

IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES ÓPTIMAS PARA LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DEL PRECURSOR *GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH*

Jhon Jairo Prías Barragán^{1,2}, Carlos Andrés Rojas González¹, Narly Andrea Echeverry Montoya¹, Gerardo Fonthal¹, Hernando Ariza Calderón¹

Resumen

Prías Barragán J. J., C. A. Rojas González, N. A. Echeverry Montoya, G. Fonthal, H. Ariza Calderón: Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia Kunth*. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (135): 157-166, 2011. ISSN 0370-3908.

En este trabajo se presentan las variables óptimas encontradas para la obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia Kunth*. Lográndose identificar parámetros tales como: temperatura de carbonización, tiempo de carbonización, temperatura de impregnación en activante, tiempo de impregnación en activante, relación carbón vegetal-activante, temperatura de activación, tiempo de activación y tamaño de muestra. Estas condiciones óptimas de carbonización, permitieron obtener la mayor capacidad de adsorción en procesos de decoloración con Azul de Metileno.

Palabras clave: adsorción, carbón activado, pirólisis.

Abstract

In this paper, we reported the optimal variables for obtaining activated carbon from the precursor *Guadua angustifolia Kunth* (Bamboo). We identify parameters such as, carbonization temperature, carbonization time, impregnation temperature in activating, impregnation time in activating, relationship activating-Charcoal, activation temperature, activation time and sample size. These optimal conditions of carbonization, allowed to obtain the highest adsorption capacity in the bleaching process with Methylene Blue.

Key words: adsorption, activated carbon, pyrolysis.

¹ Laboratorio de Optoelectrónica, Universidad del Quindío, A.A. 2639, Armenia.

² Programa de Tecnología en Electrónica, Universidad del Quindío, A.A. 2639 Armenia.

Introducción

En la actualidad, el carbón activado es un producto muy cotizado en el mercado mundial, por sus innumerables aplicaciones en los campos de: la medicina, la industria biofarmacéutica y el medio ambiente. Su producción es controlada por países altamente desarrollados como Holanda, Reino Unido, Japón, Alemania y los Estados Unidos, según **Fernández et al.** (2006). El carbón ha sido utilizado como adsorbente desde épocas remotas y se ha desarrollado hasta lo que hoy conocemos como carbón activado de acuerdo a lo mencionado por **Fombuena y Valentín** (2010). El carbón activado es utilizado en áreas que van desde la medicina según **Newberry** (2006) y **Taylor** (2006), el tratamiento de aguas, en la eliminación de olores y sabores, como agente decolorante en la industria del azúcar, en máscaras para la adsorción de gases tóxicos, para eliminar o recuperar compuestos orgánicos como tintes, disolventes o compuestos orgánicos tóxicos de las aguas según **Valdés y Zaror** (2010), en la purificación del aire, en la industria química, en la industria farmacéutica, en la purificación de gases, en la implementación de supercapacitores según **Jayalakshmi y Balasubramanian** (2008), en la decoloración de vinos, zumos y vinagres, en la eliminación de cloro libre en agua potable, en la eliminación de ozono en agua potable, en la eliminación de geosminas, antracinas, simazinas, y en la eliminación de dioxinas, entre otros, tal como lo menciona la empresa Global Water Technologies Group (2010).

La elevada capacidad de adsorción que posee el carbón activado y la posibilidad que tiene de ser reutilizado, le permite un tratamiento eficaz y de bajo costo en múltiples aplicaciones. Las propiedades intrínsecas del carbón activado, son totalmente dependientes de la fuente de materia prima utilizada. Tal como ha sido reportado por **Gonzales** (2002) y **Keith et al.** (2005), el carbón activado del *Bambú*, presenta propiedades superiores al de otros precursores vegetales; por lo tanto es un campo abierto de Investigación, encontrar diversas fuentes de materia prima para obtenerlo. Al respecto, se conoce que la *Guadua* es un muy buen candidato como precursor para producir carbón activado, debido a su bajo costo de producción y alta tasa de reposición tal como lo reporta **Prías** (2009); asimismo, gran parte de esta importante materia prima se pierde en los rodales o queda como desecho en el sector de la construcción. Por lo tanto, dentro del campo de interés en el aprovechamiento de la *Guadua* en su cadena productiva, en este trabajo presentamos la identificación de las variables óptimas que permitieron obtener carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia Kunth*, con la mayor capacidad de adsorción, en procesos de decoloración con azul de metileno.

Carbón activado

El carbón activado es un material que posee una estructura altamente porosa, es preparado artificialmente a través de un proceso de carbonización, para que exhiba un mayor grado de porosidad y superficie interna. El carbón vegetal, después de la activación incrementa su área superficial hasta 300 veces debido a la formación de poros internos de diferentes dimensiones, tal como se puede apreciar en el esquema ilustrativo de la figura 1.

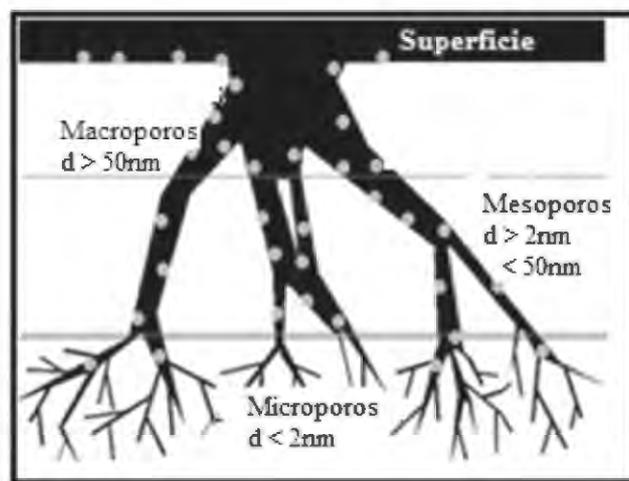


Figura 1. Tipo de poros formados en el carbón activado.

En la actualidad, se ha logrado fabricar carbones activados, con áreas superficiales desde 500 hasta 1500 m²/g. Por su parte, el carbón vegetal, está compuesto de hidrógeno, oxígeno y principalmente carbono según lo menciona **Rodríguez** (2003). El carbón puede ser activado por dos métodos diferentes, la activación física o la activación química, en la activación física o térmica se busca hacer reaccionar a altas temperaturas el carbón vegetal en atmosfera inerte y saturada con vapor de agua, de tal manera que después de un tiempo, algunos átomos de carbono reaccionan, se gasifican en forma de CO₂ y otros se recombinan y condensan en forma de placas grafiticas, creando la estructura carbón-poro.

Por otro lado la activación química se caracteriza por la impregnación del carbón vegetal en diferentes agentes químicos, los cuales pueden ser, ácido fosfórico (H₃PO₄), cloruro de zinc (ZnCl₂), hidróxido de potasio (KOH) y carbonato de potasio (K₂CO₃), los cuales son sometidos a temperaturas alrededor de los 500°C. El material volátil que aún queda en el carbón es eliminado por arrastre, dejando los poros libres, tal como ha sido reportado por **Marsh y Rodríguez** (2006). El carbón Activado resultante, tiene la capacidad de

atraer y retener moléculas de otros compuestos. A este mecanismo de atracción se le denomina adsorción, al sólido se le denomina “adsorbente” y a la molécula atrapada, “adsorbato”. La unión entre el carbón y el adsorbato se lleva a cabo por medio de fuerzas de London, que son una de las clases de fuerzas de Van Der Waals. Éstas fuerzas son relativamente débiles y, por lo tanto, reversibles al utilizar calor y presión de acuerdo con lo expresado por la empresa Global Water Technologies Group (2010).

El carbón activado es también capaz de efectuar quimiadsorciones; es decir, reacciones químicas pueden presentarse en la superficie del carbón, produciendo cambios de estado en el adsorbato. La quimiadsorción es una reacción irreversible, y se evidencia claramente con el proceso de deoloración. Es utilizado también, en el enmascaramiento de raíces para evitar el contacto con los herbicidas según el CIAT (1981) y en soporte de catalizadores, debido a su termoestabilidad, propiedades ácidas y básicas, la fácil interacción con los metales, el control de la estructura porosa y las propiedades químicas de la superficie logrando así, ser aprovechadas en aplicaciones catalíticas según **Perera y Rangel (2008)**.

Por lo tanto, debido a las múltiples aplicaciones del carbón activado, el consumo mundial de carbones activados para el año 2007 fue cercano a 0,9 millones de toneladas. Con un crecimiento estimado de 5,2% por año, se prevé para el 2012 un consumo de 1,2 millones de toneladas. La producción se concentra en China, Japón, Europa y Estados Unidos. Colombia ha presentado un consumo anual promedio entre los años 1996 y 2002 de 700 ton/año, según **Gómez et al. (2010)**. El carbón activado puede ser producido a partir de una gran variedad de materias primas carbonizables, siendo entre ellas las principales: Carbón mineral, cáscara de coco, madera, lignita, etc. De acuerdo con la Red Chilena del *Bambú* (2008) y **Deiana (1998)**, las propiedades intrínsecas del carbón activado que se obtiene, son totalmente dependientes de la fuente de materia prima utilizada para obtenerlo.

Obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia Kunth*

Para lograr la carbonización de un material precursor, se requiere de la descomposición físico-química bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante. Los productos resultantes de la carbonización son gases, líquidos y carbón, cuyas cantidades relativas dependen de las propiedades del precursor a tratar y de los parámetros de operación del equipo de calentamiento, según lo expresa **Lesme (2010)**. En la figura 2 se muestra el esquema básico del proceso de la carbonización. Este proceso es un

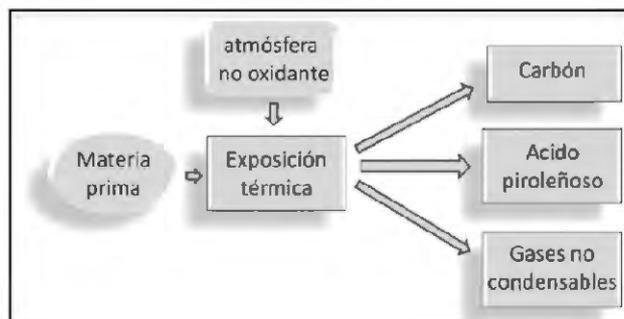


Figura 2. Proceso de carbonización a partir de biomasa.

tipo de pirólisis, la cual, se presenta a temperaturas en el rango desde 400°C hasta 600°C y tiempos que varían desde horas hasta días de acuerdo con **Márquez (2010)**.

Por lo tanto, un sistema para la obtención de carbón requiere de una fuente de calor constante, en un reactor, el cual puede ser continuo o discontinuo (batch), debe producirse una atmósfera libre de oxígeno, para evitar que la biomasa se consuma por efectos de la oxidación. Es posible hacer vacío en el reactor o utilizar un gas de arrastre inerte, tal como el nitrógeno (N₂). Preferiblemente, se debe hacer recolección del subproducto de la carbonización, mediante la condensación de los vapores resultantes, debido a que los alquitranes y los ácidos piroleñosos pueden tener efectos negativos en la salud y el ambiente.

Se observa también, que el rendimiento teórico del carbón vegetal varía con la temperatura de carbonización, debido al cambio de contenido de material volátil alquitranado o ácidos piroleñosos, tal como se muestra en la Tabla 1, información reportada por la FAO (1983)

Donde se observa para valores de bajas temperaturas y corto tiempo de carbonización un mayor rendimiento, pero un menor porcentaje de carbono fijo, indicando con esto que aun se encuentra ácidos piroleñosos en la biomasa que en nuestro caso hace referencia a la *Guadua*, mientras para altas temperaturas y mayor tiempo de carbonización, se presenta un menor rendimiento, pero un mayor porcentaje de carbono fijo.

Tabla 1. Efecto de la temperatura de carbonización sobre el rendimiento y composición del carbón vegetal.

| Temperatura de carbonización | Análisis químico del carbón | |
|------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| | % carbono fijo | % material volátil |
| 300 | 68 | 31 |
| 500 | 86 | 13 |
| 700 | 92 | 7 |

Materiales, métodos y experimentación

En este trabajo, las muestras de *Guadua* sometidas a carbonización, siguieron el proceso que se muestra en la figura 3. En el cual, inicialmente se cortaron tabletillas de la parte media del culmo de la *Guadua*, luego se llevaron a un reactor cilíndrico de pirólisis, el cual, se encuentra en el interior de una mufla cuya temperatura fue controlada, después, se realizó vacío en el sistema y se hizo fluir N_2 , para garantizar la mínima cantidad de O_2 , posteriormente y antes de iniciar la carbonización, se suspendió el flujo de N_2 , se encendió el controlador de la mufla y se configuró la temperatura deseada. Asimismo, en este montaje de carbonización, se ubicó un sistema para la condensación del material volátil presente en la *Guadua*, como son, los ácidos piroleñosos. En este sistema se logró la condensación de gases, a partir de la recirculación de agua fría, a través de tres condensadores serpentín de vidrio. Por otro lado, el subproducto de la carbonización fue almacenado, ya que, este puede ser utilizado en otras aplicaciones, como antiséptico veterinario, como preservador de maderas, como compuesto para calafateo, y como sustituto de alquitrán para caminos, entre otros de acuerdo con lo reportado por la FAO (1983).

Entonces, una vez obtenido el carbón de *Guadua*, se llevó a molienda, hasta obtener un tamaño de grano menor a $180\mu m$, el tamaño de grano se determinó a través del paso por un tamiz, de la marca Ro-Tap Model E y para la malla #80, equivalente a $180\mu m$. Posteriormente, se hizo la impregnación en ácido fosfórico (H_3PO_4) al 85%, en una relación de 2:1 activante:carbón, sometiendo la muestra de carbón impregnado a una temperatura de $110^\circ C$ durante 15h, después, se realizó la activación a una temperatura de $450^\circ C$

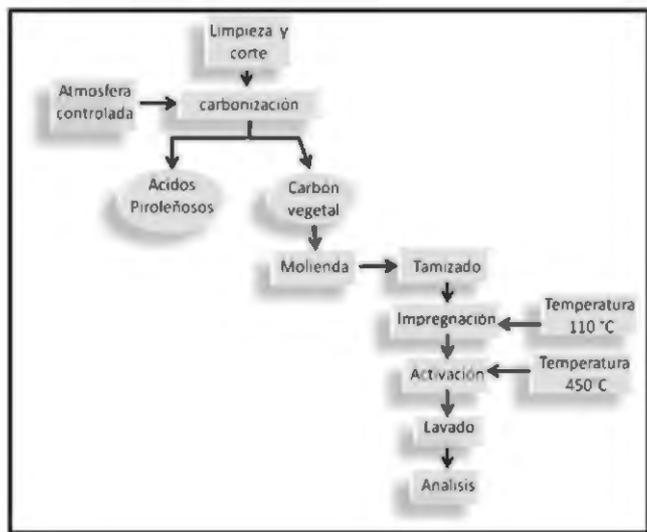


Figura 3. Procedimiento para la obtención de carbón activado.

durante 1h. Una vez terminado este procedimiento, se procedió al lavado del carbón activado con agua y la adición de hidróxido de sodio (NaOH), hasta llegar a pH neutro constante, en esta etapa del proceso se formaron sales altamente solubles en agua, las cuales fueron retiradas del carbón por medio de filtración a vacío, mediante un embudo gooch. Luego, el carbón activado fue secado y almacenado. Este proceso también se llevó a cabo con el ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 15% y el cloruro de Zinc ($ZnCl_2$) al 3M.

El sistema de pirólisis construido en el desarrollo de este trabajo se presenta en la figura 4. Donde inicialmente, las muestras de *Guadua* fueron ubicadas en el interior del reactor, el cual presenta entrada de gas N_2 y salida de ácidos piroleñosos, luego estos gases de salida, fueron llevados hasta un sistema de condensación. La temperatura del reactor fue elevada empleando una mufla con conexión a 220V y una potencia eléctrica alrededor de 5000W, lo cual permitió variar la temperatura en el rango comprendido desde temperatura ambiente hasta $700^\circ C$.

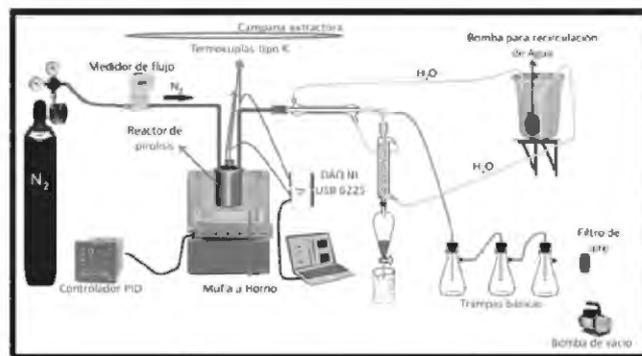


Figura 4. Sistema de pirólisis para la obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia Kunth*.

El control de la temperatura en la mufla se logró empleando el controlador PID ATR-241 de la marca PIXSYS, el cual tiene la opción de autoajuste de los parámetros P, I, D, (Proporciona, Integral y Derivativo). El actuador utilizado fue un relé de estado sólido (SSR) de la marca CRYDOM, el cual soporta hasta 600V y 50A. En la medición de la temperatura en la mufla, se utilizó una termocupla tipo k, con un bulbo en acero inoxidable, al igual que para sensar la temperatura dentro del reactor y en la salida de gases (ácidos piroleñosos), la variable temperatura fue llevada al computador mediante una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) NI USB-6225 de la empresa National Instruments. Asimismo, la señal del medidor de flujo para gases fue llevada al computador mediante la DAQ, esta señal tiene un comportamiento lineal de la forma:

$$F_{N_2} = 100xV \quad (1)$$

Donde F_{N_2} es el flujo de nitrógeno en unidades de centímetro cúbico por minuto (CCPM) y V se refiere a la señal de voltaje en la salida del medidor de flujo para gases.

La herramienta de visualización presentada al usuario se puede observar en la figura 5, mediante la cual, se logró monitorizar la temperatura en el reactor, la temperatura en la salida de gases y el flujo de N_2 . Esta automatización nos permitió de manera sistemática, realizar, la identificación de variables óptimas para obtener carbón activado a partir de la *Guadua* tal como se ha presentado en estudios previos por Echeverry *et al.* (2010).

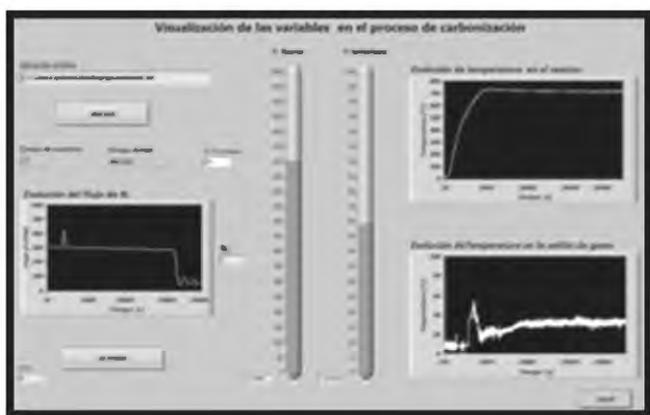


Figura 5. Herramienta de visualización de las variables en el proceso de carbonización.

En la caracterización estructural de muestras de *Guadua* y carbón vegetal se emplearon las técnicas de difracción de rayos X y transformada rápida de Fourier utilizando los equipos D8 Advance e IR Prestige Shimadzu, respectivamente. Con el mismo equipo de DRX en configuración de transmisión, se realizaron las mediciones de microporosidad y área específica mediante la técnica de SAXS (Small-Angle X Ray Scattering). Por otro lado, La determinación del porcentaje de adsorción se realizó empleando soluciones de azul de metileno en las concentraciones de 30 ppm, a las cuales se les realizaron análisis de adsorción empleando un espectrofotómetro UV-Vis. 8453 con arreglo de diodos marca HP.

Resultados y discusión

En el proceso de identificación de las variables óptimas, se realizó la caracterización de las muestras, para diferentes fases del proceso. Inicialmente, se realizaron estudios de difractogramas de rayos X, en muestras del culmo de la *Guadua angustifolia Kunth*, para los tres diferentes biotipos; Macana, Cebolla y Castilla, en los cuales

se encontró una alta similitud en los resultados, tal como se puede observar en la figura 6.

En los espectros de DRX se observan bandas alrededor de 16° y 22° , las cuales corresponden a las banda exhibidas por la celulosa, tal como se presenta en la figura 7. Lo cual indica una alta presencia de celulosa en la *Guadua*, tal como era de esperarse.

Asimismo, se realizaron análisis de espectros de FTIR para los tres biotipos en estudio, encontrándose similitud entre los resultados obtenidos, tal como se muestra en la figura 8. En el espectro FTIR de esta figura, se pueden observar bandas características de celulosa como por ejemplo estiramiento $-OH$ a 3410 cm^{-1} , $C-H$ alifático, estiramiento $C-H$ asimétrico en grupos metilos y metilénicos a 2924 cm^{-1} , estiramiento $C=O$ de grupos carbonílicos en ácidos aromáticos a 1735 cm^{-1} , por encima de 1600 cm^{-1} y alrededor de 1556 cm^{-1} , estiramiento en anillos aromáticos de $C=C$, estiramiento $C-O$ en ácidos, alcoholes y fenoles, y deformación fuera del plano del enlace $C-H$ a $876, 750$ y 666 cm^{-1} .

Posteriormente, en la figura 9 se presentan los resultados obtenidos en el análisis de los difractogramas DRX para las muestras de carbón vegetal, variando las condiciones de temperatura y tiempo de carbonización.

Se puede observar en el difractograma que a partir de los 400°C , la respuesta amorfa, empieza a formar una banda de mayor intensidad alrededor de los 10° , lo cual se puede atribuir a la formación de placas grafiticas, creando la estructura carbón-poro, lo cual constituyó una evidencia experimental de la presencia de interfaces carbón-poro. Por lo tanto, para comprender mejor lo que ocurre en el proceso de carbonización, se realizaron análisis de FTIR para las muestras de carbón vegetal en las diferentes condiciones de temperatura y tiempo, tal como se muestra en la figura 10. En esta figura se puede observar como en el proceso de carbonización, a medida que se incrementa la temperatura hay una mayor presencia de carbono fijo, lo cual se puede deducir de la desaparición de las bandas presentes en el espectro realizado para la *Guadua*, presentado en la figura 8, indicando el rompimiento de enlaces durante la pirólisis de las moléculas de lignina y celulosa, y la conversión del material vegetal en carbono fijo.

También se muestra en la figura 10 los espectros de FTIR de la lignina y la celulosa encontrados en la base de datos del equipo, donde efectivamente se puede observar la correspondencia con las bandas del espectro de FTIR de las muestras de *Guadua*. También, para conocer el comportamiento en el tiempo, del proceso de carbonización, se realizaron los espectros de FTIR mostrados en la figura 11.

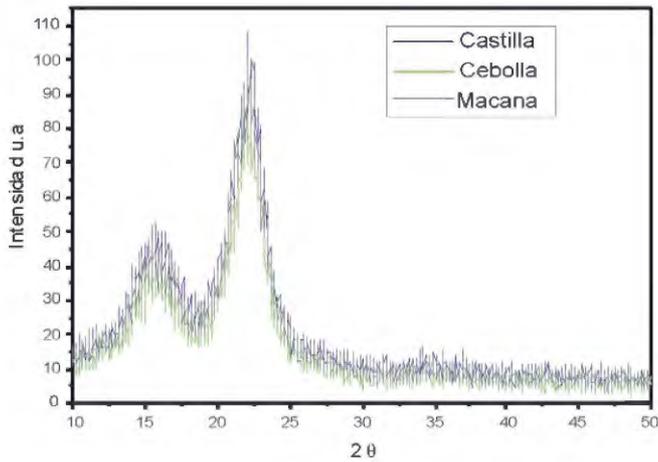


Figura 6. Difracción de rayos x en los biotipos de *Guadua*.

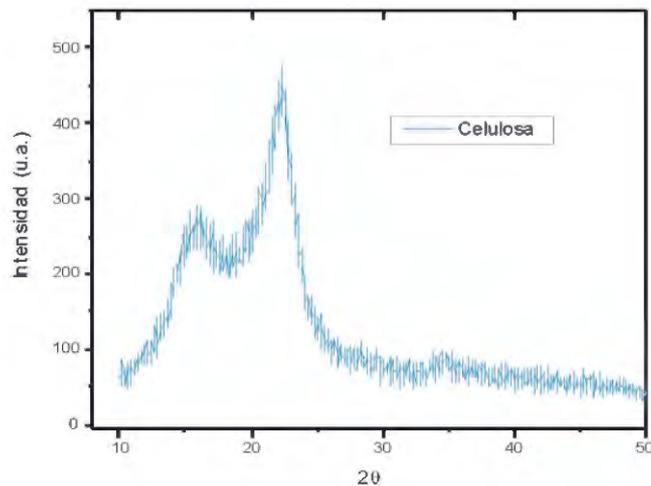


Figura 7. Difracción de rayos x para la celulosa.

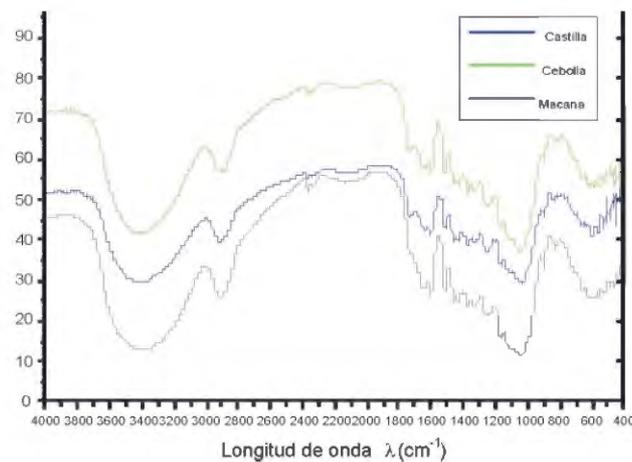


Figura 8. Espectros de FTIR en biotipos de *Guadua*.

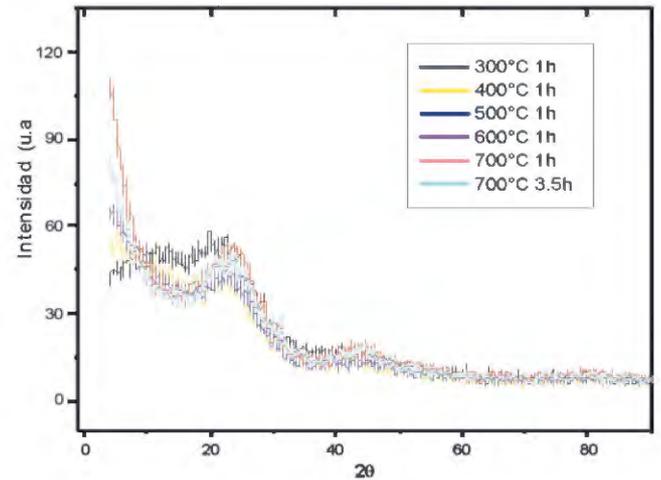


Figura 9. Difractogramas de rayos x para el carbón vegetal obtenido para diferentes temperaturas y tiempo de carbonización.

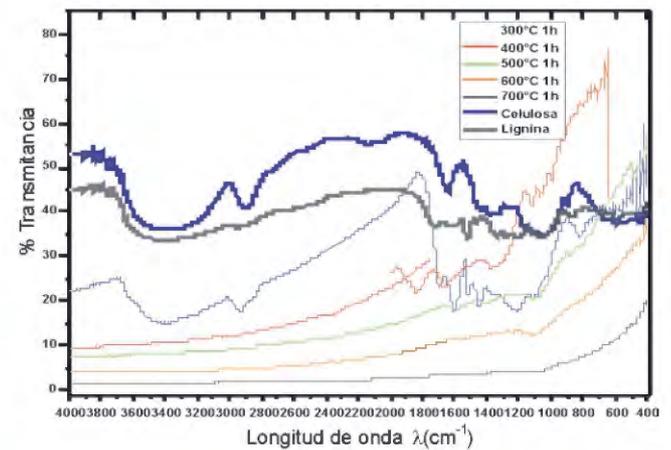


Figura 10. Espectros de FTIR en el carbón vegetal variando la temperatura de carbonización.

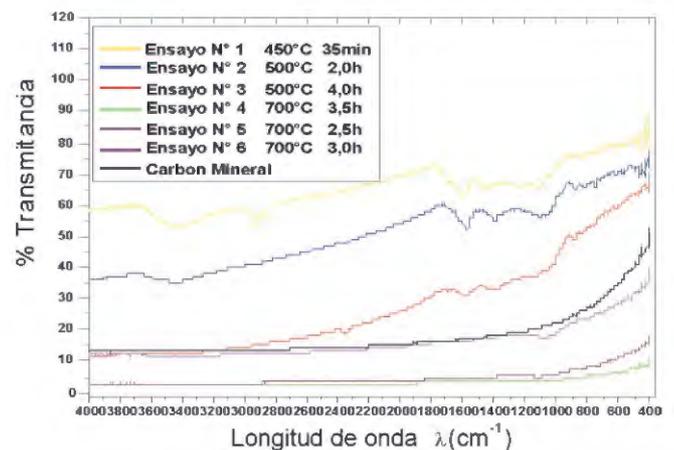


Figura 11. Espectros de FTIR en carbón vegetal para diferentes tiempos de carbonización.

En donde se puede observar que la mayor cantidad de carbono fijo se produce a una temperatura de 700°C y 3,5h, siendo esta curva la más cercana al resultado obtenido para el espectro FTIR del carbón mineral mostrado también en la figura en mención.

El control sobre las variaciones de temperatura mostradas en las gráficas anteriores, se logró mediante la implementación de un controlador PID, el cual recibió la señal de las termocuplas ubicadas en el reactor de pirólisis y en la salida de gases. Una de las respuestas obtenidas en la evolución de la temperatura interna del reactor de pirólisis se presenta en la figura 12. Donde se puede observar que el ajuste de las constantes del controlador PID, permitió minimizar el sobreimpulso, alcanzando el estado estacionario después de los primeros 2500s, con una temperatura de estado estacionario de $700 \pm 30^\circ\text{C}$.

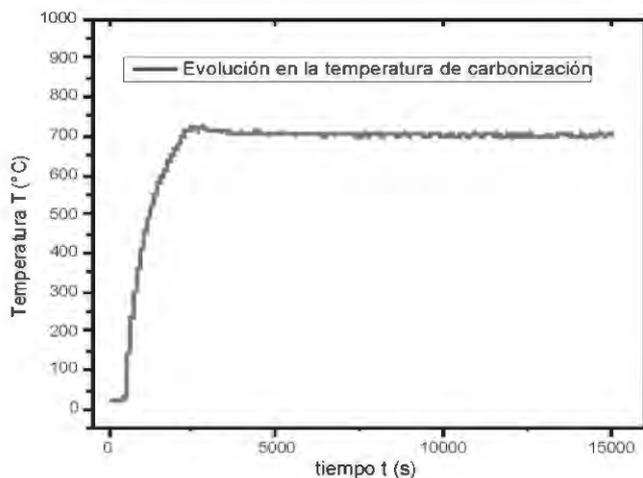


Figura 12. Evolución de la temperatura en el reactor.

De igual manera, en la figura 13 se muestra el comportamiento de la temperatura en la termocupla ubicada en la salida de gases del reactor de pirólisis.

El comportamiento que se presenta en esta gráfica se corresponde con el desprendimiento de materia volátil que ocurre en la carbonización, donde se puede observar un pico alrededor de los primeros 500s, el cual se logró asociar al desprendimiento de materia en las muestras de *Guadua*, tal como vapor de agua y ácidos piroleñosos en forma gaseosa, luego se presenta un posterior enfriamiento, el cual se logró atribuir a la disminución de gases en la salida del reactor; nuevamente, ocurre un leve aumento en la temperatura, debido al desprendimiento de sustancias tales como alquitranes y otros compuestos, los cuales, requieren de mayor temperatura, para ser volatilizados.

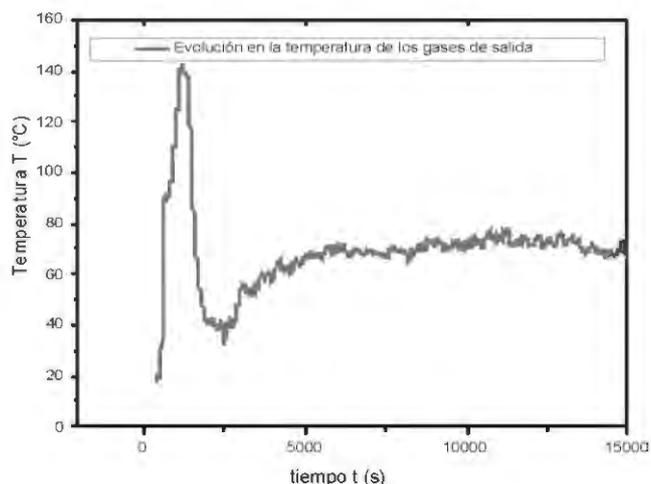


Figura 13. Evolución de la temperatura en la salida de gases del reactor de pirólisis.

Finalmente, se logra el equilibrio térmico alrededor de una temperatura de 70°C, después de los 10.000s.

Una vez realizado el proceso de carbonización y los análisis de las muestras obtenidas para las diferentes condiciones de temperatura y tiempo, se procedió a hacer la activación del carbón vegetal, con los tres diferentes agentes activantes mencionados anteriormente.

Para el proceso de activación fue necesario realizar previamente la impregnación en el agente activante en presencia de calor y durante un tiempo específico, motivo por el cual fue necesario hacer un procedimiento experimental que nos permitiera conocer el tiempo de impregnación adecuado, para lo cual se realizaron análisis de adsorción en el espectrofotómetro UV-Visible, para los diferentes tiempos, encontrándose los porcentajes de adsorción que se presentan en la figura 14. se puede observar que 15h es el tiempo óptimo para la impregnación a 110°C.

Los análisis en el espectrofotómetro UV-Vis se realizaron empleando la curva de calibración presentada en la figura 15 y los datos que se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Espectrofotómetro UV-Vis.

| Curva de Calibración | |
|----------------------|-------------|
| Concentración en ppm | Absorbancia |
| 1 | 0,22688 |
| 2 | 0,42054 |
| 3 | 0,63231 |
| 4 | 0,83748 |
| 5 | 1,03420 |

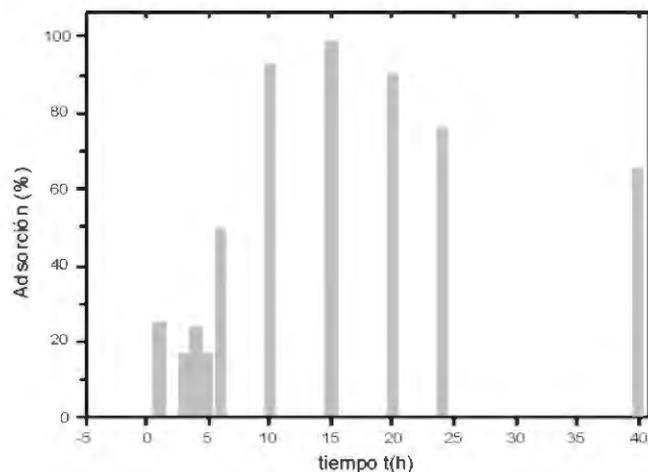


Figura 14. Adsorción para diferentes tiempos de impregnación del carbón vegetal y una temperatura constante de 110°C.

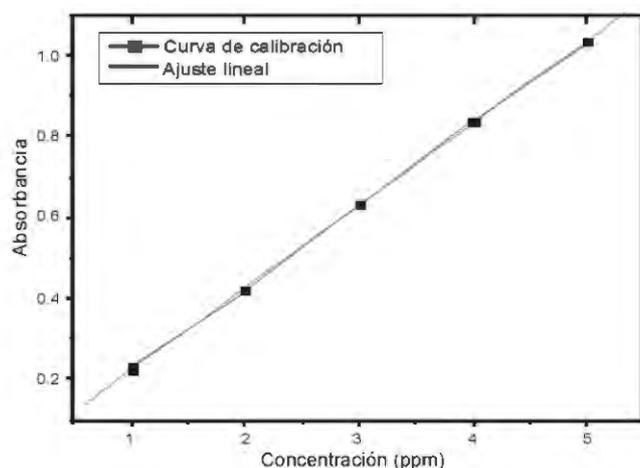


Figura 15. Curva de calibración espectro-fotómetro UV-Vis.

La curva de calibración se realizó para la longitud de onda (λ) máxima del azul de metileno a 665 nm, sustancia, utilizada en los procesos de cuantificación mediante la adsorción del color por medio del carbón activado tal como ha sido reportado por **Jurado** (2003). En la curva de calibración presentada se obtuvo $R^2=0,99975$, según el UV-Vis, lo cual es un valor apropiado para este tipo de cuantificaciones.

Posteriormente, se realizaron análisis de las muestras de carbón activado a una temperatura de 450°C durante 1h, obteniéndose el espectro de FTIR para el carbón activado con cada uno de los agentes activantes mencionados anteriormente, tal como se presenta en la figura 16.

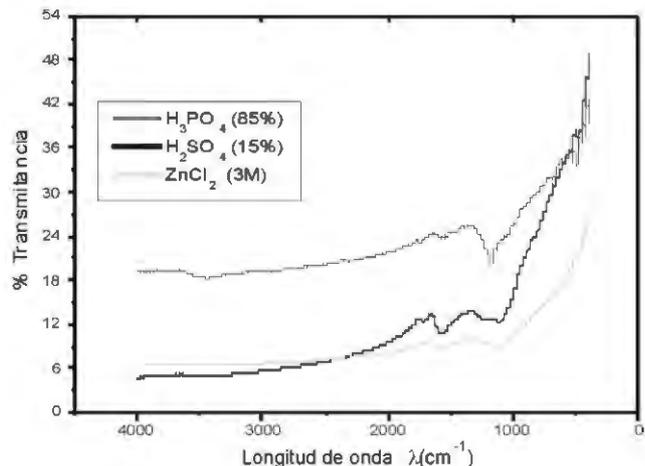


Figura 16. Espectros de FTIR en muestras de carbón activado para diferentes agentes activantes.

En esta gráfica se puede observar la aparición de bandas atribuidas a residuos de las sales resultantes de la neutralización del activante en la etapa de lavado del carbón activo. Posteriormente se realizaron análisis en el espectrofotómetro UV-Vis, con el fin de establecer las condiciones de carbonización adecuadas para obtener el carbón activado con el mejor desempeño en procesos de decoloración con azul de metileno, obteniéndose los resultados presentados en la figura 17.

Es posible determinar mediante este gráfico de barras, que la temperatura óptima para obtener el carbón activado con el mejor desempeño en procesos de decoloración con azul de metileno es 300°C.

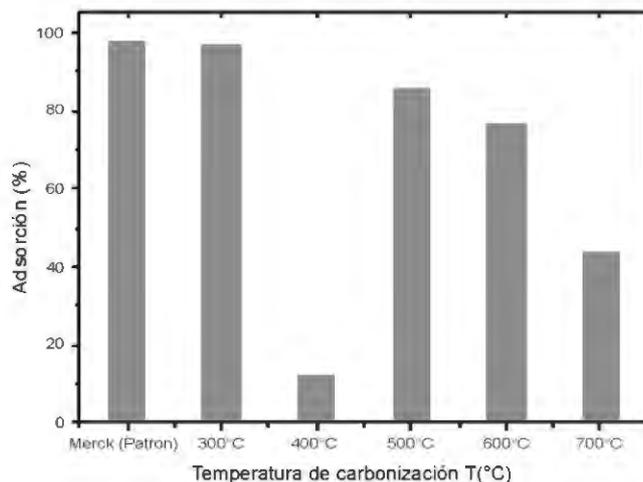


Figura 17. Porcentaje de adsorción para el carbón obtenido a diferentes temperaturas.

La determinación del tamaño promedio de poros y el área específica, se realizó empleando mediciones de SAXS, las cuales se pueden observar en la figura 18.

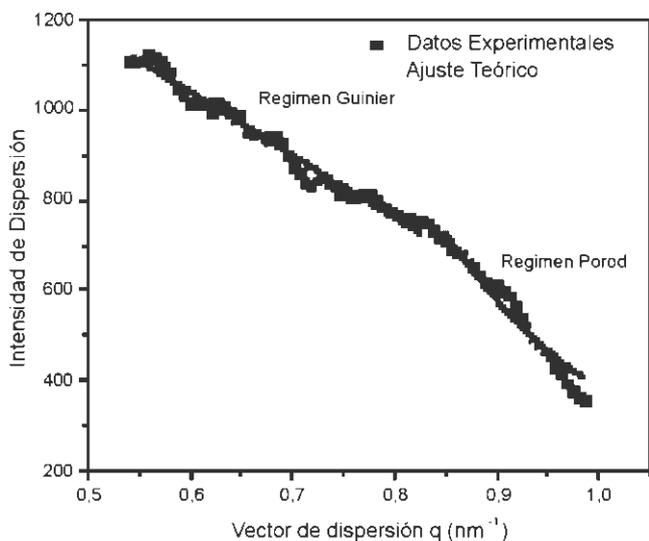


Figura 18. Mediciones de SAXS en el Carbón Activado obtenido a partir del culmo de la *Guadua angustifolia* Kunth, a una temperatura de carbonización de 300°C.

El análisis de las mediciones de SAXS se realizó empleando las leyes de Guinier y Porod, según **Crosgrove** (2005), a partir de la dispersión de rayos X en la muestra de carbón activado, encontrándose un área superficial de 850 m²/g y un tamaño promedio de poro de 6,33 nm, lo cual corresponde a mesoporos, de acuerdo a la clasificación de la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry). Este tipo de carbones activados sirve para el tratamiento de aguas residuales de origen diverso y procesos de decoloración, entre otros.

Conclusiones

Hemos presentado en este trabajo las variables óptimas encontradas para la activación del carbón vegetal a partir del precursor *Guadua angustifolia* Kunth, en procesos de decoloración con azul de metileno, para lo cual se determinó la temperatura de carbonización de 300°C durante 1h, el tamaño de partícula debe ser menor a 180µm para la activación, la impregnación en el agente activante se debe realizar a una temperatura de 110°C durante 15h, encontrándose un mejor desempeño con el ácido fosfórico (H₃PO₄), en una relación de 2:1 activante: carbón y una temperatura de activación de 450°C durante 1h, mientras que el proceso de obtención de carbón activado a partir de los otros activantes mencionados, requieren de

un seguimiento específico, debido a que no presentaron un desempeño óptimo con las condiciones encontradas. Asimismo proponemos que para muestras de carbón con altos niveles de material volátil se produce carbón activado con una alta capacidad de adsorción en procesos de decoloración con azul de metileno y la metodología empleada en este trabajo para demostrarlo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo financiero de Colciencias bajo el código 1113-452-21292 y la Universidad del Quindío mediante el proyecto 427.

Bibliografía

- CIAT, Centro Internacional de Agricultura Tropical.** 1981. Principios básicos sobre la selectividad de los herbicidas; guía de estudio para ser usada como complemento de la unidad audiotutorial sobre el mismo tema 2.40.
- Crosgrove, T.** 2005. Colloid science: principle, methods and applications. Blackwell Publishing.
- Deiana, A.C., Petkovic, L.M. y Noriega, S.E.** 1998. Carbón activado a partir de materias primas regionales. Centro de Información Tecnológica 9(5):89-93.
- Echeverry, N. A., González Rojas, A., Prías-Barragán, J. J., Gómez, J. F., Muñoz, G. Á., Fonthal, G., Ariza-Calderón, H.** 2010. Obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia* Kunth. IX ENFMC. Poster.
- , **Prías-Barragán, J. J., González, Rojas A., Ariza-Calderón, H.** 2010. Automatización de un sistema de pirólisis para la obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia* Kunth. en Proc. XIII Seminario taller nacional de instrumentación y control, Armenia, 1-5.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.** 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal. 41.
- Fernández Rodríguez, A., Castillo, C. R., Aja Muñiz, E. R., García Fernández, I., Huerte-Mendía, M., Marín.** 2006. Aspectos industriales de la producción de carbón activado y sus aplicaciones en la mitigación ambiental. *IBEROMET* IX. 417-423.
- Fombuena, M. y Valentín, A.** 2010. Manual del carbón activo. Aguapedia. U. Sevilla 1-89.
- Global Water Technologies Group.** 2010. Carbón activado granular. (<http://www.ciberteca.net/equipos-para-purificadoras-y-embotelladoras-de-agua-purificada-y-mineral/medios-filtrantes-de-filtos/carbon-activado.htm>).
- Gómez, A., Klose, W., Rincón, S.** 2010. Carbón activado de cuesco de palma. Estudio de termogravimetría y estructura. Alemania.
- Gonzales Mora, H. E.** 2002. Estudio de carbonización y sus productos de 2 especies de "Paca" (*Guadua Angustifolia* y *Guadua Sarcocarpa*) provenientes de la zona de Iberia-Tahuamanu, madre de Dios. Universidad Nacional Agraria, La Molina 1-16.

- Jayalakshmi, M., Balasubramanian, K.** 2008. Simple capacitors to supercapacitors - an overview. *Int. J. Electrochem. Sci* **3**: 1196-1217.
- Jurado, P.L., Mutuberría, J. F. Oliver, N., Charadia, R., Brül, S.P., García, M. C.** 2003. Diseño de un proceso de aprovechamiento integral de residuos agroindustriales. *Jornadas SAM/CONAMET/simposio materia 1-4*.
- Keith, K.H., C, Barford J. P. y McKay G.** 2005. Production of activated carbon from bamboo scaffolding waste-process design, evaluation and sensitivity analysis. *Chemical Engineering Journal* **109**(1-3):147-165.
- Lesme Jaén, R.** 2010. Pirólisis de biomasa. Experiencias y aplicaciones. (<http://www.cengicana.org/Portal/SubOtrasAreas/Cogeneracion/Presentaciones/PirolisisBiomasa.pdf>).
- Márquez Montesino, F.** 2010. Transformación térmica de la madera. (<http://www.monografias.com/trabajos15/transformacion-madera/transformacion-madera.shtml>).
- Marsh, H. y Rodríguez-Reinoso, F.** 2006. *Activated Carbon*. 1st ed. ELSEVIER. Agawam, MA.
- Newberry, L. E.** 2006. *Sheehy manual de urgencia de enfermería*. Elsevier, España.
- Perera Barbosa, D., Rangel, M. C.** 2008. *Nanoporous materials*. World Scientific. Singapore.
- Prías-Barragán, J. J.** 2009. Implementación del método de Fitch para la medición de la conductividad térmica en muestras de *Guadua angustifolia Kunth*. *Memorias Congreso Internacional de la Guadua, otros Bambües y fibras naturales* 1,81-83.
- Red Chilena del Bambú.** 2008. *Carbón de Bambú y productos derivados, desarrollo tecnológico y comercial*. (http://www.Bambú.cl/proyectos_carbon.htm)
- Rodríguez, F. J., Vidal.** 2003. *Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización*. Ediciones Díaz de Santos. España.
- Taylor, R. B.** 2006. *Medicina de familia: principios y práctica*. Elsevier. España.
- Valdés, H., Zaror, C. A.** 2010. Influencia de la composición química superficial del carbón activado en la adsorción de benzotiazoles. *Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería* **18**(1):38-43.

Recibido: febrero 1 de 2011.

Aceptado para su publicación: mayo 11 de 2011.