

Índice de reactividad intrínseco de carbones concentrados ricos en vitrinita

Vitrinite-rich coal concentrate intrinsic reactivity index

Andrés Felipe Rojas González¹, Juan Manuel Barraza Burgos² y Jorge Luís Piñeres³

RESUMEN

En este trabajo se definió un nuevo parámetro de reactividad de carbón a la combustión llamado índice de reactividad intrínseco (IRI), el cual combina la fracción maceral reactiva (vitrinita/liptinita), la fracción maceral no reactiva (inertinita/materia mineral intrínseca) y la reflectancia media a la vitrinita. Para evaluar el IRI se utilizaron muestras de carbón de las minas La Yolanda y Guachinte (Valle del Cauca) original, sin tratar, y fracciones concentradas en vitrinita obtenidas en una columna de flotación burbujeante. Este nuevo parámetro de reactividad se comparó con tres parámetros convencionales ampliamente usados para medir la reactividad de carbones, que son: la energía de activación media ponderada (EAMP), temperatura pico (TP) y temperatura final (TF). Los resultados mostraron que los carbones concentrados en vitrinita presentaron mayores valores del IRI en comparación con los originales, lo cual significa que esas fracciones concentradas en vitrinita presentan mayor reactividad en la combustión que los carbones originales sin tratar. Los resultados también mostraron que la EAMP, TP y TF decrecen con el incremento en el IRI, lo cual sugiere que la reactividad en la combustión de los carbones se mejora si su contenido de vitrinita se incrementa.

Palabras clave: índice de reactividad intrínseco, combustión, columna de flotación, flotación espumante, macerales.

ABSTRACT

This work defines a new reactivity coal combustion parameter called intrinsic reactivity index (IRI), combining reactive maceral fraction (vitrinite/liptinite), non-reactive maceral fraction (inertinite/intrinsic mineral matter) and vitrinite reflectance averages. Coal samples from La Yolanda and Guachinte (Valle del Cauca) collieries were used to evaluate the IRI; samples consisted of original and vitrinite concentrated fractions obtained from froth flotation column. This new parameter was compared to three conventional parameters: weighted mean activation energy (WMAE), peak temperature (PT) and final temperature (FT). Results revealed that vitrinite concentrated fractions had higher IRI figures than original coal. This meant that vitrinite concentrated fractions presented higher reactivity to combustion than original coal. Results also showed that EAMP, TP and TF decreased with an increase in IRI, suggesting that coal combustion reactivity becomes improved when vitrinite concentration in coal is increased.

Keywords: intrinsic reactivity index, combustion, flotation column, froth flotation, maceral.

Recibido: junio 27 de 2007

Aceptado: octubre 24 de 2007

Introducción

A nivel mundial se han hecho considerables esfuerzos para establecer cómo usar más eficientemente el carbón en el proceso de combustión. Esta eficiencia de la combustión de un carbón generalmente se mide por medio de su reactividad intrínseca, la cual es función del tipo de carbón, sus características, y de la tecnología utilizada (Urhán, 2000). De igual manera, se ha encontrado (Cloke, 1994) que la composición maceral y mineral del carbón tiene una

influencia significativa sobre los procesos de combustión de carbón pulverizado. En los procesos de combustión, el orden de mayor a menor reactividad de los principales grupos macerales presentes en un carbón es: liptinita > vitrinita > inertinita > materia mineral (Morgan, 1986). Esto se debe a las diferencias entre sus propiedades físicas y químicas. Dichas diferencias determinan la morfología del carbonizado que se obtiene durante la primera etapa

¹ Ingeniero químico. M.Sc., en Ingeniería Química. Doctor en Ingeniería. Profesor asistente, Departamento de Ingeniería, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia, Palmira afrojasgo@unal.edu.co

² Ingeniero químico. M.Sc. Ph.D. Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Colombia. jub-arraz@univalle.edu.co

³ Ingeniero químico. M.Sc., Estudiante de Doctorado en Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Universidad Del Valle, Colombia. luispin@univalle.edu.co

de combustión (Rojas, 2005). El tipo de carbonizado generado durante la etapa de pirólisis rápida y desvolatilización del carbón (primera etapa de la combustión) influye sobre la eficiencia global del proceso de combustión. Aunque la principal influencia en la formación del carbonizado, y por lo tanto en el comportamiento en la combustión, está asociada con la parte orgánica del carbón, la presencia de ciertos tipos de minerales puede también afectar el tipo de carbonizado formado. La presencia o ausencia de ciertos minerales también afectan la estabilidad de la llama y la eficiencia de quemado (Clove, 1994).

El maceral que se presenta en mayor proporción en los carbones a nivel mundial es la vitrinita, mientras que la liptinita es el maceral que ocurre en menor cantidad. Debido a esto, y dado que la vitrinita es el segundo maceral más reactivo, es posible tratar los carbones a través de un proceso de beneficio para concentrar la vitrinita en un carbón y aumentar su reactividad en la combustión. Esta concentración de la vitrinita se logra mediante la reducción de la inertinita y de la materia mineral. Actualmente existen algunos métodos físicos y químicos que pueden usarse para el beneficio del carbón, tales como: separación por densidad, fluidización, separación en medio denso, flotación, separación electrostática y desmineralización ácida (Leonard, 1991). El beneficio físico por flotación espumante es uno de los métodos más comúnmente usados cuando el carbón tiene un tamaño de partícula menor a 38 micras (Honaker, 1996).

La combustión de carbón usualmente a nivel industrial se lleva a cabo en calderas de carbón pulverizado a la que se alimenta carbón con el 75% de las partículas teniendo un tamaño de partícula menor a 75 μm (Lester, 2003). Por lo tanto, la flotación espumante es un proceso adecuado para producir concentrados que cumplen con los requerimientos de la tecnología de calderas de carbón pulverizado. La flotación espumante también se ha utilizado para separar macerales, aprovechando sus diferencias en las propiedades hidrofóbicas y electrocinéticas. Se ha encontrado (Arnold, 1988) que la hidrofobicidad de los macerales decrece en el orden liptinita > vitrinita > inertinita > materia mineral, con un rango típico para el ángulo de contacto entre 90° a 130°, 60° a 70°, 25° a 40°, y por debajo de 30°, respectivamente.

Cualquier proceso de beneficio, ya sea físico o químico, cambia las características petrográficas o minerales del carbón, al igual que su reactividad en la combustión. Varios métodos se han empleado para predecir la reactividad del carbón. Los métodos más simples han relacionado características del carbón tales como la relación combustible carbono fijo / materia volátil (CF/MV) (Skorupska, 1993), la reflectancia media de la vitrinita (Oka, 1987), y el contenido de vitrinita o de vitrinita e inertinita (Pohl, 1984) con la reactividad del carbón en la combustión. De igual manera, el poder calorífico del carbón y el contenido de materia volátil se han incluido en métodos para determinar la estabilidad de la llama y la ignición del carbón (Carpenter, 1995). Estos métodos derivan un índice de reactividad a partir de las

características del carbón anteriormente mencionadas, las cuales están correlacionadas con resultados experimentales como la energía de activación media ponderada (EAMP), la temperatura pico (TP), y la temperatura final (TF), entre otros (Cumming, 1984; Rojas, 2002).

Algunas investigaciones (Su, 2001a, b; Helle, 2001) se han enfocado en derivar un índice de reactividad en función de los macerales del carbón, considerando que el carbón está formado por una fracción reactiva constituida por los macerales liptinita y vitrinita, y una fracción no reactiva conformada por el maceral inertinita. No consideran el efecto que puede tener la materia mineral sobre la reactividad del carbón. Este tipo de índice agrupa los macerales reactivos y no reactivos en un índice llamado maceral, IM, el cual predice que el quemado del carbón se incrementa con el aumento en el contenido de liptinita y vitrinita, pero decrece con el aumento en el contenido de inertinita (Su, 2001a, b). En este artículo se presenta un nuevo índice de reactividad intrínseca, IRI, que incluye a la materia mineral como parte de la fracción no reactiva del carbón y que afecta negativamente en su reactividad en la combustión. El objetivo de este trabajo fue predecir la reactividad del carbón con un nuevo parámetro de reactividad, el IRI, y se comparó con los parámetros convencionales de reactividad (EAMP, TP y TF) usando carbones originales y fracciones de carbón concentradas ricas en vitrinita obtenidas en una columna de flotación espumante a escala piloto.

Desarrollo experimental

Selección y preparación del carbón

Se seleccionaron dos carbones del suroccidente colombiano de las minas La Yolanda y Guachinte, para la preparación de las fracciones concentradas ricas en vitrinita. Su selección se basó en su contenido de vitrinita y sus características de liberación en el proceso de molienda (Piñeres, 2003). Para la liberación de la vitrinita del carbón se tomaron 2 kg de muestra de cada carbón, los cuales se trituraron en seco usando un molino de bolas hasta un tamaño de partícula menor a 38 μm . Este proceso de reducción de tamaño se llevó a cabo en un tiempo de 24 min, tiempo en el cual se garantiza una alta liberación del grupo maceral vitrinita (Piñeres, 2003).

Producción de los concentrados de vitrinita

Las muestras de carbón se concentraron en vitrinita en una columna de flotación a escala piloto (5 m de alto por y 5 cm de diámetro). Las fracciones concentradas ricas en vitrinita se obtuvieron a pH diferente de 7.1, 7.5, 8.0, 9.5 y 11.0. Para alcanzar estas condiciones de pH se utilizó NaOH estándar al 1.1 N. No se utilizó un pH por debajo de 7 debido a que un pH ácido reaccionaría con los materiales de la columna de flotación y de la bomba. Se utilizó un espumante de bajo costo (lauril éter sulfato de sodio) con una concentración de 28% w/w. Se utilizaron tres concentraciones de espumante, que fueron 0.0075%, 0.0100% y 0.0125% v/v. Para todos los

experimentos se trabajó con una concentración de pulpa de 2.5% w/w (1kg de carbón por 40 L de agua) y se adicionaron 3mL de colector (aceite de creosota). Para la generación de burbujas de aire, se empleó un burbujeador de vidrio prensado de 17cm de longitud, por el cual se alimentaba aire a 2.15L/min y a 1.7 bares de presión. El espumante, el cual es suministrado junto con el flujo de aire, se alimentó a la corriente de aire por medio de una bomba peristáltica con un flujo de 42.19mL/min. Para aumentar el tiempo de residencia de la pulpa se recirculó parte del fondo de la torre a un punto localizado a 65 cm de la corriente de alimentación, con el fin de mejorar la separación de vitrinita y aumentar el rendimiento del proceso. Detalles del sistema de flotación y del procedimiento de operación se han descrito anteriormente (Barraza, 2005; Piñeres, 2003). El proceso de separación se realizó en una sola etapa, obteniéndose dos fracciones de carbón: una concentrada rica en vitrinita por la parte superior de la columna y una rica en materia mineral por la parte inferior de la misma. Ambas fracciones se trataron en un filtro a presión, se secaron al aire y se prepararon para posteriores análisis de forma independiente. Todos los experimentos se realizaron por duplicado.

Caracterización de los concentrados ricos en vitrinita

El análisis petrográfico se realizó en un microscopio óptico Leitz con una magnificación de 320 (32x10). Este análisis se llevó a cabo en aceite de inmersión (índice de refracción de 1.518), usando luz blanca, con un conteo de 500 puntos (ASTM D2799). Para realizar el análisis fue necesario usar bloques sólidos constituidos por la muestra de carbón y resina. El bloque se construye mezclando 2 ± 0.3 g de muestra de carbón con la misma cantidad de resina a temperatura ambiente (ASTM D2797). Posteriormente el bloque se pule con una serie de lijas, terminando con el pulido del bloque sobre una seda sintética sobre la que se vierte una suspensión de alúmina.

El análisis termogravimétrico de los carbones originales y sus concentrados se llevó a cabo en un TA Instrument SDT – 2960. Para este análisis se utilizó un tamaño de muestra de 13 ± 1 con un tamaño de partícula menor a $38 \mu\text{m}$. La muestra se calentó a una velocidad de $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ hasta $800 \text{ }^\circ\text{C}$, en atmósfera de aire con un flujo de $100 \text{ cm}^3/\text{min}$. El Analizador Termogravimétrico arrojó información de la pérdida de masa (curva TG) y la velocidad de pérdida de masa (curva DTG), como función del tiempo o de la temperatura. A partir de la curva DTG se obtuvo la temperatura pico (TP) y la temperatura final (TF), las cuales proporcionan una medida comparativa de la reactividad intrínseca (Cumming, 1984; Urhán, 2000) entre las diferentes fracciones concentradas ricas en vitrinita. La TP, leída en la curva DTG, es la temperatura donde la velocidad de pérdida de peso debido al quemado del carbono fijo es máxima, y la TF, leída

en la misma gráfica, es la temperatura donde la velocidad de quemado de la muestra es menor al 1%/min, indicando que la muestra se ha oxidado completamente.

Resultados y discusión

Concentrados ricos en vitrinita

La Tabla 1 presenta el análisis próximo y petrográfico de los carbones originales. Al comparar los dos carbones se observa que el carbón La Yolanda tiene un mayor contenido de ceniza, carbono fijo y azufre total, comparado con el de la mina Guachinte. Respecto al análisis petrográfico, se aprecia que los dos carbones tienen similares contenidos de vitrinita, pero el de la mina La Yolanda tiene bajo contenido de inertinita, alto contenido de materia mineral y no reporta liptinita. El carbón Guachinte muestra mayores contenidos de liptinita e inertinita y bajo contenido de materia mineral. Ambos carbones exhiben similar poder calorífico.

Tabla 1. Análisis de próximo y petrográfico de los carbones originales

Carbón original	Análisis próximo				Análisis petrográfico (vol%)				Rango R (vol%)	Poder calorífico (kJ/kg)
	Cz (%bs)	MV	CF	S _t	V'	L'	I'	MM		
Yolanda 1	15.59	23.27	61.14	2.45	64.0	0.0	2.1	33.5	0.80	5607.9
Guachinte 1	9.79	47.36	42.85	1.6	67.5	16.6	3.8	12.2	0.47	5727.4

Cz: ceniza en base seca; MV: materia volátil, CF: carbón fijo, S_t: azufre total, V': vitrinita, L': liptinita, I': inertinita, MM: materia mineral; R: reflectancia aleatoria de la vitrinita.

La Tabla 2 muestra los resultados del análisis próximo y petrográfico de las fracciones concentradas ricas en vitrinita como una función del pH y de la concentración del espumante. Los resultados indican que en términos generales se presentó un incremento en el contenido de vitrinita y una reducción en el de liptinita e inertinita, comparado con los carbones originales. La concentración de vitrinita en las fracciones flotadas para los carbones Guachinte y La Yolanda están en el rango de 83.1% a 88.9%, y 89.2% a 96.4%, respectivamente.

La concentración más alta de vitrinita en las fracciones concentradas del carbón Guachinte fue obtenida a un pH de 7.1 (sin adición de NaOH) y una concentración del espumante de 0.0075% v/v, mientras que el de la mina La Yolanda obtuvo su más alta concentración de vitrinita a un pH de 7.5 y a la misma concentración del espumante. Estas concentraciones de vitrinita son de las más altas reportadas en la literatura usando una columna de flotación a escala piloto (Barraza, 2005; Piñeres, 2003). También se aprecia que la mayor remoción de cenizas en el proceso de separación fue de 71.66% para el de Guachinte y de 76.47% para el carbón La Yolanda. En términos de remoción de azufre, los máximos valores fueron para Guachinte de 63.16% y para La Yolanda de 76.25%. El error experimental basado en las réplicas fue de $\pm 0.5\%$ para la ceniza, $\pm 2.0\%$ para el contenido maceral y mineral, y $\pm 0.02\%$ para la reflectancia media aleatoria.

Tabla 2. Análisis próximo y petrográfico de muestras de carbón concentradas ricas en vitrinita

Fracción concentrada	pH	Espumante (vol %)	Análisis próximo (%bs)				Análisis petrográfico (vol %)			
			Cz	MV	CF	S _t	V'	L'	I'	MM
Yolanda 2	8.0	0.0075	11.2	25.1	63.6	1.8	92.1	1.8	1.1	5.0
Yolanda 3	8.0	0.0125	12.9	25.9	61.1	1.9	89.2	1.0	0.2	9.6
Yolanda 4	11.0	0.0075	12.2	25.5	62.4	1.7	90.1	0.2	1.1	8.6
Yolanda 5	11.0	0.0125	12.0	25.3	62.6	1.7	95.6	0.9	0.0	3.5
Yolanda 6	9.5	0.0100	9.9	24.8	65.2	1.6	92.1	0.4	0.2	7.3
Yolanda 7	7.5	0.0075	8.5	25.3	66.2	1.4	96.4	0.8	0.0	2.8
Yolanda 8	7.5	0.0125	11.0	25.3	63.6	1.4	95.0	0.2	0.0	4.8
Guachinte 2	8.0	0.0075	6.7	49.1	44.2	1.2	82.6	7.3	3.0	7.1
Guachinte 3	8.0	0.0125	6.8	48.6	44.6	1.3	87.7	2.9	1.5	7.9
Guachinte 4	11.0	0.0075	5.8	49.2	45.1	1.2	81.3	6.4	2.7	9.6
Guachinte 5	11.0	0.0125	6.9	49.1	43.9	1.3	86.4	6.4	2.9	4.3
Guachinte 6	9.5	0.0100	6.6	49.4	44.1	1.2	82.6	6.7	2.4	8.3
Guachinte 7	7.1	0.0075	5.1	49.1	45.8	1.1	88.9	8.1	1.4	1.6
Guachinte 8	7.1	0.0125	6.5	49.1	44.5	1.8	85.5	8.5	2.0	4.0

EAMP, TP y TF como una función del IRI

En la literatura se han definido algunos índices para predecir la reactividad de un carbón (Su, 2001a, b; Helle, 2001). Uno de los empíricamente más representativos es el "índice maceral" (IM), el cual predice que la reactividad de un carbón aumenta con el incremento en el contenido de vitrinite y liptinita pero decrece con el incremento en la reflectancia de la vitrinita y con el contenido de inertinita (Su, 2001a, b). Estos y otros parámetros fueron combinados empíricamente para derivar una expresión para el IM, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$IM = \left(\frac{L + V/R^2}{I^{1.25}} \right) * (HVF)^{2.5} \tag{1}$$

$$HVF = \frac{HV}{30} \tag{2}$$

Donde L, V, e I, son los porcentajes en volumen en base seca libre de materia mineral de liptinita, vitrinita e inertinita, respectivamente; R es la reflectancia media aleatoria de la vitrinita; HV es el poder calorífico en MJ/kg; y HVF es llamado factor del poder calorífico. El número 30, en unidades de MJ/kg, representa el valor típico del poder calorífico de un carbón. HVF representa la influencia de la humedad y de la ceniza sobre la ignición.

Aunque el IM muestra una buena correlación con los carbones en estudio, este presenta problemas numéricos cuando las muestras de carbón no muestran inertinita. Por lo tanto, se creó un nuevo y sencillo índice empírico llamado de reactividad Intrínseca (IRI), el cual involucra dos parámetros en el denominador (contenido de inertinita y materia mineral), a diferencia del IM, que solo involucra un parámetro (contenido de inertinita). Para el cálculo del IRI el contenido de vitrinita y liptinita representa la fracción reactiva del carbón, mientras que la inertinita y la materia

mineral es la fracción no reactiva. El IRI se determina por medio de la siguiente expresión

$$IRI = \frac{L' + V'/R}{I' + MM} \tag{3}$$

Donde L, V, I y MM son los porcentajes en volumen en base seca de liptinita, vitrinita, inertinita y materia mineral, respectivamente; y R es la reflectancia media aleatoria de la vitrinita como un porcentaje en volumen.

Las muestras de carbón original y las fracciones ricas en vitrinita se caracterizaron respecto al análisis próximo y petrográfico, al igual que se determinaron las curvas de quemado en un analizador termogravimétrico, de las que se obtiene

la EAMP, la TP y TF. Los valores de la EAMP se lograron por medio del método de Cumming (Cumming, 1984). La EAMP es un parámetro que determina la reactividad en la combustión de un carbón (Urhán, 2000; Cumming, 1984), de tal manera que cuando dos carbones son comparados entre sí, el carbón que presente el más bajo valor de la EAMP es el que presenta una mayor reactividad en la combustión.

La metodología usada por el método de Cumming para calcular la EAMP consiste en determinar la energía de activación aparente (Ej) y la fracción de pérdida de peso (Fj) debido al quemado de la fracción combustible de la muestra que se está incinerando durante cada región de linealidad. Las regiones de linealidad son obtenidas cuando se grafica el logaritmo del coeficiente de reacción, k, contra el inverso de la temperatura absoluta, T. Esta metodología asume reacción de primer orden y determina la velocidad de pérdida de peso a partir de la derivada de la curva de pérdida de peso. La velocidad de pérdida de peso está dada por:

$$dW/dt = -kW \tag{4}$$

Donde W es el peso de la muestra. El coeficiente de reacción está dado por la ecuación de Arrhenius:

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}} \tag{5}$$

E es la energía de activación aparente, R es la constante universal de los gases, A es el factor de frecuencia y T es la temperatura absoluta. Esta ecuación se puede escribir de la siguiente manera:

$$\ln k = \ln A - E/RT \tag{6}$$

El parámetro de EAMP se obtiene por medio de la ecuación dada por Cumming (Cumming, 1984):

$$EAMP = \sum_{j=1}^4 F_j E_j = F_1 E_1 + F_2 E_2 + F_3 E_3 + F_4 E_4 \quad (7)$$

En este trabajo la mayoría de las fracciones de carbón analizadas presentan entre dos y tres regiones de linealidad en la gráfica de Arrhenius ($\ln k$ frente a $1/T$) y solo una de ellas muestra cuatro regiones de linealidad.

La Tabla 3 despliega los resultados de la EAMP, TP y TF para las muestras de carbón original y las fracciones concentradas ricas en vitrinita a diferente pH y concentraciones de espumante, junto con los valores de los parámetros IRI e IM. Los valores de IM no fueron posibles calcularlos cuando la inertinita no está presente. Se observa que los valores del IRI son mayores que del IM. También se aprecia que las fracciones concentradas del carbón Guachinte tienen valores altos del IRI comparada con las fracciones del carbón La Yolanda, esto indica que las fracciones concentradas ricas en vitrinita de Guachinte tienen mayor reactividad en la combustión que las fracciones de La Yolanda.

Al comparar los valores de TP y TF de los carbones originales con las fracciones concentradas ricas en vitrinita, se observa que los valores de estos parámetros son más bajos en las fracciones concentradas ricas en vitrinita. Esto sugiere que la presencia de grandes cantidades de vitrinita en una muestra de carbón podría ser un elemento clave que contribuye al mejoramiento de la reactividad del carbón en la combustión.

Respecto a la EAMP (Tabla 3) se notó un comportamiento similar en las muestras concentradas ricas en vitrinita del carbón Guachinte, mientras que para las de La Yolanda dicho comportamiento no es muy claro. Esto se puede explicar dado que la EAMP es un valor promedio de dos o tres pendientes obtenidas de las zonas de linealidad a partir del gráfico de Arrhenius.

La variación del IRI respecto a la EAMP, la TP y la TF para los carbones originales y las fracciones concentradas de vitrinita de los dos carbones, se exhiben en las Figuras 1 a 3, respectivamente. La Figura 1, para los dos carbones, muestra que existe cierta tendencia a decrecer la EAMP con el incremento en el IRI. Para corroborar esta tendencia, se correlacionaron los datos de TP y TF como función de la IRI (figuras 2 y 3). Los resultados confirman que existe también tendencia de decrecer la TP y la TF al aumentar el IRI. Por lo tanto, la reactividad en la combustión se puede mejorar usando carbones concentrados ricos en vitrinita.

Tabla 3. EAMP, TP y TF de los carbones originales y carbones concentrados ricos en vitrinita

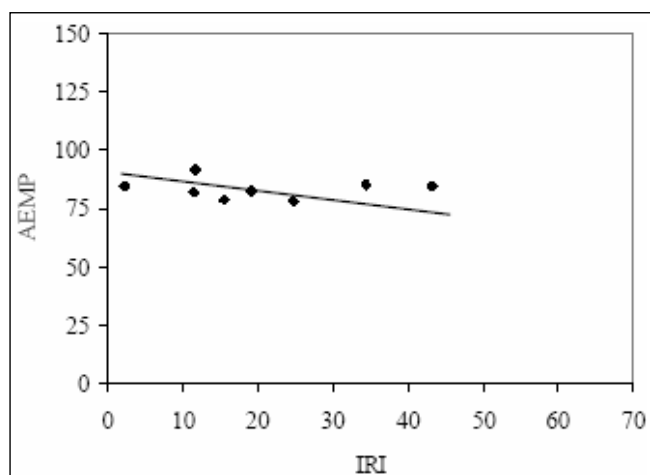
Fracción de carbón	pH	Espumante (%)	Parámetros de reactividad			Índice de reactividad intrínseco, IRI	Índice maceral, IM
			EAMP (kJ/mol)	TP (°C)	TF (°C)		
Yolanda 1	-----	-----	85.0	551	667	2.2	0.5
Yolanda 2	8.0	0.0075	82.7	530	637	19.2	1.9
Yolanda 3	8.0	0.0125	81.8	533	650	11.5	15.5
Yolanda 4	11.0	0.0075	91.7	534	641	11.6	1.8
Yolanda 5	11.0	0.0125	85.4	533	637	34.4	-----
Yolanda 6	9.5	0.0100	79.1	537	646	15.4	16.0
Yolanda 7	7.5	0.0075	84.6	531	637	43.3	-----
Yolanda 8	7.5	0.0125	78.0	533	637	24.8	-----
Guachinte 1	-----	-----	137.6	535	594	9.9	0.9
Guachinte 2	8.0	0.0075	99.9	513	589	17.8	1.5
Guachinte 3	8.0	0.0125	92.4	495	586	19.8	3.8
Guachinte 4	11.0	0.0075	76.1	501	584	14.3	1.7
Guachinte 5	11.0	0.0125	92.0	506	587	26.0	1.7
Guachinte 6	9.5	0.0100	98.4	510	587	16.8	2.0
Guachinte 7	7.1	0.0075	90.1	502	584	64.7	4.3
Guachinte 8	7.1	0.0125	84.8	498	585	31.2	2.6

Por otro lado, el carbón original de la mina La Yolanda y sus concentrados ricos en vitrinita muestran más altos valores de TP y TF comparado con el carbón Guachinte (Figura 3). Esto sugiere que las fracciones concentradas en vitrinita de Guachinte son más reactivas que las del carbón La Yolanda.

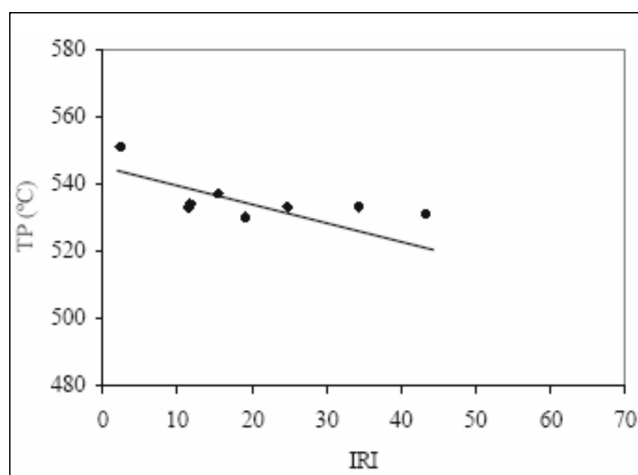
Conclusiones

A través de la definición de nuevo parámetro para evaluar la reactividad de un carbón, llamado Índice de Reactividad Intrínseco, IRI, se consideró el efecto de las fracciones reactiva (vitrinita y liptinita del carbón) y no reactiva (inertinita y materia mineral) del carbón, junto con el efecto que tiene el rango del carbón (representado por la reflectancia media aleatoria de la vitrinita).

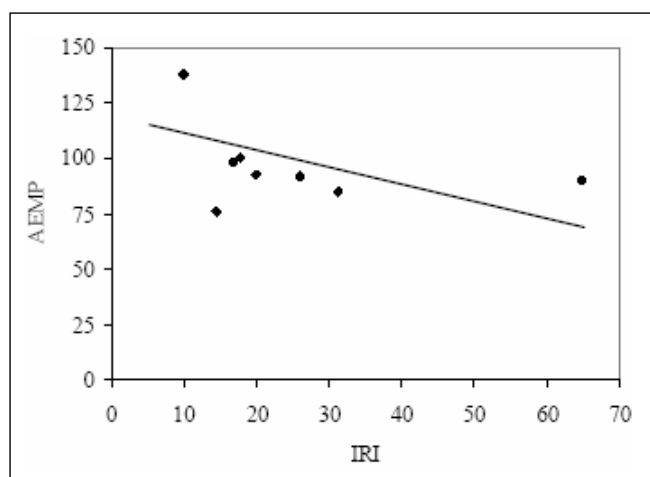
Los carbones concentrados en vitrinita presentaron mayores valores del IRI en comparación con los originales. Esto significa que esas fracciones concentradas en vitrinita y reducidas en materia mineral presentan mayor reactividad en la combustión que los carbones originales sin tratar. Para corroborar lo anterior se encontró también que los carbones concentrados en vitrinita tienden a decrecer su energía de activación media ponderada (EAMP), temperatura pico (TP) y temperatura final (TF) al incrementarse el IRI.



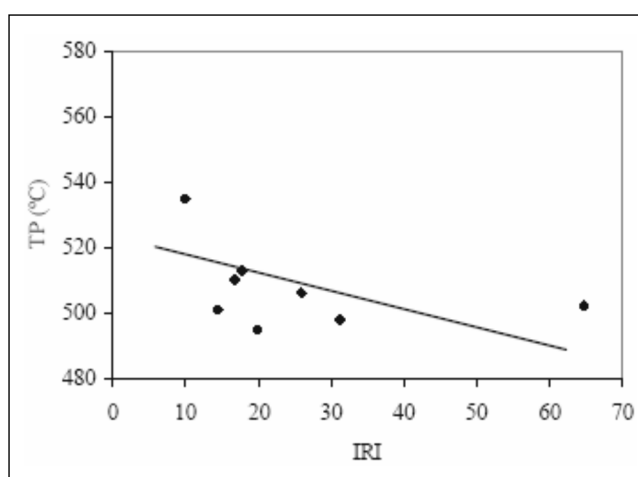
(a) Carbone La Yolanda



(a) Carbone La Yolanda



(b) Carbone Guachinte



(b) Carbone Guachinte

Figura 1. Variación de la energía de activación media ponderada con el índice de reactividad intrínseco para los carbones originales y sus concentrados ricos en vitrinita

Figura 2. Variación de la TP con el IRI para los carbones originales y sus concentrados ricos en vitrinita.

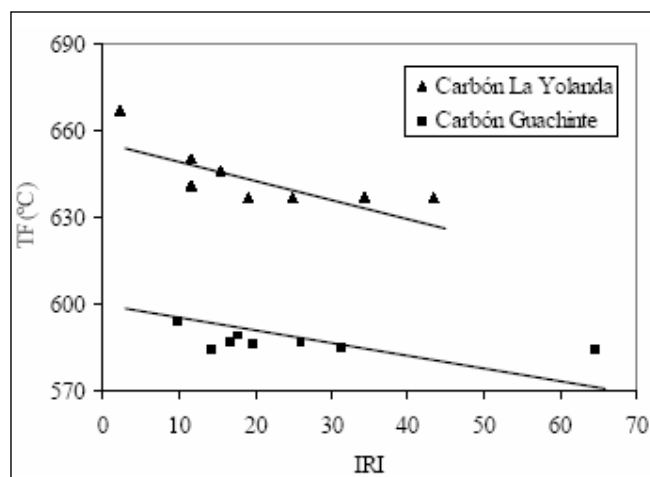


Figura 3. Variación de la TF con el IRI para los carbones originales y sus concentrados ricos en vitrinita

Los valores de IRI presentan una mayor variación que el índice de macerales (IM) y que los parámetros convencionales (EAMP, TP y TF). Esto sugiere que el IRI es un parámetro práctico para predecir la reactividad de un carbón en la combustión, con el solo conocimiento de la concentración de los macerales vitrinita, liptinita e inertinita, la materia mineral y la reflectancia media de la vitrinita.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Colciencias por su soporte financiero; al Laboratorio de Combustión y Combustibles de la Universidad del Valle y al Laboratorio de Petrografía de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por su soporte técnico.

Nomenclatura

A: Factor de frecuencia o coeficiente preexponencial de la ecuación de Arrhenius, min^{-1} .

bs: base seca.

Cz: Porcentaje de ceniza en base seca, %.

E: Energía de activación aparente, kcal/mol.

EAMP: Energía de activación media ponderada, kcal/mol.

F_i: Fracción de pérdida de peso debido al quemado de la fracción combustible de la muestra.

HV: Poder calorífico, MJ/kg.

I: Porcentaje de inertinita en base seca libre de materia mineral, %.

I': Porcentaje de inertinita en base seca, %.

IM: Índice maceral.

IRI: Índice de reactividad Intrínseco.

k: Coeficiente de reacción o constante de reacción, min⁻¹.

L: Porcentaje de liptinita en base seca libre de materia mineral, %.

L': Porcentaje de liptinita en base seca, %.

MM: Porcentaje de materia mineral en base seca, %.

R: Reflectancia media aleatoria de la vitrinita, %. Constante universal de los gases, 1.987×10^{-3} kcal / mol K.

S_t: Porcentaje de azufre total en base seca, %.

t: Tiempo de quemado, min.

T: Temperatura absoluta, K.

TF: Temperatura final, °C.

TP: Temperatura pico, °C.

V: Porcentaje de vitrinita en base seca libre de materia mineral, %.

V': Porcentaje de vitrinita en base seca, %.

W: Peso de la muestra, mg.

Bibliografía

- ASTM D2797., American Society of Testing Materials., Coal samples for microscopical analysis by reflected light. Philadelphia, 1994.
- ASTM D2799., American Society of Testing Materials., Microscopical determination of volume percent of physical components of coal, Philadelphia, 1994.
- Arnold, B. J., Aplan, F. F., The hydrophobicity of coal macerals., *Fuel*, Vol. 68, 1989, pp. 651-658.
- Barraza, J., Piñeres J., A pilot-scale flotation column to produce beneficiated coal fractions having high concentration of vitrinite maceral., *Fuel*, Vol. 84, 2005, pp. 1879-1883.
- Carpenter AM., IEA Coal Research., London, 1995.
- Cloke, M., Lester, E., Characterization of coals for combustion using petrographic analysis: a review., *Fuel*, Vol. 73, No. 3, 1994, pp.315-320.
- Cumming, J.W., Reactivity assessment of coal via a weighted mean activation energy., *Fuel*, Vol. 63, 1984, pp. 1436 - 1440.
- Helle, S., Gordon, A., Alfaro, G., Garcia, X., Ulloa, C., Coal Blends combustion., 18th World energy council, Buenos Aires, October, 2001.
- Honaker, R, Monhanty, M., Crelling, J., Coal maceral separation using column flotation., *Mineral Engineering*, Vol. 9, 1996, pp. 449 - 464.
- Leonard, J., Hardinge, B., Coal Preparation, Society for Mining., Metallurgy and Exploration, inc. 1991.
- Lester, E., Watts, D., Cloke, M., Burnout prediction using advance image analysis coal characterization techniques., 12th Int. Conference on Coal Science, 2003, pp. 6C2.
- Morgan, P. A., Robertson, S. D., Usnworth, J., Combustion studies by thermogravimetric analysis: 2. Char oxidation., *Fuel*, Vol. 66, 1987, pp. 210-215.
- Oka, N., Murayama, T., Matsuoka, H., Yamada, S., Yamada, T., Shinozaki, S., Shibaoka, M. and Thomas, C., The influence of rank and maceral composition on ignition and char burnout of pulverized coal., *Fuel Processing Technology*, Vol. 15, 1987, pp. 213-224.
- Piñeres, J., Separación de grupos macerales en fracciones beneficiadas de carbón obtenidas por flotación burbujeante., M.Sc. Thesis., Universidad del Valle – Colombia, 2003.
- Pohl, J. H., Fuels Evaluation Report: SRP Coals, Energy and Environmental Research Corporation., CA, 1984.
- Rojas, A. F., Barraza, J. M., Urhan, M., Chavez, A., The Proceeding of the 27th International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems., Sheraton Sand Key Clearwater, Florida, USA, 2002, 325.
- Rojas, A., Estudio cinético de la combustión del char de carbón pulverizado., Tesis doctoral. Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Química, Cali – Colombia, 2005.
- Skorupska, N. M., IEA Coal Research., London 1993.
- Su, S., Pohl, J. H., Holcombe, D., Hart, J. A., A proposed maceral index to predict combustion behavior of coal., *Fuel*, Vol. 80, 2001a, pp. 699-706.
- Su, S., Pohl, J. H., Holcombe, D., Hart, J. A., Techniques to determine ignition, flame stability and burnout of blended coals in p.f. power station boilers., *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 27, 2001b, pp. 75-98.
- Urhán, R. M., Final inform project: Mejora de la Eficiencia de la Combustión de Carbones Utilizados en el Valle del Cauca Mediante un Estudio Previo de su Reactividad., Ecocarbon – Colciencias - Universidad del Valle, Cali – Colombia, 2000.