

Obtención de Carbón Activado a partir de Residuos Lignocelulósicos de Canelo, Laurel y Eucalipto

Asimbaya C.*; Rosas N.*; Endara D.**; Guerrero V.H.***

*Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Materiales, Laboratorio de Materiales Cerámicos, Quito, Ecuador
e-mail: ctr_as26@hotmail.com; nelly.rosas@epn.edu.ec

**Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química, Quito, Ecuador
e-mail: diana.endara@epn.edu.ec

***Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Materiales, Laboratorio de Nuevos Materiales, Quito, Ecuador
e-mail: victor.guerrero@epn.edu.ec

Resumen: Se obtuvo carbón activado a partir de 3 tipos de aserrín de madera: laurel, canelo y eucalipto, mediante activación química. El proceso de activación consistió en impregnar al aserrín con ácido fosfórico al 40 % w/w en proporción 1:1, posteriormente el material se carbonizó a 500 °C durante 2 h y finalmente fue lavado para eliminar los residuos de ácido y alcanzar un pH neutro. Se obtuvo el mayor rendimiento con el laurel (29.3 %) para un tamaño de partícula mayor a 2 mm. Mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) se observaron las estructuras porosas que se formaron a partir del proceso de activación. La capacidad de adsorción se evaluó mediante el índice de yodo, donde se obtuvo que el canelo presenta el mayor valor correspondiente a 740 mg I₂/g para la muestra de tamaño de partícula entre 74 y 150 µm. Con base en los resultados obtenidos se puede evidenciar que para una misma variedad de madera, a menor tamaño de partícula, aumenta la capacidad de adsorción.

Palabras clave: Carbón activado, índice de yodo, activación química, residuos lignocelulósicos

Abstract: Laurel, canelo and eucalyptus were used to produce activated carbon by chemical activation. The activation process consisted in impregnate sawdust with phosphoric acid 40 % w/w in a ratio 1:1, then the material was carbonized at 500 °C for 2 h and finally it was washed to remove residual acid to reach a neutral pH. The laurel wood with particle size greater than 2 mm reached the highest yield 29.3 %. Scanning electron microscopy (SEM) was used to observe the porous structures formed by the activation process. The iodine adsorption capacity was evaluated and it was found that the canelo has the highest adsorption of iodine number corresponding to 740 mg I₂/g for the sample with particle size between 74 to 150 microns. Based on the results obtained, it can be demonstrated that, for the same types of wood, a smaller particle size increases the sorption capacity.

Keywords: Activated carbon, iodine number, chemical activation, lignocellulosic waste

1. INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación mundial sobre la contaminación ambiental ha llevado a los científicos de las últimas décadas a buscar alternativas para el tratamiento de efluentes contaminados con metales pesados [17]. Actualmente el método más empleado es la precipitación. Sin embargo, este método genera un problema en el manejo de desechos sólidos [2].

Por esto, se ha buscado nuevas alternativas entre las que se destaca la adsorción, que es un fenómeno en el cual las partículas se quedan atrapadas en la superficie del material adsorbente [12]. La adsorción es reconocida por su fácil aplicación, bajo costo y alta eficiencia de remoción [17]. El principal material empleado en este procedimiento y el más estudiado durante años es el carbón activado [1].

El carbón activado es un material de elevada área superficial, estructura microporosa, sencilla regeneración y una química de superficie que permite la formación de una capa de partículas debido a la presencia de grupos carboxílicos, fenólicos, cetonas, quinonas, hidroquinonas y aldehídos que le dan la característica de material adsorbente [4]. Las propiedades del carbón activado dependen del material a partir del cual se obtuvo y su estructura será distinta en función de la materia prima que lo generó. El carbón activado tiene varias aplicaciones industriales entre las que destaca el tratamiento de efluentes, que en combinación con otras técnicas como la rizofiltración y la precipitación química permiten alcanzar los valores permisibles para los diferentes materiales contaminantes en aguas residuales [15].

El carbón activado también se puede aplicar en procesos de recuperación de solventes, eliminación de colorantes, así

como, también en la reducción de malos olores a partir del El carbón activado se obtiene a partir de materiales orgánicos que contengan un elevado contenido de carbono y baja cantidad de cenizas [5] como cáscaras y residuos de frutas, cuescos de nueces y desechos agrícolas de origen maderero [14]. Entre estos últimos se destaca el aserrín, el cual, presenta la capacidad de remover sustancias indeseadas del agua debido a la presencia de la lignina de su pared celular [20]. Se considera que el aserrín es el material lignocelulósico más prometedor en este campo debido a su bajo costo, gran capacidad de adsorción y facilidad de adquisición, además de ser un desecho industrial al que se le puede dar valor agregado y que a su vez se contribuiría a reducir el costo de tratamiento de este desecho sólido [17].

La obtención de carbón activado se puede llevar a cabo mediante métodos físicos o químicos. El método físico consiste en la carbonización de la materia prima en una atmósfera inerte a temperaturas cercanas a los 1000 °C. El método químico se realiza mediante la impregnación de un agente activante como el $ZnCl_2$, KOH o H_3PO_4 seguida de una calcinación a temperaturas próximas a los 600 °C [6].

Actualmente se prefiere emplear H_3PO_4 como agente activante frente al $ZnCl_2$ debido a que este último genera significativos problemas de contaminación medioambiental. Mientras que, por otro lado el KOH es un agente de activación ideal cuando se tiene materiales con alto contenido de carbón y bajo contenido de volátiles como por ejemplo carbón mineral [11]. Las ventajas de la activación por el método químico implican menor gasto energético, menor tiempo de activación, un mayor rendimiento y permite obtener carbones con mayor área superficial y microporosidad [14].

Uno de los métodos empleados para la determinación de la capacidad de adsorción del carbón activado es el índice o número de yodo. Este índice se define como la cantidad en miligramos de yodo que es adsorbido por un gramo de carbón. Para que un carbón activado sea considerado como comercial, debe tener un valor de índice de yodo de al menos 500 mg I_2 /g carbón. Este ensayo se encuentra especificado de acuerdo con la norma ASTM D4607-86 [3].

Otra de las técnicas con las que se puede caracterizar al carbón activado es la microscopía electrónica de barrido (SEM), mediante la cual se puede apreciar la formación de las estructuras porosas dentro del material. La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) permite identificar los grupos funcionales superficiales que le dan al carbón la característica de material adsorbente al igual que la Titulación Boehm [13]. El método de Brunauer, Emmett y Teller (BET) permite la determinación del área superficial, así como también el volumen y tamaño de poros. Finalmente, para complementar el estudio del carbón activado se realizan isotermas de adsorción que permiten determinar el equilibrio que alcanzan los materiales adsorbentes.

El carbón activado puede ser empleado por varias ocasiones, sin embargo, su capacidad de remoción se deteriora

empleo de filtros de carbón activado [5]. gradualmente en cada uso. Una vez saturado, el carbón activado tiene tres alternativas de tratamiento: la regeneración, la reactivación o el almacenamiento. Sin embargo, la reactivación implica un costo elevado debido a la cantidad de energía que se debe emplear con la finalidad de alcanzar las temperaturas necesarias para eliminar los contaminantes. Por otro lado, la regeneración consiste en la remoción del contaminante del carbón lo que genera nuevamente un problema de manejo del contaminante. Si las alternativas anteriores no son factibles se deberá proceder al confinamiento del carbón [6].

El objetivo de este trabajo es determinar la influencia del tamaño de partícula en la obtención de carbón activado y su capacidad de adsorción. La capacidad de adsorción se determina mediante el índice de yodo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales y Reactivos

Para llevar a cabo este proyecto se empleó sustancias de grado reactivo. Se utilizó ácido fosfórico al 85 % (H_3PO_4), ácido clorhídrico (HCl), tiosulfato de sodio pentahidratado ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$), yodo resublimado (I_2), yoduro de potasio (KI), yodato de potasio (KIO_3) y almidón soluble. Como materia prima se utilizaron residuos lignocelulósicos (aserrín) de laurel, eucalipto y canelo, los cuales fueron adquiridos en un aserradero al sur de la ciudad de Quito.

2.2 Elaboración de los carbones activados

2.2.1 Acondicionamiento de las materias primas

Los residuos lignocelulósicos recolectados fueron sometidos a un proceso de reducción de tamaño de partícula mediante un molino de cuchillas. Posteriormente, se realizó una clasificación de acuerdo al tamaño de partícula mediante un arreglo de tamices, de los cuales se tomaron las fracciones correspondientes a los tamaños 2 mm – 2 cm (virutas) y 74 - 150 μm (malla ASTM #100 - #200) con la finalidad de analizar la influencia del tamaño en la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido. Estas fracciones se seleccionaron considerando las cantidades obtenidas después del tamizado. El material separado se lavó con agua destilada y posteriormente se secaron a 103 ± 2 °C durante 12 horas.

2.2.2 Impregnación con ácido fosfórico

Inicialmente se preparó una solución de ácido fosfórico al 40 % w/w. A continuación, se pesó 50 g de material lignocelulósico en un recipiente previamente tarado. A este se le adicionó ácido fosfórico al 40 % en una relación en masa 1:1; es decir, por cada gramo de aserrín, se agregó 1 gramo de ácido con el fin de obtener un mayor rendimiento de carbón activado. Cabe mencionar que el uso de concentraciones superiores puede conducir a un uso poco efectivo del ácido, asociado con un mayor potencial de

contaminación. La relación másica de material lignocelulósico: agente de activación constituye uno de los factores que se puede optimizar [10]. Sin embargo, se puede emplear una relación de ácido fosfórico/aserrín de hasta 1:5 considerando que el cambio en las proporciones da lugar a la obtención de carbones activados con distintas propiedades [11]. El aserrín y el ácido se mezclaron vigorosamente hasta que el primero se humedezca completamente. Finalmente, se cubrió el recipiente con un film plástico y se dejó impregnar durante 24 h.

2.2.3 Activación mediante carbonización

Una vez realizada la impregnación, se llevaron las muestras a una mufla eléctrica para realizar la carbonización. Se elevó la temperatura hasta los 500 °C a una tasa de calentamiento de 10 °C/min, se mantuvo a esta temperatura durante 2 h. Transcurrido el tiempo, se dejó enfriar el horno, luego se retiraron los carbones obtenidos y se los llevó a un desecador para que se enfríen hasta alcanzar la temperatura ambiente. Después de haber sido enfriados, se les realizó lavados sucesivos con agua destilada caliente para eliminar el ácido fosfórico residual y alcanzar un valor de pH entre 6 y 7. Finalmente, se secaron los carbones resultantes a una temperatura de 103 ± 2 °C durante 12 horas y se enfriaron en el desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente.

2.3 Caracterización de los carbones activados

2.3.1 Microscopía electrónica de barrido

Se examinó la morfología de los carbones activados mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) PSEM eXpress de ASPEX.

2.3.2 Espectroscopia infrarroja con transformadas de Fourier

Se identificaron los grupos funcionales en la superficie de las muestras de los tres tipos de residuos lignocelulósicos y también en los carbones activados obtenidos a partir de los mismos. Para esto se empleó el espectrofotómetro infrarrojo por transformadas de Fourier (FTIR) Perkin Elmer Spectrum 100, en un rango de número de ondas comprendida entre 400 hasta 4000 cm^{-1} .

2.3.3 Índice de yodo

Los ensayos de determinación del índice de yodo se realizaron con base en la norma NTE INEN 1988:95. Este número permite establecer la porosidad y el área superficial del carbón activado. El ensayo consistió en pesar 1 g de carbón activado pulverizado de tamaño inferior a 45 μm . Se colocó la muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 ml. Luego, se añadió 10 ml de ácido clorhídrico al 5 % y se agitó hasta que el carbón se humedezca completamente. La mezcla fue calentada hasta la temperatura de ebullición y se mantuvo a esta temperatura por 30 s.

A continuación, se dejó enfriar la mezcla hasta alcanzar la temperatura ambiente. Se añadió 100 ml de la solución estándar de yodo 0.1 N y se agitó vigorosamente durante 30 s. Inmediatamente se filtró el contenido del recipiente a través de un papel filtro Whatman No. 2, se descartó los primeros 20 - 30 ml de filtrado. Posteriormente, se tomó una alícuota de 50 ml y se tituló con la solución estándar de tiosulfato de sodio 0.1 N. Se realizó la titulación hasta que la solución se tornó de un color amarillo pálido. Luego se añadieron 3 gotas de la solución de almidón. Se continuó con la titulación hasta que el color azul del indicador desapareció y la solución se volvió completamente transparente. El índice de yodo se determinó en función del volumen de tiosulfato de sodio 0.1 N utilizado para la titulación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 1 muestra la composición de los 3 tipos de aserrín de madera. Se puede apreciar que aunque se tratan de diferentes tipos de madera y que los porcentajes obtenidos de sus componentes son diferentes, se mantiene una misma tendencia en su composición, es decir, que el componente mayoritario son los materiales volátiles, seguidos de la cantidad de carbón fijo, luego el porcentaje de humedad y finalmente el contenido de cenizas. Con base en los resultados obtenidos, se puede establecer el siguiente orden según el porcentaje de carbón fijo: laurel (10,38 %) > eucalipto (7,95 %) > canelo (5,89 %). Se puede estipular que la cantidad de carbón activado resultante está en función de la cantidad de carbón fijo, es decir, a mayor porcentaje de carbón fijo en la muestra, mayor será el rendimiento del carbón activado obtenido. Lo que corrobora el resultado obtenido en la Fig. 1.

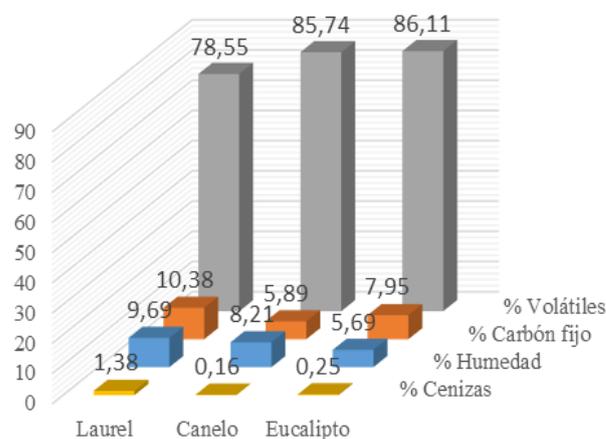


Figura 1. Composición de las maderas

Los rendimientos obtenidos en la producción de los carbones activados se presentan en la Tabla 1. Se puede apreciar, que el mayor rendimiento se obtuvo con el aserrín de laurel de tamaño de partícula mayor a 2 mm, mientras que el menor rendimiento se obtuvo al activar el canelo con un tamaño de partícula entre 150 - 74 μm . Esto corrobora los resultados de porcentaje de carbón fijo obtenidos en los ensayos de composición de las maderas que se muestran en la Fig. 1.

Estudios realizados para la obtención de carbón activado a partir de otros tipos de desechos orgánicos como cáscaras de naranjas, cascarillas de café y bagazo de caña indican rendimientos de aproximadamente 40 %, 33 %, 35 %, respectivamente [16].

Tabla 1. Rendimientos de los carbones activados producidos

Madera	Tamaño de partícula	Rendimiento (%)
Laurel	> 2 mm	29.3
	150 - 74 μm	20.6
Canelo	> 2 mm	26.9
	150 - 74 μm	19.8
Eucalipto	> 2 mm	28.2
	150 - 74 μm	20.2

En las Fig. 2(a) y 2(b) se observa las micrografías tomadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para el laurel de tamaño mayor a 2 mm y 150 - 74 μm . En estas se muestra la morfología del aserrín de laurel previo al proceso de activación. Se puede observar las estructuras en forma de fibras alargadas y la ausencia de cavidades o porosidades.

Las Fig. 2(c) y 2(d) corresponden a las micrografías de los carbones activados obtenidos con un tamaño mayor a 2 mm y 74 - 150 μm . En estas micrografías se puede apreciar la aparición de las estructuras porosas resultantes del proceso de activación. Estos poros pueden ser el resultado de la evaporación del agente de activación, la descomposición del aserrín por la temperatura, una reacción química entre el carbón y el agente activante, o simplemente puede tratarse del espacio ocupado previamente por el agente de activación. En la Fig. 2(c) se observa la presencia de una mayor cantidad de porosidades. Sin embargo, al ser la muestra de mayor tamaño, esta presenta menor cantidad de divisiones, por lo que tendrá un menor número de estructuras porosas con respecto a la muestra de tamaño 150 - 74 μm . Esto se puede observar en la Fig. 2(d). Por este motivo, la muestra de tamaño 74 - 150 μm tendrá mayor cantidad de estructuras porosas y por ende tendrá una mayor área específica.

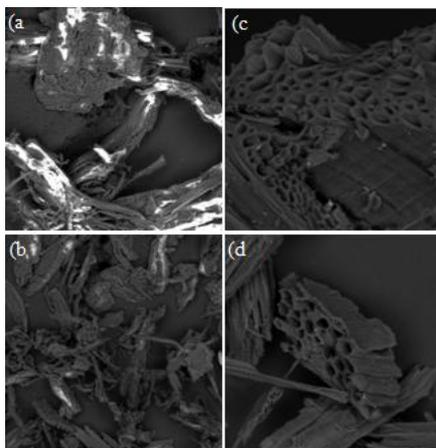


Figura 2. Morfología del laurel a 500 X (a) aserrín tamaño > 2 mm; (b) aserrín tamaño 74 - 150 μm ; (c) carbón activado tamaño > 2 mm; (d) carbón activado tamaño 74 - 150 μm

En la Fig. 3 se muestran los resultados de los ensayos de índice de yodo realizados para los 3 tipos de aserrín de maderas. En este caso, todas las muestras presentan un índice de yodo superior a 500 mg I₂/g carbón, por lo que respecto a su capacidad de adsorción son comparables con los carbones activados que se comercializan. Se puede apreciar la influencia del tamaño de partícula en la adsorción de yodo. Las muestras con un tamaño de partícula entre 150 - 74 μm presentan un mayor índice de yodo que las muestras con un tamaño de partícula mayor a 2 mm, lo que indica una mayor área específica para estos carbones.

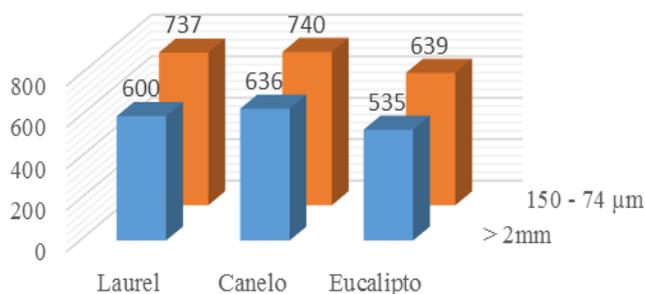


Figura 3. Resultados del ensayo de índice de yodo

Con respecto a los tipos de maderas, se obtuvo un mayor índice de yodo con el carbón activado elaborado a partir de aserrín de canelo, lo cual indica que esta madera es el mejor adsorbente, respecto a los otros 2 tipos de maderas estudiadas.

Según la capacidad de adsorción de yodo se puede notar el siguiente orden; para la fracción de tamaño 2 mm se tiene: canelo (740 mg/g) > laurel (737 mg/g) > eucalipto (639 mg/g), en el caso de las muestras con tamaño de partícula 150 - 74 μm se tiene el siguiente ordenamiento: canelo (636 mg/g) > laurel (600 mg/g) > eucalipto (535 mg/g). Esto implica que, para un mismo tipo de madera, se tendrá una mayor capacidad de adsorción para aquellos carbones que hayan sido obtenidos a partir de un menor tamaño de partícula. Esto se debe a que a menor tamaño de partícula de la materia prima, el área específica incrementa y por ende el área de contacto es mayor, lo que mejora el fenómeno de adsorción. La activación de carbón a partir de residuos madereros por el método químico empleando ácido fosfórico como agente activante permite obtener valores de índice de yodo que fluctúan entre 450 y 505 mg/g, lo cual, es menor que los obtenidos en este estudio [9]. Sin embargo, se debe señalar que existen casos en los cuales se pueden usar materiales lignocelulósicos para obtener carbones activados con índices de yodo de entre unos 200 y 1100 mg/g [10].

Finalmente, debido a que el índice de yodo para el tamaño de partícula de 2 mm se encuentra alrededor de los 700 mg/g, se puede decir que el carbón activado obtenido tiene potencial de ser comercializado. Así, existen carbones activados granulares (como el de Sulfoquímica S.A.) que presentan un índice de yodo de 800 mg/g.

La Fig. 4 muestra los espectrogramas FTIR superpuestos de los tres tipos de madera que se utilizaron en el presente

estudio. Se puede observar la variación del valor de la longitud de onda que presentan los picos entre una y otra madera es insignificante, lo que indica la presencia de los mismos grupos funcionales. Se aprecia la presencia de picos prominentes en el rango de 1800 a 1000 cm^{-1} característicos de las estructuras principales de la madera: la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. Aquellos picos que se observan en el rango de 3600 a 3200 cm^{-1} corresponden a los estiramientos de los grupos (-OH) presentes en las estructuras de la celulosa y la lignina [19].

Las bandas que se observan alrededor de 2930 cm^{-1} representan a los grupos (C-H) de las cadenas alifáticas. El pico presente a 1643 cm^{-1} , podría representar al grupo (-C=O) de una amida primaria. La banda que se encuentra a 1529 cm^{-1} corresponde a los estiramientos de los grupos carbonilos (-C=O). A los 1445 cm^{-1} se tiene picos que representan la flexión simétrica de los grupos (CH_3). De 1250 a 1200 cm^{-1} se tiene picos que representan los estiramientos de los grupos (C-O) de la celulosa. Los picos que se observan a 1140 y 1040 cm^{-1} pueden ser representativos de los estiramientos de los grupos (-SO₃) y de los estiramientos de los grupos (C-O) de los polisacáridos [21].

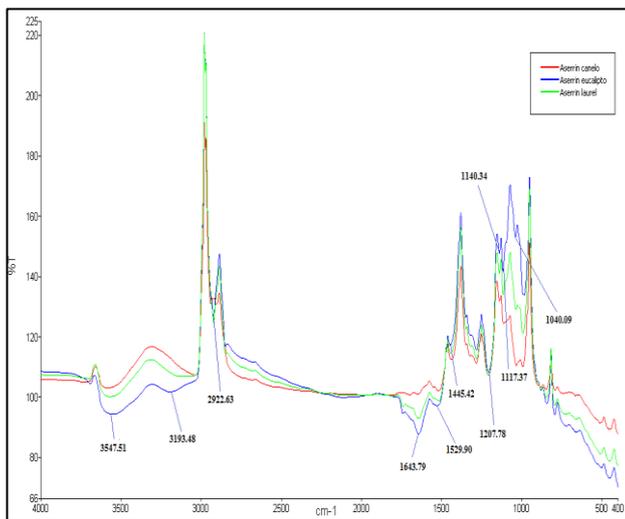


Figura 4. Espectro FTIR de las tres variedades de madera

En las Fig. 5, 6 y 7; se muestran los espectrogramas infrarrojos obtenidos mediante el equipo de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) de los carbones activados producidos a partir de los 3 tipos de maderas. Se realizó el análisis en un rango de 400 a 4000 cm^{-1} . Debido a la diferente naturaleza de las maderas, se puede observar una ligera desviación en los valores de las longitudes de onda de los picos.

Se tiene entre los picos más representativos: las bandas correspondientes a (3524, 3584, 3522 cm^{-1}), estas son atribuidas a los estiramientos vibracionales del (-OH) de los grupos fenol de la celulosa [18]. La presencia de las bandas de adsorción a (2919, 2908, 2906 cm^{-1}) que corresponden a los estiramientos vibracionales simétricos y asimétricos de los grupos (C-H) de moléculas alifáticas [8]. Las bandas a (1552, 1524, 1646 cm^{-1}) se atribuyen a los estiramientos

vibracionales (C=O) y corresponden a grupos carbonilo y carboxilo. Los picos en (1440, 1437, 1440 cm^{-1}) se asignan a las vibraciones de tijereteo de los grupos (-CH₂) [7]. Las bandas a (999, 993, 993 cm^{-1}) se asocian al estiramiento del grupo éter cíclico de la celulosa [14]. Las bandas de adsorción a (790, 763, 792 cm^{-1}) son características de las vibraciones de flexión de los grupos (C-H) [8]. Finalmente, los picos correspondientes a las longitudes de onda de (455, 456, 459 cm^{-1}) son atribuidos a las vibraciones de flexión fuera de plano del grupo (-OH) [7].

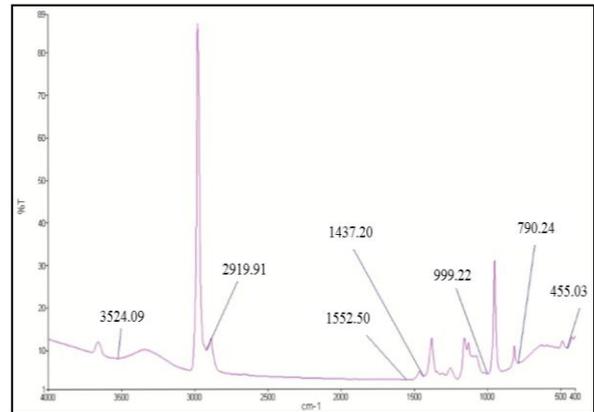


Figura 5. Espectro FTIR del carbón activado obtenido a partir de aserrín de canelo

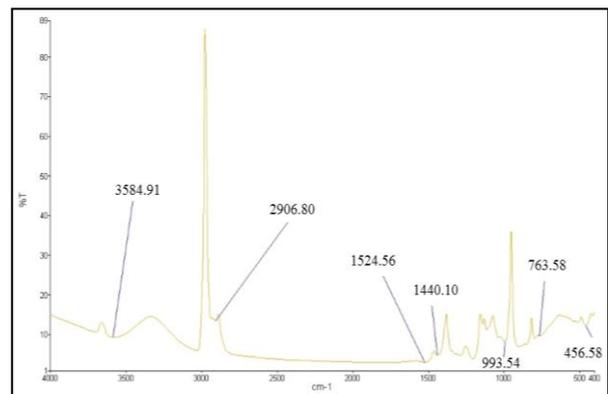


Figura 6. Espectro FTIR del carbón activado obtenido a partir de aserrín de eucalipto

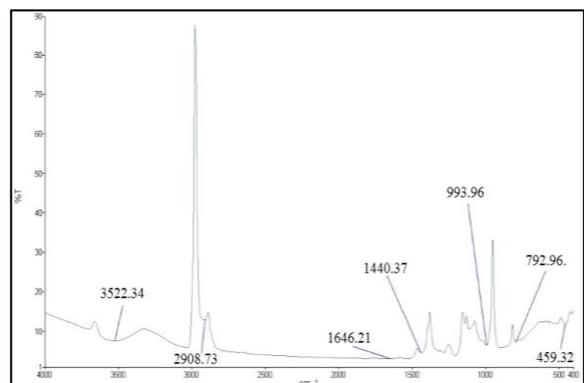


Figura 7. Espectro FTIR del carbón activado obtenido a partir de aserrín de laurel

4. CONCLUSIONES

Se logró obtener carbón activado mediante activación química a partir de aserrín de canelo, laurel y eucalipto. El rendimiento alcanzado para estos materiales se encuentra entre 20 – 30 %. A nivel industrial el rendimiento de carbón activado depende del tipo de madera y generalmente no supera el 50 % [9].

Con el laurel se obtuvo el rendimiento más alto, este corresponde a un 29.3 % para el tamaño de partícula comprendido entre 74 y 150 μm y un porcentaje del 20.6 % para la fracción de tamaño mayor a 2 mm.

El mejor adsorbente obtenido es el carbón activado producido a partir del aserrín del canelo con un tamaño de partícula de 74 - 150 μm . Este presenta un índice de yodo de 740 mg I_2/g de carbón.

Todos los carbones activados obtenidos en este estudio presentan valores de índice de yodo mayores al valor mínimo considerado para su comercialización que es de 500 mg I_2/g de carbón.

Se puede comprobar que para una misma variedad de madera, el índice de yodo de la muestra de tamaño 74 - 150 μm es superior a la de tamaño mayor a 2 mm. Es decir, que a menor tamaño el área específica incrementa y esto mejora la adsorción.

Debido a que el carbón activado puede ser empleado en varios procesos de remoción, el ácido fosfórico residual de los lavados puede ser recirculado o recuperado y al emplear una materia prima (aserrín) calificada como desecho industrial, se considera que el proceso de adsorción empleando residuos lignocelulósicos además de ser factible es relativamente amigable con el ambiente.

REFERENCIAS

- [1] I. Ali, V. K. Gupta, "Advances in water treatment by adsorption technology", *Natural Protocols*, vol. 1, no. 06, pp. 2661-2667, 2006.
- [2] M. Ajmal, A. Khan, S. Ahmad, A. Ahmad, "Role of sawdust in the removal of copper (II) from industrial wastes", *Water Research*, vol. 32, no. 10, pp. 3085-3091, 1998.
- [3] S. Altenor, B. Carene, E. Emmanuel, J. Lambert, J. Ehrthard, S. Gaspard, "Adsorption studies of methylene blue and phenol onto vetiver roots activated carbon prepared by chemical activation", *Journal of Hazardous Material*, vol. 165, no. 1, pp. 1029-1039, 2009.
- [4] A. Aygun, S. Yenisoy, I. Duman, "Production of Granular Activated Carbon from Fruit Stones and Nutshells and Evaluation of Their Physical, Chemical and Adsorption Properties," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 66, no. 2-3, pp. 189-195, 2003.
- [5] M. Bastidas, L. Buelvas, M. Marquez, K. Rodríguez. "Producción de Carbón Activado a partir de Precursores Carbonosos del Departamento del César, Colombia", *Información Tecnológica*, vol. 21, no. 3, 87-96, 2010
- [6] T. Budinova, E. Ekinci, F. Yardim, A. Grimm, E. Björnbom, V. Minkova, M. Goranova, "Characterization and application of activated carbon produced by H_2PO_4 and water vapor activation", *Full Processing Technology*, vol. 87, no. 10, pp. 899-905, 2006.
- [7] C. Chen, P. Zhao, Y. Huang, Z. Tong, Z. Li, "Preparation and characterization of activated carbon from eucalyptus sawdust I. Activated by NaOH", *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, vol. 23, no. 5, pp. 1201-1209, 2013.
- [8] C. Djilani, R. Zaghdoudi, A. Modarressi, M. Rogalski, F. Djazi, A. Lallam, "Elimination of organic micropollutants by adsorption on activated carbon prepared from agricultural waste", *Chemical Engineering Journal*, vol. 189-190, pp. 203-212, 2012.
- [9] J.F. Herrera, W. A. Morales, J.D. Pérez, "Selección de un método para producir carbón activado utilizando cuatro especies forestales", pp. 1-15, 2004.
- [10] M. Loredó-Cancino y otros, "Determining optimal conditions to produce activated carbon from barley husks using single or dual optimization", *Journal of Environmental Management*, vol 125, pp. 117-125, 2013.
- [11] J.A. Menéndez. "Residuos de biomasa para la producción de carbones activos y otros materiales de interés tecnológico", *Mundo del residuo: caracterización, tratamiento, gestión*, pp. 1-10, 2008.
- [12] F. M. Mohammed, E. Roberts, A. Hill, A. Campen, N. Brown, "Continuous water treatment by adsorption and electrochemical regeneration", *Water Research*, vol. 45, no. 10, pp. 3065-3074, 2011.
- [13] A. Oickle, S. Goertzen, K. Hopper, Y. Adballa, H. Andreas, "Standardization of the Boehm titration: Part II. Method of Agitation, Effect of Filtering and Dilute Titrant", *Carbon*, vol. 48, no. 1, 3313-3322, 2010.
- [14] D. Prahaz, Y. Kartika, N. Indraswati, S. Ismadi, "Activated carbon from jackfruit peel waste by H_3PO_4 chemical activation: Pore structures and surface chemistry characterization", *Chemical Engineering Journal*, vol. 140, no. 1-3, pp. 32-42, 2008.
- [15] A. Quishpe, E. De la Torre, A. Guevara, "Tratamiento de efluentes líquidos de la industria del curtido mediante precipitación química, adsorción con carbón activado y rizofiltración", *Revista Politécnica*, vol. 31, no. 1, pp. 117-122, 2012.
- [16] J. A. Solís, M. Morales, R. C. Ayala, M. C. Durán, "Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción del color del jugo de caña", *Tecnología, Ciencia, Educación*, vol. 27, no 1, pp. 36-48, 2012.
- [17] A. Shukla, Y. Zhang, P. Dubey, J. Margrave, S. Shukla, "The role of sawdust in the removal of unwanted materials from water", *Journal of Hazardous Material*, vol. 95, no. 1-2, pp. 137-152, 2002.
- [18] D. Sidiras, F. Batzias, E. Schroeder, R. Ranjan, M. Tsapatsis, "Dye adsorption on autohydrolyzed pine sawdust in batch and fixed-bed systems", *Chemical Engineering Journal*, vol. 171, no. 3, pp. 883-896, 2011.
- [19] R. Texeira, V. Sousa, J. Oliveira, C. Oliveira, D. Melo, M. Silva, R. Nascimento, "Study on the use of Roasted Barkley Powder for Adsorption of Cu^{2+} ions in Batch Experiments and in Fixed-bed Columns", *BioResources*, vol. 8, no. 3, pp. 3556-3573, 2013.
- [20] C. Toles, W. Marshall, M. Jonhs, "Surface functional groups on acid-activated nutshell carbons", *Carbon*, vol. 37, no. 8, pp. 1207-1214, 1999.
- [21] V. Vinodhini, N. Das, "Mechanism of Cr (VI) Biosorption by Neem Sawdust", *American – Eurasian Journal of Scientific Research*, vol. 4, no. 4, pp. 324-329, 2009.