

ACTIVACIÓN DE CARBÓN MINERAL MEDIANTE PROCESO FÍSICO EN HORNO TUBULAR HORIZONTAL Y ATMÓSFERA INERTE

Lina Marcela Uribe ¹, María Esperanza López ², Andrés Giovanni González ³.

¹ Estudiante Doctorado en Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Concepción, Dirección Edmundo Larenas 285 Concepción-Chile, teléfono (056-9) 827-920-10; luribev@udec.cl.

² Doctora en Ciencia y Tecnología de Materiales, Profesora, Departamento de Ingeniería de Materiales, Grupo GIPIMME, Universidad de Antioquia, Medellín; melopez@udea.edu.co.

³ Estudiante de Doctorado en Ciencia de la Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Materiales, Grupo GIPIMME, Universidad de Antioquia, Medellín; agonzalez@gmail.com.

Contacto: Calle 67 No. 53 - 108 Bloque 18, Medellín, Colombia, teléfono (574) 2198540

Resumen

Este estudio se realizó con la intención de otorgar valor agregado a un carbón mineral tipo *ripio* (diámetro de abertura del tamiz 9.5 mm), de bajo precio en el mercado, procedente del Suroeste de Antioquia. Se pretendió determinar a nivel de laboratorio condiciones favorables para lograr la activación de las partículas de carbón, mediante un proceso térmico y vapor de agua. Las muestras se sometieron a diferentes condiciones: tiempo de carbonización (60 y 90 min) y temperatura de activación (800, 900 y 950 °C), para posteriormente analizar y comparar las características físicas, térmicas y texturales desarrolladas, en relación a los rangos de los carbones activados comerciales. Mediante las técnicas de caracterización empleadas: adsorción de soluciones, isothermas de adsorción de nitrógeno (modelo BET), análisis termogravimétricos y diferencial (TGA y DTA), entre otras, se logró observar que las condiciones tiempo de carbonización y temperatura de activación resultaron ser favorables para la obtención de carbón activado, siendo más influyente la temperatura, dado que a medida que ésta aumentó las características mejoraron.

Palabras claves: carbón mineral, carbón activado, activación térmica, carbonización, adsorción.

Abstract

This study was intended for increasing the added value of the mineral coal type *ripio* extracted from the Southwest region of Antioquia, due to its low price on the market. One of the objectives was to determinate at laboratory scale a favorable condition for obtaining the activation of coal particles, trough thermal process with steam water. The samples were immersed into different conditions: carbonization time (60 and 90 min) and activation temperatures (800, 900 and 950 °C), with the objective of analyze and compare physic, thermal, and textural characteristics that this samples developed, under this conditions. Characterization techniques like solution adsorption, isothermal nitrogen adsorption (model BET), thermogravimetrics and differential analysis (TGA and DTA), and others helped to know that the most influential variable was the temperature, because when it was increased, the final product characteristics were improved.

1. INTRODUCCIÓN

El interés de utilizar como fuente el carbón mineral para producir carbón activado, se debe a que en Colombia los niveles de consumo de carbón son modestos comparados con la abundancia de reservas, la distribución geográfica de las cuencas carboníferas y el potencial identificado para su utilización. La explotación de carbón mineral en el país se reduce a la extracción y comercialización, sin tener en cuenta que la elaboración de productos terminados tal como es el caso del carbón activado, puede en algunos casos ser más atractivo tanto para los clientes como para el productor mismo, teniendo en cuenta que en Colombia la mayoría del carbón activado que se usa a nivel industrial y en servicios públicos proviene de importaciones de países como Holanda, México y Brasil.

Sin embargo, en nuestro país existen antecedentes de numerosos estudios para la obtención de carbón activado a nivel de laboratorio a partir de diferentes precursores, entre los que se destacan, los elaborados por Estupiñán y Vásquez [1] quienes lograron la obtención de un material carbonáceo activado de antracita para posibles aplicaciones en hidrometalurgia. También vale la pena resaltar los estudios realizados por Zapata, Rojas y Arenas [2], en donde se intentó producir carbón activado en reactores de lecho fluidizado a partir de carbón sub-bituminoso. Además de ello se han presentado estudios de prefactibilidad económica para la fabricación de carbón activado a nivel industrial, entre los que se encuentran el realizado por Gómez y Zapata [3] en el que se investiga su viabilidad y sus impactos sociales y ambientales. Todos estos aportes ayudan a despertar el interés de continuar fomentando las bases para darle, en un futuro un valor agregado al carbón antioqueño, que debido a sus bajos costos y a su producción de mediana y baja escala no logra, en algunos casos, ser tan atractivo.

El carbón activado posee una estructura porosa que contiene pequeñas cantidades de diferentes heteroátomos (átomos diferentes a los átomos de carbono) tales como el oxígeno y el hidrógeno, que interactúan con los átomos de carbono, generando unos grupos superficiales los cuales favorecen los procesos de adsorción. Además, la estructura porosa es tal vez la principal propiedad física que caracteriza a los carbones activados y ésta se encuentra entre las capas desordenadas de grafito. De acuerdo a la IUPAC los poros se pueden clasificar en:

- Microporos con una amplitud de poro menor que 2×10^{-9} m.
- Mesoporos con una amplitud de 2.0 a 50×10^{-9} m.
- Macroporos con una amplitud de poro mayor que 50×10^{-9} m.

El área superficial total de estos poros, incluida el área de sus paredes, es muy amplia, siendo ésta la principal razón de su gran capacidad de adsorción [1].

Un carbón activado es estructuralmente un material carbonoso, existe por lo tanto gran cantidad de materias primas, en la práctica, la madera, la cáscara de coco, las semillas de frutas, los carbones, los lignitos, el coque del petróleo, etc. son todos apropiados para emplearse como precursores para elaborar carbón activado por su bajo costo y bajo contenido inorgánico. Las propiedades resultantes del producto dependen del precursor, y además se deben en gran medida al tratamiento de activación [1].

Existen muchas formas de obtención de carbón activado, sin embargo, todos esos métodos de producción pueden clasificarse en dos grupos claramente definidos:

- **Activación térmica.** Generalmente, consiste en dos pasos consecutivos. El primer paso es la carbonización térmica de la materia prima, donde toma lugar la desvolatilización, este proceso se lleva a cabo a altas temperaturas, para producir un carbón de carácter rico. El segundo paso es la activación, donde el carbón restante es parcialmente gasificado con un agente oxidante (comúnmente vapor de agua o CO_2). Si ambos pasos se realizan simultáneamente, el proceso es llamado activación directa.
- **Activación química.** Ésta se realiza en un sólo paso, la materia prima en primer lugar es impregnada con una cantidad determinada de un agente químico y entonces es calentada. El producto debe ser lavado para eliminar cualquier exceso de agente químico antes de la carbonización.

En este estudio se pretendió fijar las variables tiempo de carbonización y temperatura de activación, utilizando el método de activación térmica con vapor de agua, las cuales permitieran la activación del carbón mineral procedente de un carbón tipo ripio (diámetro de abertura del tamiz 9.5 mm) procedente del suroeste de Antioquia, Colombia, y la posterior comparación de las características finales de éste frente a los carbones activados comerciales.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materia prima

El carbón mineral procedente del suroeste de Antioquia, se sometió a un proceso de molienda en un molino centrífugo de bolas marca Retsch, con el fin de obtener un mineral que se encontrara en un tamaño de partícula aproximado de 112,5 μm , correspondiente al mineral pasante malla 100 Tyler, retenido malla 200 Tyler, tamaño recomendado para lograr, luego de un proceso de carbonización y activación, un carbón activado tipo polvo.

2.2. Carbonización y activación

El equipo utilizado para llevar a cabo la carbonización y la activación del carbón mineral fue un horno tubular horizontal marca Carbolite.

El proceso de **carbonización** consistió en someter las diferentes muestras, en una atmósfera inerte de nitrógeno a una temperatura de 900°C. Se tomaron dos tiempos diferentes de carbonización las cuales fueron 60 y 90 min (ver Tabla 1).

En el proceso de **activación**, las diferentes muestras se llevaron en presencia de N_2 gaseoso hasta una temperatura de 800 y 950 °C, alcanzada esta temperatura se pasaba a un flujo de vapor-nitrógeno. Las muestras se mantuvieron bajo esas condiciones durante un tiempo de

60 min, al finalizar este tiempo de reacción, se pasaba nuevamente a atmósfera de nitrógeno hasta llegar a temperatura ambiente (ver Tabla 1).

Tabla 1. Condiciones de los experimentos realizados.

Muestra N°	Tiempo de carbonización (min)	Temperatura de activación (°C)	Tiempo de activación (h)
M1	60	900	60
M2	90	900	60
M3	Mejor resultado entre prueba 1 y 2	800	60
M4	Mejor resultado entre prueba 1 y 2	950	60

3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

3.1. Caracterización materia prima

La materia prima procesada se caracterizó mediante un análisis termogravimétrico (TGA) y diferencial (DTA) en un equipo marca TGA instruments modelo TGA 2950, esto con el fin de determinar de manera más exacta y bajo una atmósfera de nitrógeno, el porcentaje de carbono que poseía el mineral, además de su humedad, volátiles y cenizas.

3.2. Caracterización de los carbones activados

3.2.1. Caracterización preliminar por adsorción de soluciones de los carbones activados

Con el objetivo de analizar las características texturales, se utilizaron inicialmente las técnicas de adsorción de soluciones (índice de azul de metileno y número de yodo).

El Azul de metileno, es el número de mililitros de una solución estándar de azul de metileno decolorada por 0,1 g de carbón activado [4]. Es un método rápido de conocer la capacidad de adsorción de un carbón activado frente a moléculas grandes (macroporos). El proceso consistió en adicionar 1 ml inicial de azul de metileno esperar decoloración en 5 min, y seguir adicionando hasta su saturación.

El Número de yodo, está definido como los miligramos de yodo adsorbidos por un gramo de carbón, este procedimiento puede relacionarse de manera indirecta con el área superficial del carbón activado, el cual da indicios de microporos al ser una molécula de diámetro pequeño [4]. El proceso consistió en titular y registrar el volumen de tiosulfato gastado para decolorar una solución que provenía del filtrado que se generaba al poner en contacto el carbón activado con HCl (5% en peso) y yodo. Para luego mediante la realización de cálculos que tenían en cuenta las concentraciones de las soluciones y las cantidades de carbón y tiosulfato, lograr el número de yodo de cada una de las muestras.

3.3. Caracterización detallada

La caracterización detallada, se le realizó principalmente a tres muestras representativas en donde una de ellas era el carbón mineral y las otras dos fueron aquellos carbones activados que bajo las diferentes condiciones establecidas, obtuvieron los mejores resultados, frente al índice de azul de metileno y número de yodo. El análisis textural, se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés), se analizaron tanto muestras de carbón mineral como aquellas activadas bajo las diferentes condiciones, con el fin de observar el desarrollo de la porosidad en ellas.

3.3.1. Microscopía electrónica de barrido

El análisis para determinar la topografía de las partículas, se realizó con un microscopio electrónico de barrido marca JEOL JSM-6490 LV. Las muestras fueron recubiertas con una capa de oro previo al análisis, con el objetivo de hacer la muestra conductora y poder así observar la imagen. La obtención de las imágenes se logró con un voltaje de 20kV. Se realizaron observaciones a diferentes ampliaciones, las menores ampliaciones se usaron con el fin de observar las características generales de las partículas, como morfología y tamaño, y las mayores, para observar las características de la superficie.

3.3.2. Análisis de área superficial y distribución de tamaño de poro

El análisis se realizó mediante un equipo de adsorción de gases Micromeritics ASAP 2010. Para el análisis se pesaron aproximadamente 100 mg, la muestra se desgasificó en vacío a temperatura ambiente, lograda una presión de 4 μ m de Hg, se puso una manta de calentamiento alrededor de la muestra a 523K (250 °C), se dejó desgasificar durante 10 horas, luego de este proceso la muestra se trasladó al lugar de análisis del equipo, realizando entonces la adsorción de N₂ a 77K (-196 °C).

3.3.3. Análisis físico

- **Tamaño de partícula.** La distribución granulométrica se llevó a cabo mediante difracción láser en medio húmedo en un equipo Hydro 2000MU. En este caso el medio para lograr la dispersión de las partículas fue agua.
- **Humedad (%).** El procedimiento para calcular el porcentaje de humedad fue simplemente pesar una cantidad aproximada de 2 g de muestra, y someterla a un proceso de secado en una mufla a una temperatura de 110 °C durante 2 h, luego se dejó enfriar en un desecador y se pesó rápidamente. El % de humedad está dado por la ecuación 1 [4]:

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{Pérdida de peso}}{\text{Peso de muestra}} \times 100 \quad 1$$

- **Cenizas (%).** El cálculo de cenizas se obtuvo luego de realizar el análisis de estabilidad térmica, mediante el análisis termogravimétrico en atmósfera de aire, pues en éste, el porcentaje de ceniza, corresponde al porcentaje del residuo que queda al finalizar el análisis.
- **Densidad.** La densidad de los carbones activados obtenidos experimentalmente y del carbón precursor, se calculó de acuerdo a la ecuación 2 [4]:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Peso de la muestra en gramos} \times 100 - \% \text{humedad}}{\text{Volumen de la muestra en cm}^3 \times 100} \quad 2$$

3.3.4. Análisis de estabilidad térmica

Se realizó un análisis termogravimétrico (TGA, Thermogravimetric Analysis) en atmósfera de aire, a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min hasta una temperatura de 945 °C. Al mismo tiempo se realizó un análisis térmico diferencial (DTA, Diferencial Thermal Analysis) con el fin de analizar la pérdida de masa.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La mayoría de los resultados de las diferentes muestras obtenidas experimentalmente, fueron comparados frente a los rangos en los cuales se encontraban los carbones activados comerciales, además en la fase de adsorción de azul de metileno, se contaba con una muestra comercial, a la cual se le analizó al igual que a las experimentales el tiempo de respuesta en relación al proceso de adsorción del azul de metileno.

4.1. Análisis de la materia prima

La Tabla 2, muestra los resultados del análisis termogravimétrico del carbón mineral procesado procedente del suroeste de Antioquia concentrado entre las mallas 100 y 200 Tyler. De esta forma, se observan los porcentajes de humedad, material volátil, carbono y ceniza, notándose el alto porcentaje de volátiles que presenta este tipo de carbones.

Tabla 2. Resultados del análisis termogravimétrico (TGA).

	Humedad Residual (%)	Cenizas (%)	Material Volátil (%)	Carbono fijo (%)
Carbón mineral	6,96	5,56	39,70	47,78

De otro lado, este análisis permitió estimar la cantidad suficiente de cada una de las muestras tanto para la etapa de activación como la de caracterización, de acuerdo al porcentaje de carbono reportado.

4.2. Carbonización y activación

La Tabla 3 permite apreciar los porcentajes de pérdida de peso, obtenidos en cada etapa y durante todo el proceso, se observa que las pérdidas de peso durante la etapa de carbonización (ver Tabla 3), estuvo muy próxima a la estimada mediante el análisis termogravimétrico (ver Tabla 2), de acuerdo al porcentaje de carbono fijo.

Tabla 3. Porcentajes de pérdida en los procesos de carbonización y activación.

Muestra Nro.	Pérdidas carbonización (% en peso)	Pérdidas activación (% en peso)	Pérdida total (% en peso)
M1	49,62	28,71	78,33
M2	50,55	24,83	75,38
M3	49,62	15,60	65,22
M4	49,62	41,73	91,35

Los resultados de las pérdidas de peso de las muestras M1 y M2, en la etapa de carbonización, se encontraron muy próximos, es por esto, que se **fijó el tiempo de carbonización de 60 min** para M3 y M4 (ver Tabla 1).

En relación a las muestras M3 y M4, se aprecia que al disminuir la temperatura de activación en este caso a 800 °C (M3) ocurre una menor pérdida de peso (ver resultados muestra M3), a diferencia de lo que ocurre al aumentar la temperatura de activación en sólo 50°C (ver resultados M4), en donde se encuentran pérdidas por la activación del 41.73% en peso. Esto se debe a que a bajas temperaturas la reactividad C-H₂O no es muy elevada, de forma que el agente activante accede al interior de la partícula, reacciona con el carbón y ensancha la porosidad obtenida en el carbonizado, pero los productos CO y H₂ en este caso, actúan como inhibidores del proceso, no permitiendo así la entrada de nuevas moléculas. Al elevar la temperatura, en cambio, baja el efecto inhibidor de los productos lo cual favorece la creación de una mayor porosidad, pero simultáneamente ocurre un quemado externo en las partículas, debido a las violentas interacciones vapor-muestra, las cuales generan que un porcentaje de ella se transformen como CO y CO₂ [5].

4.3. Caracterización preliminar

4.3.1. Azul de metileno

En la Tabla 4, se muestran los resultados promedios de cada una de las muestras activadas frente al índice de azul de metileno y el número de yodo. Además, se tiene como referencia el de un carbón activado polvo comercial (LMG 442).

Observando la columna de los resultados de azul de metileno en la tabla 4, se puede notar que la muestra M4 activada a una mayor temperatura presentó un mayor índice de azul de metileno comparado con los demás carbones obtenidos sin embargo permanece debajo del comercial y el tiempo de respuesta fue muy lento.

Frente al índice de yodo (ver tabla 4), se observa como éste disminuye al incrementar el tiempo de carbonización (ver resultados M1 y M2), esto pudo deberse a que al prolongar el tiempo de permanencia, la porosidad generada pudo llegar a taponarse con cenizas [6] o podría deberse a un mayor orden estructural, lo que desfavorecía los procesos de adsorción.

De otro lado, se observa que el número de yodo (área superficial) aumenta al incrementar la temperatura de activación (ver resultados M1, M3 y M4), lo cual se debe al incremento de la microporosidad debida a las fuertes interacciones que ocurren entre la muestra y el vapor. Más adelante, se compara el área superficial obtenida de manera indirecta, con la conseguida mediante adsorción de nitrógeno.

Tabla4. Resultados promedios índice de azul de metileno para las diferentes muestras.

Muestra Nro.	Índice de azul de metileno (mg/0.1g)[7]	Número de yodo mg I/g de carbón [7]
Carbón Comercial [7]	12	500-1200
M1	4	446,77
M2	3	417,73
M3	1	354,35
M4	9	617,26

4.4. Caracterización detallada

4.4.1. Microscopia electrónica de barrido SEM

4.4.1.1. *Carbón mineral*

Mediante el análisis SEM del carbón mineral (Figura 1), se logró observar la morfología irregular de las partículas de carbón (100X) y la ausencia de porosidad al ver su textura totalmente lisa (300X).

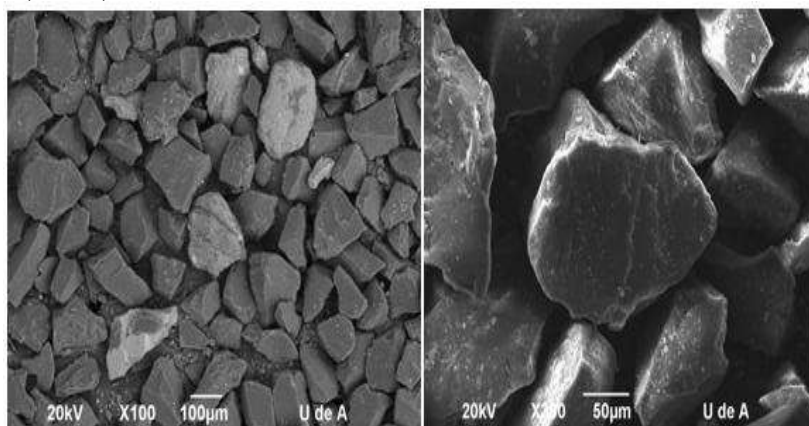
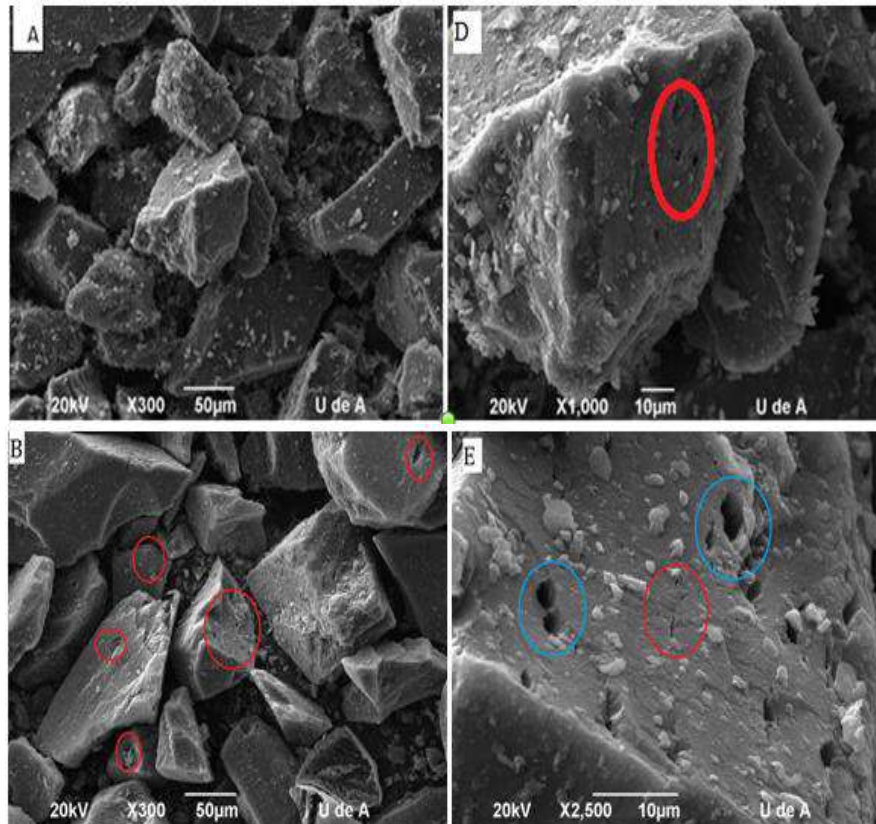


Figura1. Imagen SEM del carbón mineral a 100X (izquierda) y 300X (derecha).

4.4.1.2. Carbones activados

En la Figura 2, se muestran las imágenes correspondientes a los carbones activados a 800(A-D), 900(B-E) y 950 °C (C-F), correspondientes a las muestras M3, M1 y M4 respectivamente. La muestra M3 (Figura 2 (D)), presenta un desarrollo pobre de macroporosidad (encerrado en rojo), esto debido a que el tiempo fijado de activación al trabajar por debajo de la temperatura de carbonización no resultó ser suficiente para generar mayor estructura microporosa.

En la Figura 2 (E), correspondiente a la muestra M1, se observa un buen desarrollo macroporoso ($>500 \text{ \AA}$) (encerrados en azul), sin embargo es de notar pequeñas fisuras en las partículas de carbono, que muestran poros aún por desarrollarse (encerrados en rojo), lo cual indica nuevamente la necesidad de prolongar el tiempo de activación o de aumentar la temperatura de este. En la Figura 2 (F), se muestra un mayor tamaño de los macroporos (encerrados en rojo), y también como la materia mineral tiende a aglomerarse (encerada en azul), posibilitando así el aumento del tamaño de los poros, pues estas interactúan esta con las partículas carbonizadas [8].



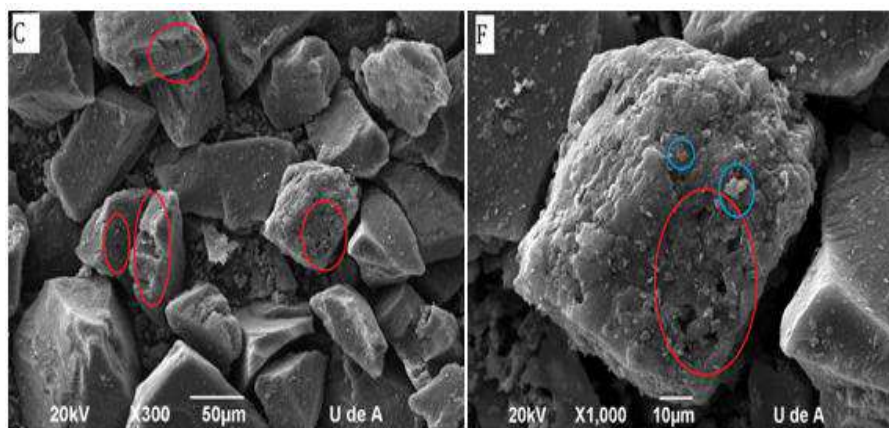


Figura 2. Imágenes SEM, de los carbones activados: 800°C (M3) (A, D) ,900°C (M1) (B,E), y 950 °C (M4) (C,F) todos a 300X y 1000X.

4.4.2. Análisis de área superficial y distribución de tamaño de poro

En la Tabla 5, se presenta los resultados del área superficial BET, el tamaño y volumen de poro del carbón mineral y los carbones activados a 900 (M1) y 950 °C (M4), éstos se comparan con rangos típicos que presentan los carbones comerciales. M1 y M4 se seleccionaron, por presentar las mejores características en los análisis preliminares.

Mediante el modelo BET, en la Tabla 5 se observa incrementa el área superficial pasando de un área de 3,23 m²/g a un área superficial de 623,29 (M1) y 659,45 m²/g (M4), encontrándose dentro del rango de los carbones comerciales. Además, se observa que el área estuvo muy cercana a la calculada de manera indirecta mediante el número de yodo para la muestra M4, mientras que en la muestra M2 estas no se encontraron próximas, esto pudo deberse a errores experimentales. (Ver resultados Tabla 4). En relación al tamaño de poro (<20 Å), las muestras M1 y M4, se clasifican como carbones altamente microporosos [1], de otro lado, el tamaño y el volumen de poro que se presenta en el carbón mineral, se atribuye a pequeñas fisuras en las partículas.

Tabla 5. Análisis de área y tamaño y volumen de poro (modelo BET).

Resultado	Carbón mineral	M1	M4	Rangos típicos carbones comerciales [7]
Área Superficial BET (m ² /g)	3,23 ± 1,09	623,29 ± 13,65	659,45 ± 14,31	500 - 1200
Tamaño de Poro H-K (Å)	29,86	6,76	6,54	0,7-500
Volumen de Poro(cm ³ /g)	0,01	0,55	0,59	0,2-1,0

La Figura 3, corresponde a las isotermas de adsorción, y muestra como M1 y M4 presentan isotermas tipo I característica en materiales microporosos, los cuales a bajas presiones relativas sufren una abrupta adsorción de N₂, además la isoterma no es completamente lineal, en ella se presenta cierta pendiente en su meseta; fenómeno que indica la

continuación del proceso de adsorción a presiones relativamente mayores debido la existencia de cierta mesoporosidad desarrollada. El carbón mineral en cambio presenta una isoterma tipo III donde la adsorción de nitrógeno es casi nula correspondiendo a un carbón no poroso [1].

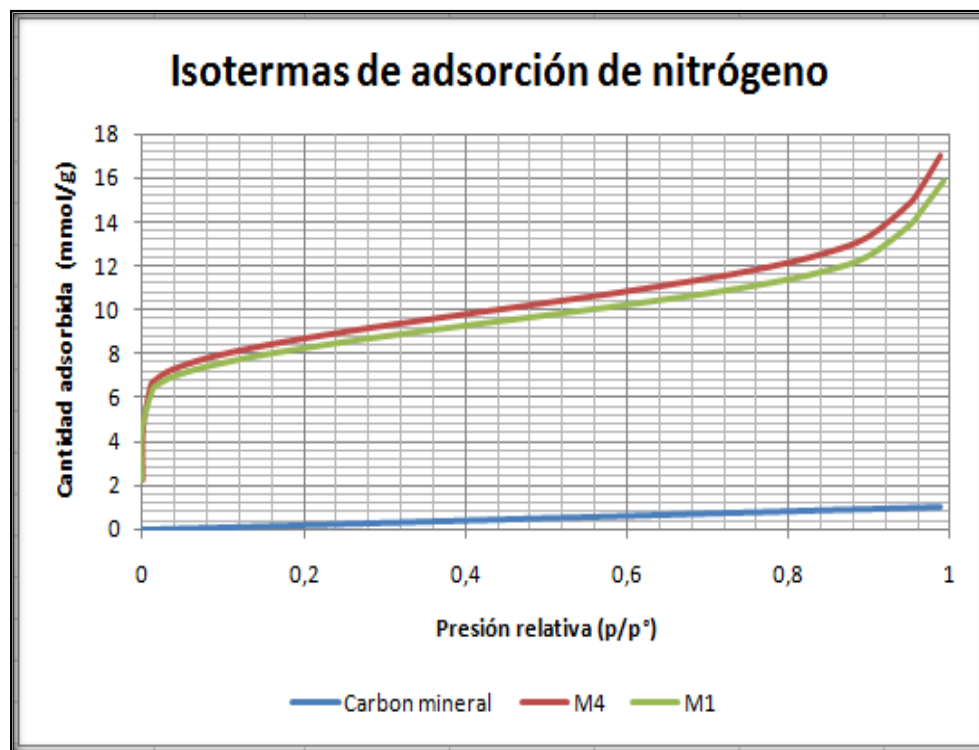
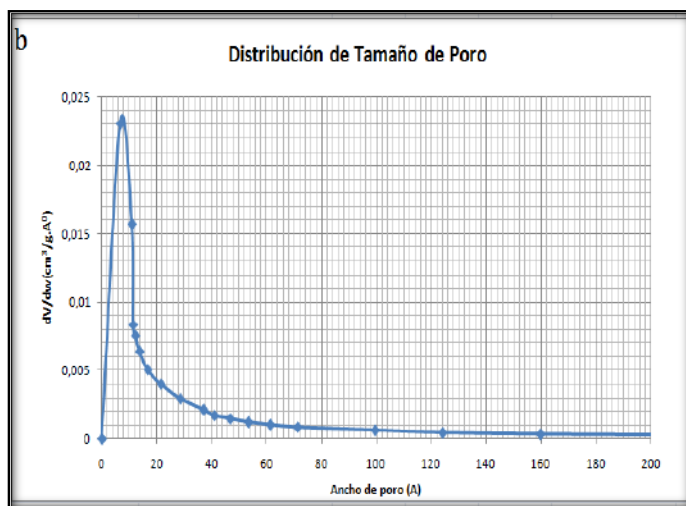


Figura 3. Isotermas de adsorción de nitrógeno del carbón mineral y de los activados a 900 °C (M1) y 950 °C (M4).

La Figura 4 presenta la distribución de tamaño de poro del carbón mineral (a) y de los activados M1 (b) y M4 (c), donde en el eje x se tiene el logaritmo del ancho del poro en angstroms (Å) y en el eje y el volumen incremental de poro. De este gráfico se puede observar como las muestras activadas a 900°C (M1) y 950 °C (M4) presentan una amplia distribución de tamaño de poros, donde teniendo en cuenta la escala logarítmica se puede ver un material principalmente microporoso. En el carbón mineral en cambio, se puede observar un material mesoporoso, sin embargo esta aparente mesoporosidad se debe principalmente a las fisuras que posee el carbón mineral, teniendo en cuenta que las adsorciones de nitrógeno fueron prácticamente nulas. Mediante la Tabla 6, es posible verificar los porcentajes obtenidos al integrar el área bajo la curva según los rangos establecidas por la IUPAC [9], allí se puede observar como el mayor porcentaje de poros para el carbón activado a 900°C (M1) y 950 °C (M4), se tiene en el rango de los microporos, seguido de los mesoporos, a diferencia de lo que ocurrió con el carbón mineral en donde el mayor porcentaje se obtuvo en el rango de los mesoporos en donde no se dan los procesos de adsorción.

Tabla 6. Distribución porcentual del tamaño de poro para el carbón mineral y de los activados 900 (°C) a 950 °C (M4).

Tipo de poro	Microporos (<20 Å) (%)	Mesoporos(20-500 Å) (%)	Macroporos (>500 Å) (%)
Carbón mineral	10,94	88,39	0,67
M1	79,21	20,51	0,28
M4	79,48	20,23	0,29



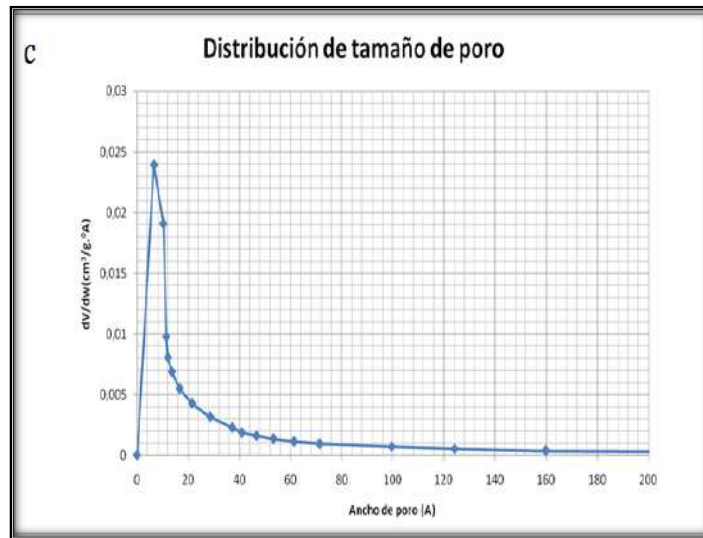


Figura 4. Distribución de tamaño de poro para el carbón mineral (a) y de los activados a 900 °C (M1) y 950 °C (M4) (b).

4.4.3. Análisis Físico

- **Distribución granulométrica**

Mediante difracción láser en medio húmedo, se logró observar que las partículas del mineral de partida se encontraron entre un rango de tamaño de 198,736 y 79,001 μm , y en el caso de los carbones activados a 900 y 950 °C (M1 y M4), el tamaño de las partículas se encontraron en un rango de 167,238 y 65,959 μm y 165,230 y 59,192 μm , respectivamente. Apreciándose, aparentemente, que las partículas de menor tamaño, al incrementarse la temperatura, fueron más susceptibles a presentar mayor quemado externo, pues la disminución en el tamaño fue más representativa en el rango inferior.

- **Humedad, cenizas y densidad relativa**

La Tabla 7 permite observar de manera comparativa las características físicas de los carbones experimentalmente activados frente a los rangos típicos que presentan los carbones activados comerciales. Esta tabla muestra, según los valores de referencia presentados, que tanto el carbón activado a 900 °C (M1), como el de 950°C (M4), podrían ser comercialmente atractivos, al encontrarse ambos dentro de los rangos a pesar de que M4 se encuentre un poco fuera del rango en relación a las cenizas.

Tabla 7. Características físicas del carbón mineral y de los carbones activados a 900 °C y 950 °C. Además, rangos típicos de los carbones activados comerciales.

Características físicas	Carbón Mineral	M1	M4	Rangos típicos carbones activados comerciales [7]
Humedad (%)	7,10	9,52	8,46	2-15
Cenizas (%)	5,63	13,14	15,50	3-15
Densidad Relativa (gr/cm³)	0,7143	0,5992	0,5295	0,26 - 0,65

4.4.4. Análisis de estabilidad térmica

La Figura 5 presenta los resultados de las muestras frente a la temperatura en atmósfera oxidante. En las Figuras 6a y 6b, se presentan los diferenciales de cada uno de ellos.

Observando en conjunto las gráficas se aprecian, dos descensos en relación a las pérdidas de peso (eje y) al incrementarse la temperatura (eje x) en la Figura 5, de acuerdo a las Figuras 6, se logra apreciar que estos descensos corresponden a los picos exotérmicos de los análisis térmicos diferenciales. En ellos se muestra un primer pico, en todas las muestras, a una temperatura inferior a los 148 °C, este pico se debe a la pérdida de humedad. Se observan dos picos continuos a 460 y 520 °C (Figura 6a) en el carbón mineral y un sólo pico a 650 °C en el caso de los activados (M1) y (M4) (Figura 6b), algo esperado pues el segundo pico corresponde a la pérdida de materia volátil en el carbón mineral. Es importante observar en detalle las pendientes que presentan las gráficas de los carbones activados a 900 °C (M1) y 950 °C (M4) en la Figura 5, y la forma de los picos exotérmicos de cada uno de ellos (Figuras 6 a y b). La muestra activada a 900 °C (M1) presenta una menor pendiente y un menor y más ancho pico, a diferencia de la activada a 950 °C (M4), indicando mayor estabilidad térmica, pues su pérdida de peso es más prolongada. Este comportamiento era de esperarse, pues este carbón al poseer un menor grado de activación se encuentra en un mayor orden estructural [11].

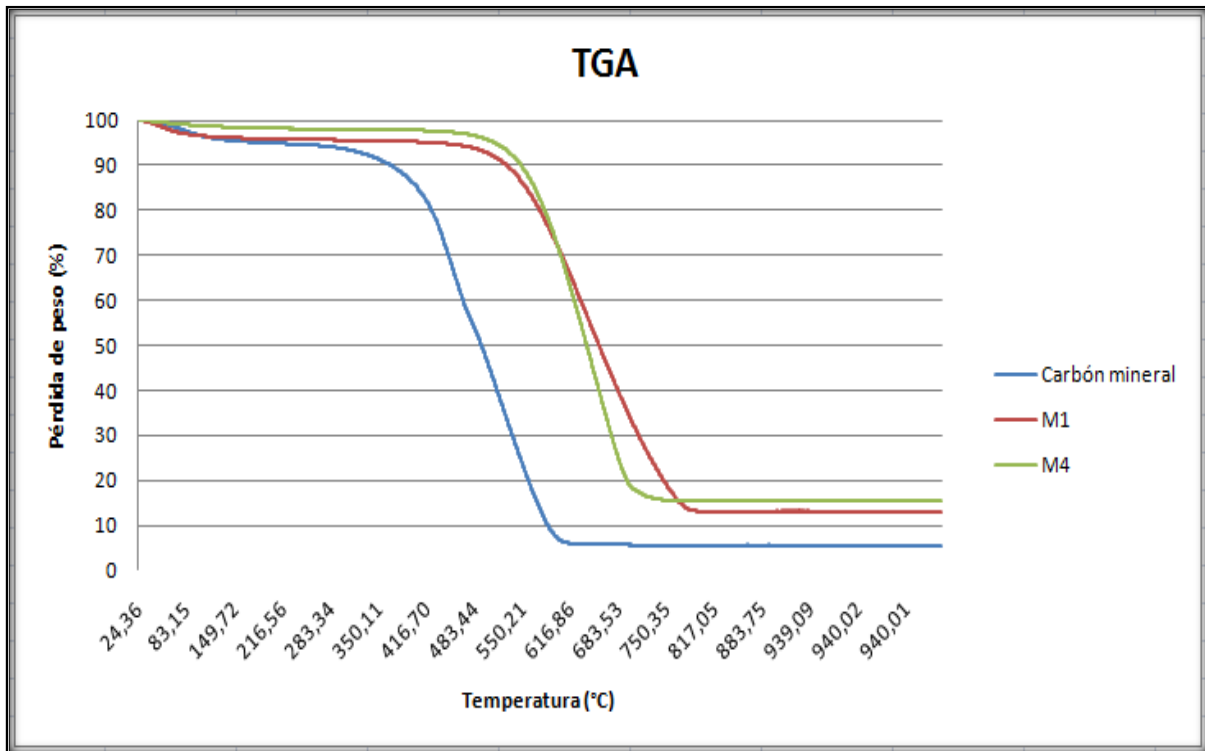


Figura 5. Análisis Termogravimétrico (TGA), para el carbón mineral y los carbones activados a 900 (M1) y 950 °C (M4).

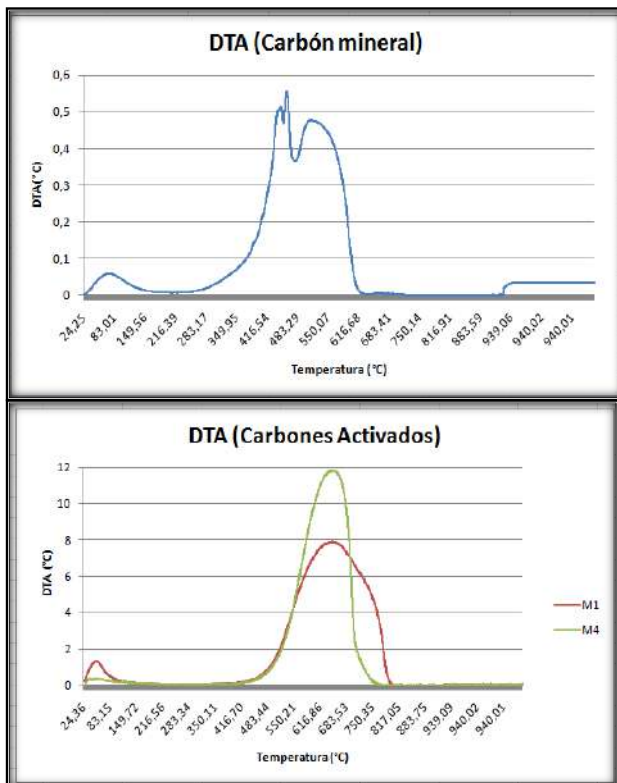


Figura 6. Análisis Térmico Diferencial (DTA), (a) para el carbón mineral; (b) para carbones activados a 900 (M1) y 950 °C (M4)

5. CONCLUSIONES

- Al analizar las características físicas, texturales y térmicas de los diferentes carbones activados experimentalmente, se pudo concluir que frente a las dos variables establecidas en el diseño de experimentos (tiempo de carbonización y temperatura de activación), resultó ser más determinante la temperatura de activación, pues se lograron las mejores características cuando ésta estuvo por encima de la temperatura a la cual se realizó el proceso de carbonización.
- Al comparar los carbones activados mejor obtenido experimentalmente M1 y M4 frente los rangos típicos en los cuales se encuentran los carbones comerciales, de acuerdo a los parámetros texturales; área superficial, ancho de poro, volumen de poro con los cuales se especifica un carbón activado, se observa que estos se encontraron dentro de los rango pues sus resultados fueron $659,45 \text{ m}^2/\text{g}$, 6.54 Å y $0.59 \text{ cm}^3/\text{g}$, y $623.29 \text{ m}^2/\text{g}$, 6.76 Å y $0.55 \text{ cm}^3/\text{g}$ respectivamente.
- Los análisis de estabilidad térmica realizados en atmósfera oxidante permitieron observar que el activado a 900 °C poseía una mayor estabilidad térmica. Lo cual permitía asegurar que el activado a 950 °C presentaba un mayor desorden estructural, afirmándose con ello que este se encontraba en un mayor grado de activación.
- En relación al rendimiento, y teniendo en cuenta que tanto el carbón activado a 900 °C (M1) y 950 °C (M4), se encontraron dentro del rango de los carbones comerciales, resultó ser más atractivo el activado a 900 °C , debido a que este presentó un porcentaje de pérdida en peso del 78.33%, a diferencia del activado a 950 °C con un 91.35%.
- Se logró mostrar la viabilidad de producir carbón activado a partir de carbón mineral procedente del suroeste de Antioquia, logrando con ello plantear una alternativa que genere un valor agregado al carbón simplemente extraído. Reiterando la importancia de un estudio más detallado.

6. AGRADECIMIENTOS

Al grupo GIPIMME, al Fondo de Proyectos de Grado del CODI que financió la investigación con el proyecto PR10-1-02.

7. REFERENCIAS

- [1] Estupiñan H, Vásquez J. Obtención de un material carbonáceo activado de antracita para posibles aplicaciones en hidrometalurgia. En: Revista Facultad de Ingeniería. No. 37. pp. 31-40. 2006.
- [2] Zapata Z, Rojas D y otros. Producción de carbón activado a partir de carbón subbituminoso en reactores de lecho fluidizado por proceso autotérmico. En:

DYNA: Revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Vol. 72, No. 147. pp. 47-56. 2005.

- [3] Gómez L, Zapata A. Estudio de prefactibilidad de una empresa productora de carbón activado en la ciudad de Medellín. Trabajo de grado (Especialista en finanzas). pp. 24-64. Universidad de Antioquia. 2006.
- [4] Norma técnica colombiana NTC 4467. Productos químicos industriales. Carbón activado. Métodos de ensayo.
- [5] Luna D., González A., Gordon M. y Martín N. Obtención del carbón activado a partir de la cáscara de coco. En: Contactos, Vol. 64. pp. 39-48. 2007.
- [6] Sarmiento C, Sánchez J. y otros. Preparación de carbón activado mediante la activación química de carbón mineral. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. pp 1-16, 2006.
- [7] Especificaciones de calidad y reactivación del carbón activado, Biblioteca digital Unison, Cap. II. 2006.
- [8] Mishra S.B, Langwenya S.P. Study on surface morphology and physicochemical properties of raw and activated South African coal and coal fly ash. En: Physics and Chemistry of the earth. Elsevier. Vol. 35. pp. 811- 814. 2010.
- [9] Bandoz T. J. Activated carbon surfaces in environmental remediation. Elsevier. pp. 5-23. 2006.
- [11] Barroso A. Catalizadores de hierro soportado sobre carbón activo para la oxidación catalítica de fenol con peróxido de hidrógeno. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias, Instituto de catálisis y petroleoquímica (CSIS). Madrid, 2010.