valle, del lodo y las mezclas se encontraron entre los intervalos mínimo y máximo aceptables con el que trabaja una caldera de parrilla móvil, comprendidos entre el 24 % y el 44 %. Las mezclas 1:9 y 3:7 registraron los mayores contenidos de MV y los valores más bajos de PCS, mientras que la mezcla 9:1 presentó los menores valores de MV. El contenido de MV del lodo se encuentra por debajo del reportado por (Li et al., 2015) quienes obtuvieron valores de MV entre 50 – 74 %.

En cuanto al contenido de humedad residual (% HR) y ceniza (% Cz), las mezclas 1:9 y 3:7 registraron los mayores valores de HR y Cz, presentando valores bajos de

azufre total y de PCS, mientras la mezcla 9:1 registró los menores contenidos de humedad residual (% HR) y cenizas (% Cz) y los más altos de azufre; en tanto el contenido de ceniza en las muestras de lodos fue de 57.92 %, superior al contenido de ceniza reportado por (Li et al., 2015) entre 23 y 47 %, quienes afirman que los valores obtenidos de humedad residual, MV, PCS., contenido de ceniza y azufre total durante la combustión de las mezclas puede ser debido al contenido de proteína presente en los lodos, la cual es el componente principal de la materia volátil. La mezcla 9:1 es más susceptible a generar altas emisiones de dióxido de azufre (SO₂) durante el proceso de combustión, puesto que esta mezcla contiene altos contenidos de azufre.

Análisis elemental

Como puede observarse en la tabla 3, el contenido en carbono (C) del lodo es bastante inferior a la del carbón del Valle, siendo este 2.4 veces menor que la del carbón. La mezcla que presenta menor contenido de carbono (C) es la dada por la relación 1:9 (carbón-lodo) y la que presenta el mayor contenido es la correspondiente a la mezcla 9:1 (carbón-lodo). Las demás mezclas tienen valores intermedios de carbono (C) entre 27 y 52.93.

Tabla 3. Resultados obtenidos del análisis elemental

Muestra	C (b.s.)	H (b.s.)	N (b.s.)	O (b.s.)	(H/C) rel molar (b.s.)
C. Valle	56.15	4.70	1.69	19.31	1.00
C. Valle-Lodo 10 % - 90 %	27.00	3.33	3.48	12.30	1.48
C. Valle-Lodo 30 % - 70 %	33.42	3.62	3.09	14.06	1.30
C. Valle-Lodo 50 % - 50 %	40.11	3.94	2.69	15.55	1.18
C. Valle-Lodo 70 % - 30 %	46.49	4.23	2.29	17.88	1.09
C. Valle-Lodo 90 % - 10 %	52.93	4.48	1.90	18.62	1.01
Lodo	23.66	3.18	3.68	10.28	1.61

El contenido de hidrógeno (H) en el lodo es un poco inferior al que presenta el carbón, siendo el carbón del Valle 1.5 veces mayor. La mezcla que presenta el menor contenido de hidrógeno (3.33) es la de proporción 1:9 y la que contiene el mayor contenido (4.48) es la 9:1. Las demás mezclas presentan valores intermedios entre estos intervalos.

El contenido de nitrógeno (N) en el lodo es mayor al 2 %, esto puede ser debido a la falta de una planta de desnitrificación en la PTAR-Cañaveralejo de la ciudad de Cali, lo cual podría ocasionar emisiones de NO_x. Según (Ogata and Werther, 1996), los lodos tienen mayor contenido de nitrógeno, materia volátil y ceniza que el carbón.

Con respecto a la absorción de oxígeno (O₂), el lodo presenta menor absorción que el carbón, el contenido de este en el lodo es de 1.8 veces menor que en el carbón, presentando el carbón del Valle un contenido de oxígeno (O₂) de 19.31. De las mezclas, la que tiene el mayor contenido de oxígeno es la dada por la relación 9:1.

La relación molar hidrógeno/carbono es más grande en el lodo que en el carbón, siendo este valor de 1.61, según (Xiberta et al., 2000) este valor se encuentra dentro del intervalo de los diversos tipos de biomasa combustible (1.1-1.9); todas las mezclas excepto la que tiene la relación de 9:1 se encuentran en este intervalo.

Análisis termogravimétrico

Algunos de los trazos característicos de los termogramas realizados a las muestras (Figuras 1- 7) se han relacionado con los eventos físicos y químicos que ocurren durante el calentamiento de la muestra en el transcurso de la prueba.

Figura 1. Perfil de Combustión Carbón Valle

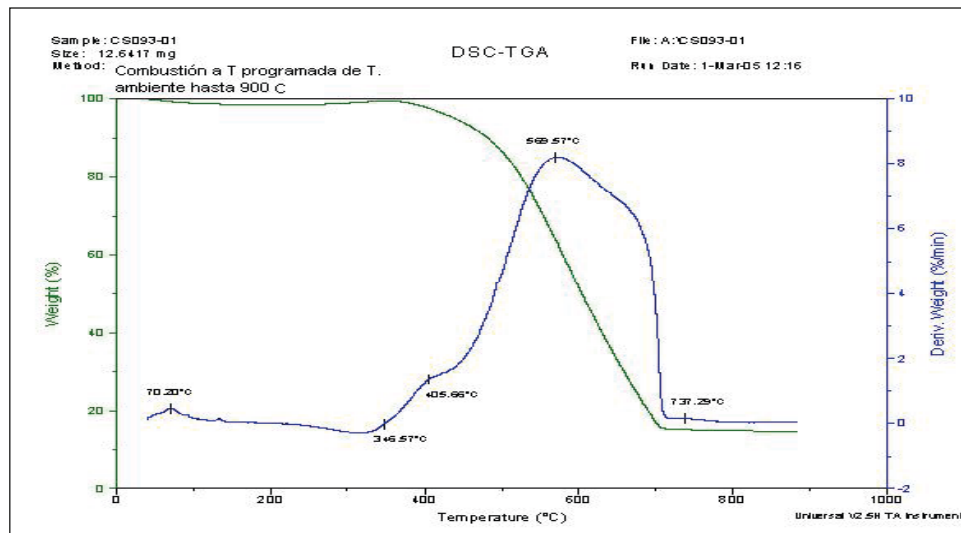


Figura 2. Perfil de Combustión Lodo

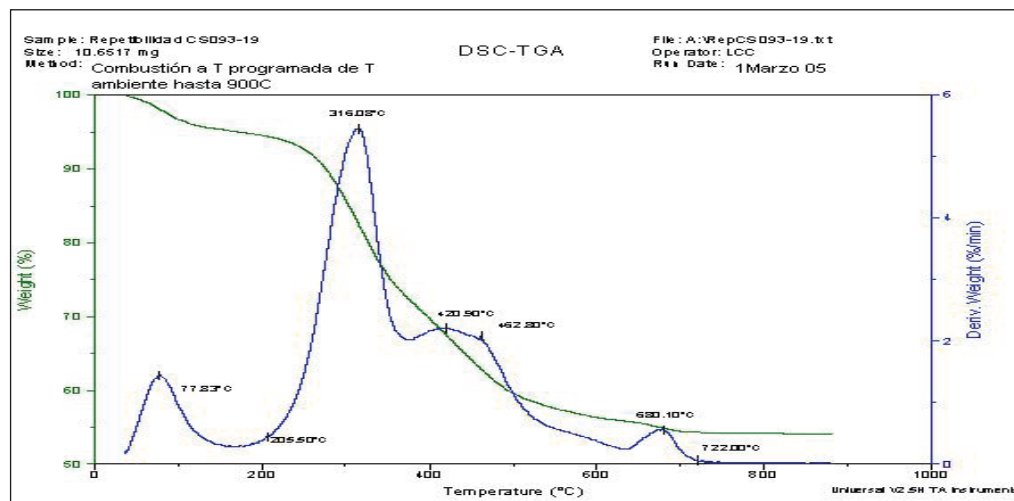


Figura 3. Perfil Combustión Carbón-Lodo (50 %-50 %)

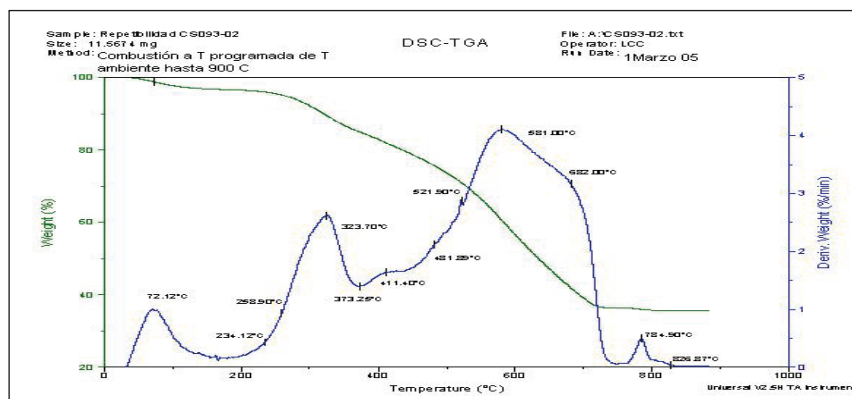


Figura 4. Perfil Combustión Carbón-Lodo (30 %-70 %)

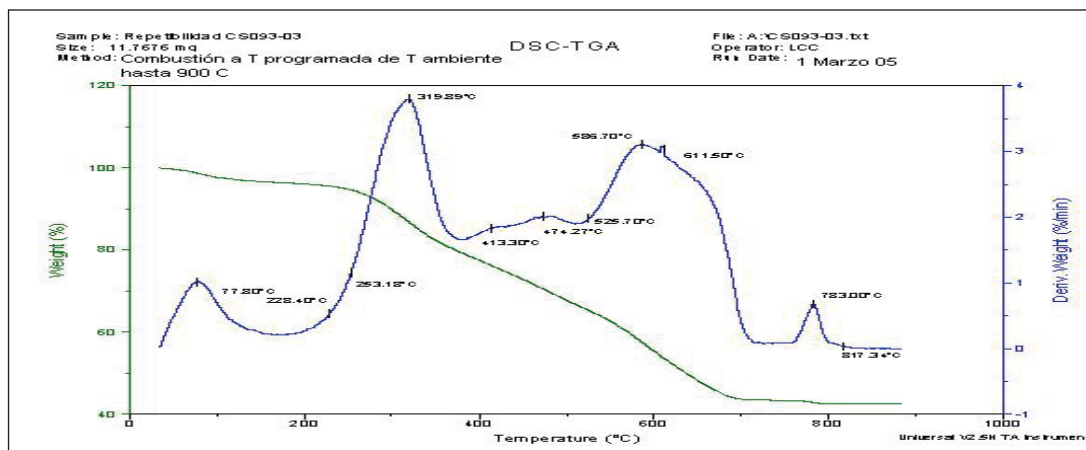


Figura 5. Perfil Combustión Carbón-Lodo (70 %-30 %)

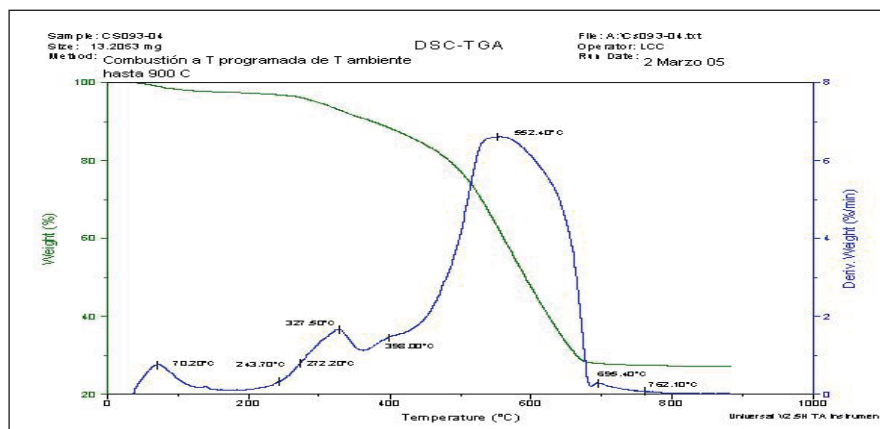


Figura 6. Perfil Combustión Carbón-Lodo (10 %-90 %)

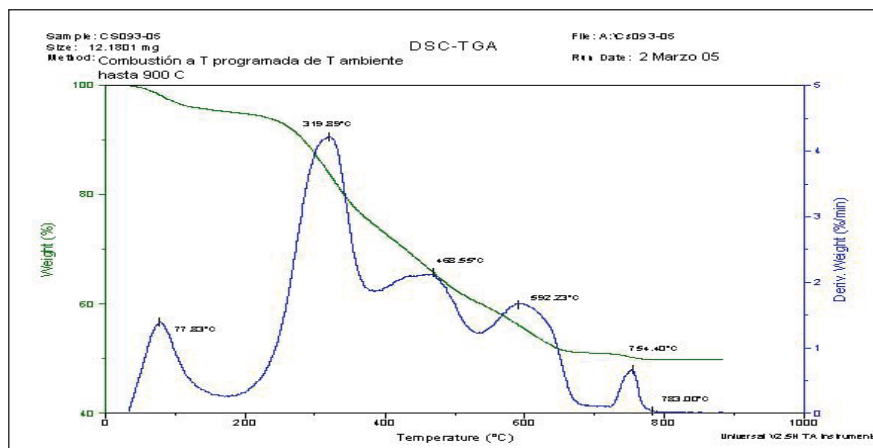
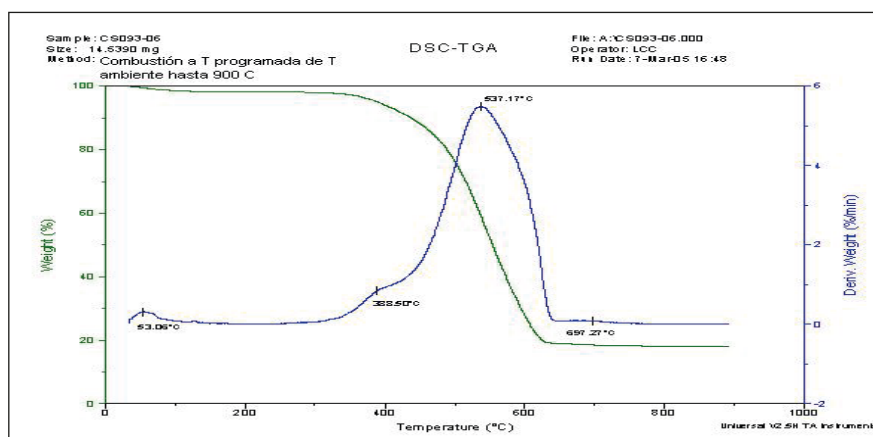


Figura 7. Perfil Combustión Carbón-Lodo (90 %-10 %)



En la tabla 4, se presenta las temperaturas características dadas en el perfil de combustión de cada una de las muestras analizadas, representadas en las (figuras 1- 7).

La muestra carbón del Valle presentó un enfriamiento y una rápida pérdida de peso después del pico de máxima temperatura (TP) y al final del perfil de combustión (figura 1), lo cual indica una combustión no controlada de la muestra, mientras que en la muestra con proporción 9:1 el perfil de combustión es similar al del carbón del Valle, y el de las mezclas 1:9, 3:7 es similar a la que presenta el lodo; por otra parte, como se puede observar en la figura 8, las tres mezclas anteriormente mencionadas se entrecruzan con las muestras de lodo entre los 550 – 590°C. Las mezclas (1:1,7:3) presentan un comportamiento intermedio entre el carbón y el lodo, siendo característico a las proporciones de carbón-lodo utilizadas en la mezcla.

Figura 8. Perfil Combustión Termograma TGA.

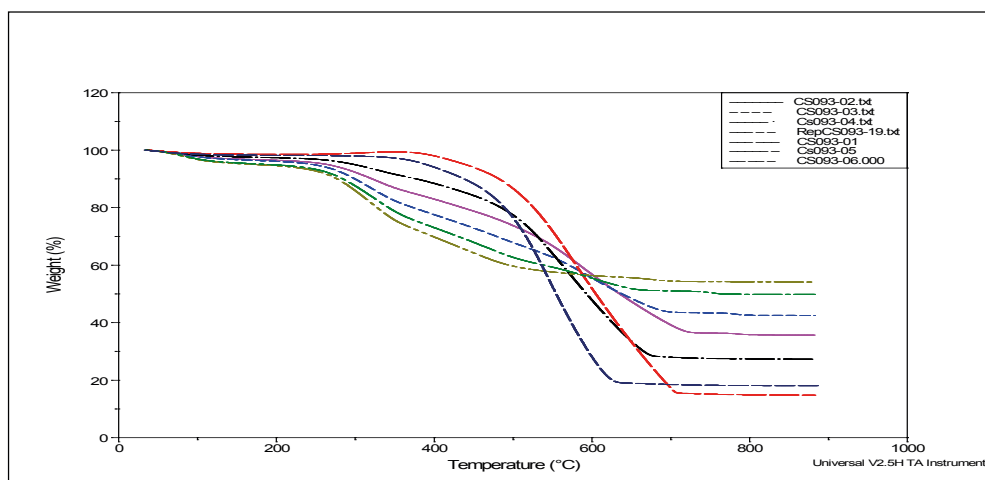


Tabla 4. Temperaturas características obtenidas del perfil de combustión de las muestras analizadas

Muestra	Intervalo de combustión								
	T _i	T _f	200 °C - 400 °C		400 °C - 600 °C		600 °C - 800 °C		T _{nic}
			T _{nic}	T _{nic}	T _{nic}	T _{nic}	T _{nic}	T _{nic}	
C. Valle	346.57	737.29			405.66 ^a	569.571			
C.V.-LODO 10 % - 90 %	224.60	783.00	319.901		468.602	592.402		754.40	
C.V.-LODO 30 % - 70 %	228.40	817.34	319.891		413.30 ^a	474.27 ^b	586.702	611.50 ^a	783.00 ^b
C.V.-LODO 50 % - 50 %	234.12	826.87	323.702		411.40 ^a	521.90 ^b	581.001	784.902	
C.V.-LODO 70 % - 30 %	243.70	762.10	327.502	396.00 ^a	562.401			695.40 ^a	
C.v.-lodo 90 % - 10 %	388.5	697.27			537.171				
Lodo	205.50	722.00	316.081		420.902	462.80 ^a		688.10 ^a	

¹ Pico principal (velocidad máxima)

² Pico principal

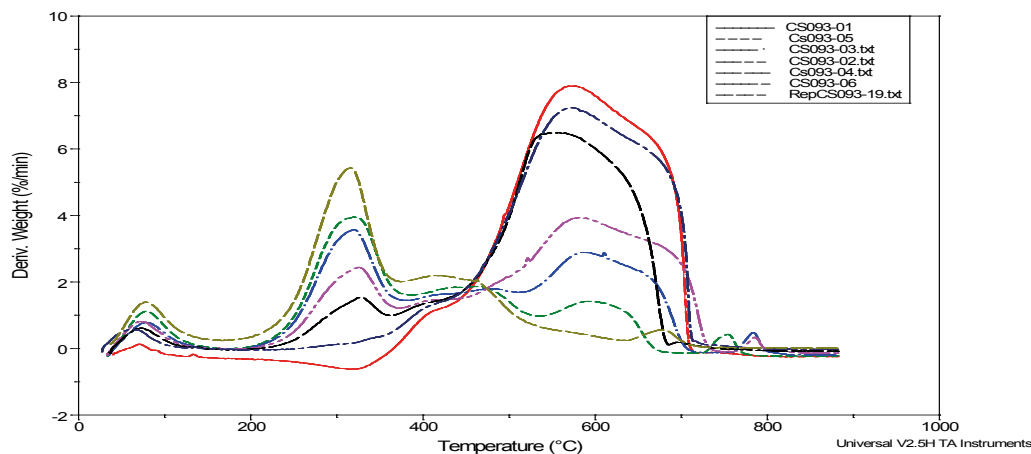
^{a,b} Picos solapados

En la figura 9 se representa la velocidad de pérdida de peso de las muestras de carbón, lodo y las mezclas carbón-lodo en función de la temperatura en atmósfera controlada (DTGA). Al comparar la muestra de lodo con la del carbón del Valle se puede apreciar que el lodo presen-

ta varios picos característicos, el primer pico aparece a los 77.83 °C (Tabla 4) el cual corresponde a la liberación de la humedad higroscópica presente en el lodo (Zhao et al., 2013), mientras que en el carbón aparece a los 70.20 °C. El segundo pico se relaciona con la combustión de materia volátil, en el lodo, la materia volátil se quema a los 316.08 °C, este valor es cercano al obtenido por (Hu et al., 2015) durante la combustión de materia volátil de residuos sólidos municipales (263 – 379°C); mientras que en el carbón se quema a los 405.66 °C. El pico corres-

pondiente a la liberación del carbón fijo es menos pronunciado en el lodo que en el carbón dado el bajo contenido de carbón que presenta el lodo.

Figura 9. Perfil de combustión del carbón, lodo y de las mezclas carbón lodo. DTGA



En todas las muestras existe un pico por debajo de los 100 °C que corresponde esencialmente a la pérdida de humedad tanto inherente como absorbida, la cantidad de agua liberada se relaciona con el área de este pico y es un reflejo del rango del combustible sólido utilizado (carbón, lodo, carbón-lodo), mientras que a temperaturas superiores a los 600 °C se nota un pico que se atribuye a la pérdida de materia mineral.

Los perfiles del lodo y las mezclas carbón-lodo presentan dos picos principales cuyas velocidades máximas de pérdida de peso tienen lugar a temperaturas del orden de 319 °C y 581 °C (temperaturas pico), sucede lo contrario con la mezcla de proporción 1:9 que presenta tres picos principales a 319 °C, 468 °C y 592 °C (ver tabla 4).

Como puede apreciarse, cada combustible en la mezcla desarrolla su perfil de combustión por separado. En cada uno de los perfiles de las mezclas 1:9, 3:7, 7:3,1:1 (carbón-lodo) se observa que la velocidad de pérdida de peso desciende en el tramo (100 °C - 200 °C), esto indica ganancia de peso, se considera que este incremento en el peso de la muestra se debe a que hay absorción de oxígeno por la materia orgánica antes de comenzar a liberar y oxidar la materia volátil.

De los perfiles de combustión obtenidos se puede apreciar que las muestras con proporción 1:1,1:9, 3:7 son las

que presentan el mayor contenido de humedad (2.23 %, 3.16 %, 2.26 % respectivamente) y presentan los picos iniciales con mayor área bajo la curva DTGA. Las otras muestras, cuyo contenido de humedad se encuentra entre 1.20 % y 1.58 %, presentan picos cuya área es pequeña y proporcional al contenido de humedad de cada una de las muestras.

Alcanzada la temperatura TI, la pérdida de peso es debida a la ocurrencia de varios eventos, entre los cuales se encuentran la liberación de materia volátil, la combustión de la materia volátil y la combustión del carbón y materia volátil resultante. Según (Ghetti et al., 1985) todos estos eventos se presentan en un amplio intervalo de temperatura que puede ir desde los 200 °C hasta los 470 °C y son representados por el pico de mayor área de los diagramas DTGA.

Estudio de la reactividad de las muestras

La reactividad en la combustión de una muestra se calcula por medio de los perfiles de combustión obtenidos en las curvas TGA y DTGA. (Cumming, 1984) recomienda que un parámetro tal como la energía de activación media ponderada aparente (E_m) es más representativa para conocer la reactividad de un carbón en comparación con los datos de temperatura que aparecen en los perfiles de combustión. Esta E_m determina la reactividad global del

combustible y encierra todas las etapas y reacciones presentes en el proceso de combustión

Parámetros de reactividad - método dinámico

La energía de activación media ponderada (E_m) determina la reactividad de la muestra, donde los bajos y los altos valores de E_m indican una mayor y menor reactividad respectivamente. La E_m se calcula siguiendo la metodología propuesta por (Cumming, 1984), en este caso, la E_m es función de las energías de activación aparente (E_i) y de las fracciones de pérdida de peso de la muestra (F_i), Ecuación 1.

$$E_m = F_1E_1 + F_2E_2 + F_3E_3 + \dots + F_nE_n$$

De las mezclas analizadas (tabla 5) se encontró que la que guarda proporción 1:9 es la más reactiva (E_m de 48.16 KJ/mol), seguida por la mezcla 3:7 (E_m de 57.27 KJ/mol). La E_m obtenida del lodo indica que este también es muy reactivo (E_m de 47.46 KJ/mol).

Tabla 5. Energía de activación media ponderada (E_m) de las mezclas analizadas

Muestra	E_1 (KJ/mol)	E_2 (KJ/mol)	E_3 (KJ/mol)	E_4 (KJ/mol)	E_m (KJ/mol)
C. Valle	266.09	60.96	77.09	1119.21	134.69
C.V. -LODO 10 % - 90 %	54.64	26.35	108.19	644.93	48.16
C.V. -LODO 30 % - 70 %	58.65	20.07	99.40	472.21	57.27
C.V. -LODO 50 % - 50 %	48.00	21.27	61.11	129.45	59.49
C.V. -LODO 70 % - 30 %	49.64	27.10	92.03	91.56	79.91
C.V. -LODO 90 % - 10 %	100.28	87.85	98.59	1997.24	144.59
Lodo	65.66	37.08	134.14	1491.66	47.46

Algunos investigadores han definido la diferencia entre la temperatura final y la temperatura inicial (TF-TI) como el intervalo de reacción con el cual se busca estimar el tiempo necesario para lograr la conversión completa de la muestra, de acuerdo con este parámetro, se observa en la

Tabla 6 que la mezclas 1:1, 1:9, 3:7 poseen el intervalo de reacción más alto, por lo cual se requiere un tiempo de reacción mayor para lograr la conversión completa de las muestras, siendo estas las más reactivas por el menor valor de E_m y de TI que presentan, caso contrario sucede con las mezclas 7:3 y 9:1, pues poseen el menor valor de TF-TI y son las menos reactivas.

Tabla 6. Comparación entre TI, TF, TF-TI, E_m

Muestra	TI (°C)	TF (°C)	TF-TI (°C)	E_m (KJ/mol)
C. Valle	346.57	737.29	390.72	134.69
C.V. -LODO 10 % - 90 %	224.60	783.00	558.40	48.16
C.V. -LODO 30 % - 70 %	228.40	817.34	588.94	57.27
C.V. -LODO 50 % - 50 %	234.12	826.87	592.75	59.49
C.V. -LODO 70 % - 30 %	243.70	762.10	518.40	79.91
C.V. -LODO 90 % - 10 %	388.50	697.27	308.77	144.59
Lodo	205.50	722.00	516.50	47.46

En la industria se maneja la relación MV/CF como un índice de combustión (entre mayor sea esta relación, mejor será la combustión). (Prieto and Chaves, 1998; Urhan, 2000) demostraron la existencia de una correlación entre eventos térmicos y parámetros cinéticos, lo que establece una relación inversamente proporcional entre la E_m y el índice de combustibilidad (MV/CF), es decir, que entre mayor sea este índice menor será la energía de activación media ponderada aparente (E_m) y por tanto la muestra analizada será más reactiva.

En la tabla 7 se hace una comparación entre MV/CF, E_m y el PCS., a medida que aumenta el valor de MV/CF en las mezclas carbón-lodo, el valor de E_m disminuye, así la mezcla 1:9 es la más reactiva por poseer el mayor valor de MV/CF y el menor valor de E_m , teniendo un valor de PCS. de 2807.9 Cal/g. La mezcla 9:1 (carbón-lodo) presenta un valor alto de E_m con respecto a la mezcla 1:9 y posee un valor relativamente significativo de P.C.S. (6681.5 Cal/g).

Tabla 7. Comparación entre MV/CF, Em y el Pcs.

Muestra	MV/CF (b.s.)	Em (KJ/mol)	P.C.S (Cal/g) (b.s.)
C. Valle	0.43	134.69	7,126.7
C.V. -LODO 10 % - 90 %	4.43	48.16	2,807.9
C.V. -LODO 30 % - 70 %	1.82	57.27	3,772.2
C.V. -LODO 50 % - 50 %	1.07	59.49	4,735.8
C.V. -LODO 70 % - 30 %	0.69	79.91	5,794.2
C.V. -LODO 90 % - 10 %	0.51	144.59	6,681.5
LODO	40.25	47.46	2,249.3

Conclusiones

Desde el punto de vista energético el lodo es una materia prima aprovechable por su alto contenido de materia volátil (MV) y su poder calorífico relativamente importante.

Una de las desventajas que presenta el lodo es el alto contenido de cenizas y de nitrógeno frente al carbono.

De las mezclas carbón-lodo analizadas, la que presenta la menor energía de activación como parámetro de medida de reactividad es la mezcla 1:9 (10 %C-90 % lodo), sin embargo, desde el punto de vista de aprovechamiento energético (P.C.S.), una mezcla de proporción 7:3 podría ser objeto de un estudio de su viabilidad técnico-económica por su buen comportamiento del P.C.S. frente al lodo y de su E_m frente al carbón del Valle.

Este estudio arrojó resultados importantes sobre el aprovechamiento del lodo como un energético puesto que muestra su posibilidad de mezclarse con carbón en razón de su reactividad y a los diferentes eventos térmicos que ocurren durante el calentamiento, eventos muy específicos atribuidos a su naturaleza.

Referencias bibliográficas

- Cumming, J. W.**, 1984, Reactivity assessment of coals via a weighted mean activation energy: *Fuel*, v. 63, p. 1436-1440.
- Ghetti, P., U. De Robertis, S. D'Antone, M. Villani, and E. Chiellini**, 1985, Coal combustion: Correlation between surface area and thermogravimetric analysis data: *Fuel*, v. 64, p. 950-955.
- Hu, S., X. Ma, Y. Lin, Z. Yu, and S. Fang**, 2015, Thermogravimetric analysis of the co-combustion of paper mill sludge and municipal solid waste: *Energy Conversion and Management*, v. 99, p. 112-118.
- Li, M., B. Xiao, X. Wang, and J. Liu**, 2015, Consequences of sludge composition on combustion performance derived from thermogravimetry analysis: *Waste Management*, v. 35, p. 141-147.
- Moreira, R., J. P. Sousa, and C. Canhoto**, 2008, Biological testing of a digested sewage sludge and derived composts: *Bioresource Technology*, v. 99, p. 8382-8389.
- Ogada, T., and J. Werther**, 1996, Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed: Release and combustion of the volatiles: *Fuel*, v. 75, p. 617-626.
- Otero, M., C. Díez, L. F. Calvo, A. I. García, and A. Morán**, 2002, Analysis of the co-combustion of sewage sludge and coal by TG-MS: *Biomass and Bioenergy*, v. 22, p. 319-329.
- Park, S.-W., and C.-H. Jang**, 2011, Characteristics of carbonized sludge for co-combustion in pulverized coal power plants: *Waste Management*, v. 31, p. 523-529.
- Prieto, A., and A. Chaves**, 1998, Aplicación de métodos termogravimétricos y su correlación C/O Y C/H en la combustión de carbón en calderas de parrilla móvil, Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Quintana Valencia, J. M.**, 2012, Estudio para la viabilidad técnica de compostaje a partir de biosólido seco proveniente de la planta de tratamiento de

aguas residuales PTAR-Cañaveralejo Cali, Universidad de San Buenaventura, Cali.

Roca-Pérez, L., C. Martínez, P. Marcilla, and R. Boluda, 2009, Composting rice straw with sewage sludge and compost effects on the soil-plant system: *Chemosphere*, v. 75, p. 781-787.

Su, W., H. Ma, Q. Wang, J. Li, and J. Ma, 2013, Thermal behavior and gaseous emission analysis during co-combustion of ethanol fermentation residue from food waste and coal using TG-FTIR: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 99, p. 79-84.

Urhan, R. M., 2000, Mejora de la eficiencia de la combustión de carbones utilizados en el Valle del Cauca mediante un estudio previo de su reactividad, Universidad del Valle - UPB, Cali, Colombia.

Werther, J., & T. Ogada, 1999, Sewage sludge combustion: *Progress in Energy and combustion science*, v. 25, p. 55 - 116.

Xiberta, J., M. Folgueras, M. Alonso, and M. Díaz, 2000, Thermogravimetric studies of sludge wastewater treatment plant, Octavo congreso mediterráneo de Ingeniería Química, p. 7 - 19.

Yu, L. Y., & P. S. Li, 2014, Thermogravimetric analysis of coal and sludge co-combustion with microwave radiation dehydration: *Journal of the Energy Institute*, v. 87, p. 220-226.

Zhao, P., S. Ge, and K. Yoshikawa, 2013, An orthogonal experimental study on solid fuel production from sewage sludge by employing steam explosion: *Applied Energy*, v. 112, p. 1213-1221.