

Producción de carbón activado y sílice a partir de cascarilla de arroz - una revisión

Silicates and active carbon obtained by the use of husk rice – a review.

Cindy Carolina Carrillo Quijano², Jonatan Albarracin Caballero³, Xavier I. Pereira Hernández⁴

Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Fundación Universitaria de San Gil, Yopal, Colombia

ccarrillo@unisangil.edu.co

terranare@unisangil.edu.co

Resumen— En esta revisión se compararon los procesos individuales de obtención de sílice y carbón activado con un proceso de producción conjunta. En la primera parte se enumeran las variables y procesos propios de la producción de cada material de forma individual. En la segunda sección se sugiere y analiza un procedimiento más amigable con el ambiente en el que es posible obtener de forma simultánea ambos materiales. De acuerdo con la literatura en el proceso simultáneo, el carbón activado presenta un área específica de 1713 m²/g y un volumen de poro de 1,8 mL/g y la sílice exhibe una estructura amorfa con diámetro de partícula de 40 a 50 nm.

Palabras clave— Cascarilla de arroz, carbón activado, sílice, integración de procesos.

Abstract— In this review, individual processes to obtain silica and activated carbon were compared with an integrated production process. The first part described the most relevant variables and processes of the manufacture of each product, individually. In the second section it is suggested and analyzed an environmentally friendlier process in which it is possible to simultaneously obtain both materials. According to literature, through simultaneous process, activated carbon presented an area of 1713 m²/g, specific pore volume 1.8 mL/g and silica exhibited an amorphous structure with particle diameter of 40 to 50 nm.

Key Word — Rice husk, activated carbon, silica, process integration

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el ser humano produce una gran cantidad de desechos en su actividad diaria, de los cuales, gran parte proviene de la agricultura. En Colombia, la producción de arroz es una actividad importante debido a que es un alimento altamente consumido. El área cosechada de arroz en el segundo semestre de 2012 fue de 258 551 ha, la cual se vio representada en una producción de arroz de 1 376 385 t [1]. El departamento de Casanare contribuyó con 77 209 ha, equivaliendo a 377 129,5 t de arroz.

Durante la producción de arroz la cascarilla es desechada y se convierte en un residuo, ésta equivale al 20% del peso

total [2]. Por lo tanto, la cantidad de Cascarilla de Arroz (CA) para el segundo semestre de 2012 en el departamento de Casanare asciende a un valor de 75 425,9 t.

De acuerdo a información provista por el molino El Yopal, sólo el 30% de la CA es usado para producción de abonos y para pisos en transporte de ganados, combustible de hornos para el secado de arroz, galpones para la industria avícola, entre otros. Por lo tanto, es importante investigar otros posibles usos de la cascarilla como materia prima.

Dos productos pueden ser obtenidos a partir de CA como el carbón activado y la sílice. Ambos productos son muy utilizados como materia prima en otros procesos.

El carbón activado ha sido ampliamente utilizado como absorbente y soporte catalítico, gracias a su alta porosidad y área superficial [3]. También es utilizado para la eliminación de olor y sabor de aguas contaminadas [4], la remoción de una gran variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos disueltos en medio acuoso o gaseoso [5], como adsorbentes industriales para procesos de recuperación, purificación y separación y como soportes catalíticos, columnas de cromatografía. [6]. También se caracteriza por su excelente conductividad eléctrica y es por eso es utilizado como materia prima en la producción de electrodos para baterías y capacitores [7,8].

Por otra parte, la sílice puede utilizarse en catálisis [9], en la producción de concreto con propiedades mejoradas [10,11], materiales compuestos basados en magnesio [12], zeolitas y silicalitas [13], pigmentos de cerámica vidrio [14], fibras ópticas para telecomunicaciones, cerámicas y polímeros [15], en la estabilización de suelos [16], entre otras.

En este trabajo, se presentan procesos individuales de producción de carbón activado y sílice y se comparan con un esquema de producción conjunta de los dos productos. Se puede observar que el proceso conjunto no solo presenta un producto final con igual calidad como las obtenidas en procesos individuales y adicionalmente, es un proceso más amigable con el medio ambiente, teniendo en cuenta que ocurre un aprovechamiento más íntegro de la CA que en los procesos individuales y la captación de gases como el CO₂ el cual se aprovecha posteriormente.

II. PREPARACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO USANDO CASCARILLA DE ARROZ

Tradicionalmente, se han desarrollado dos procesos mediante los cuales es posible obtener carbón activado. En el primero de ellos se realiza una activación física, ésta consiste en someter a fuerte calentamiento el material precursor, teniendo en cuenta no sobrepasar la temperatura de gasificación de éste. En el otro, se lleva a cabo una activación química, ésta consiste en calentar a temperaturas relativamente bajas adicionando agentes deshidratantes como H_3PO_4 , $ZnCl_2$, KOH , $NaOH$ etc. [17, 18].

La figura 1 muestra un paralelo entre los dos procedimientos. Se profundizará un poco en la activación química y no en la física ya que es posible modificar un mayor número de variables para obtener mejores resultados en la obtención del carbón activado.

Activación Química

Este método consiste en llevar a cabo la activación por medio de una reacción química con un reactivo que puede ser $ZnCl_2$, $NaOH$, KOH , H_3PO_4 , ó Na_2CO_3 , para posteriormente realizar la carbonización. La figura 2 muestra un esquema general de la obtención de carbón activado usando esta técnica [19]. Actualmente, existen varios estudios en los que se modifican algunas variables, con el fin de obtener mejores propiedades estructurales [20, 21, 22, 23].

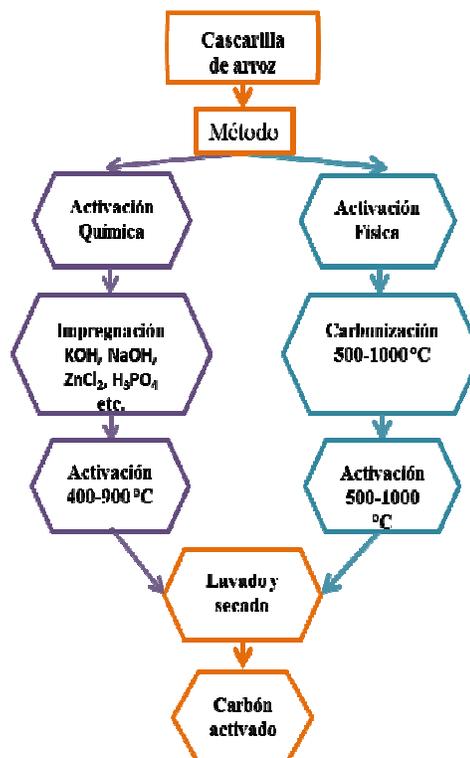


Figura 1. Comparación entre los métodos de obtención de carbón activado

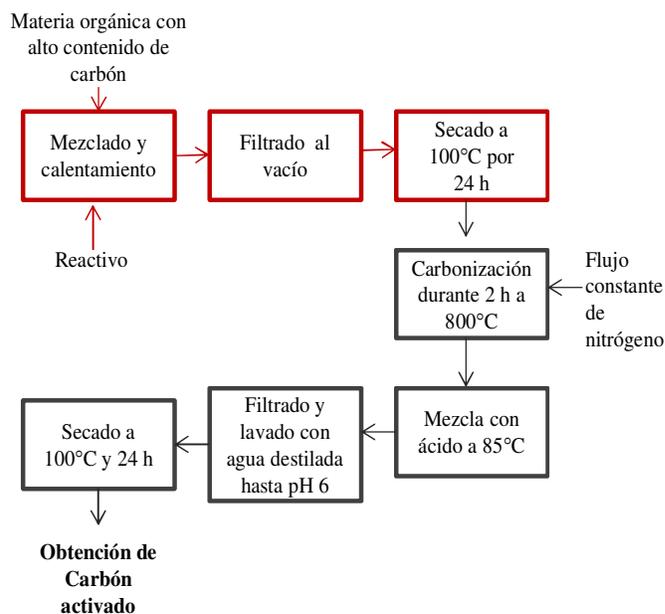


Figura 2. Obtención de carbón activado utilizando la activación química.

Variables influyentes en la obtención del carbón activado:

Tiempo de activación:

Li et al. [20] demuestra cómo se afectan el área BET y el volumen de poro cuando se modifican las variables

concentración del reactivo, y tiempo de activación. La tabla 1, muestra los resultados de esta investigación.

Tiempo de activación [h]	Concentración de H_3PO_4 [%]	Área BET [m^2/g]	Volumen de poro [mL/g]
0,5	50	1700	1,9
	60	1620	1,91
	85	1560	2,2
1	50	1600	1,5
	60	1400	1,5
	85	1400	1,75
1,5	50	1410	1,5
	60	1300	1,4
	85	1200	1,75
2	50	1200	1,25
	60	1100	1,4
	85	1000	1,5

Tabla 1. Afectación de área Bet y volumen de poro al variar el tiempo de activación y la concentración del agente deshidratante (H_3PO_4).

En este estudio se concluyó que a mayor tiempo de activación el área BET y el volumen de poro se hacen más pequeños, lo que implica una afectación negativa, dado que al producir carbón activado se busca obtener el área superficial y volumen de poro grandes. Las mejores condiciones se encontraron con media hora de tiempo de activación y 50% de concentración de H_3PO_4 [20].

Influencia de la temperatura de activación:

Cuando la temperatura llega a 600 °C el material se gasifica lo que resulta en la destrucción de los poros y en la disminución de su volumen. Se ha encontrado que las mejores condiciones para contribuir a la formación de la mayor cantidad de mesoporos, se registran a temperaturas que se acercan a 425°C. Cuando la temperatura de activación es mayor a 800 °C se ha encontrado que se afecta enormemente y negativamente el área específica [21,24].

Otro hallazgo importante encontrado por Ying Li Et al. 2011, concluyó que entre mayor sea la cantidad de SiO_2 en el precursor (cascarilla de arroz), menor es el volumen de poro del carbón obtenido. Esto se debe a que el SiO_2 reacciona con el H_3PO_4 para producir SiP_2O_7 , material que se acumula en los poros disminuyendo por esta razón su volumen, como se observa en la figura 3 [20].

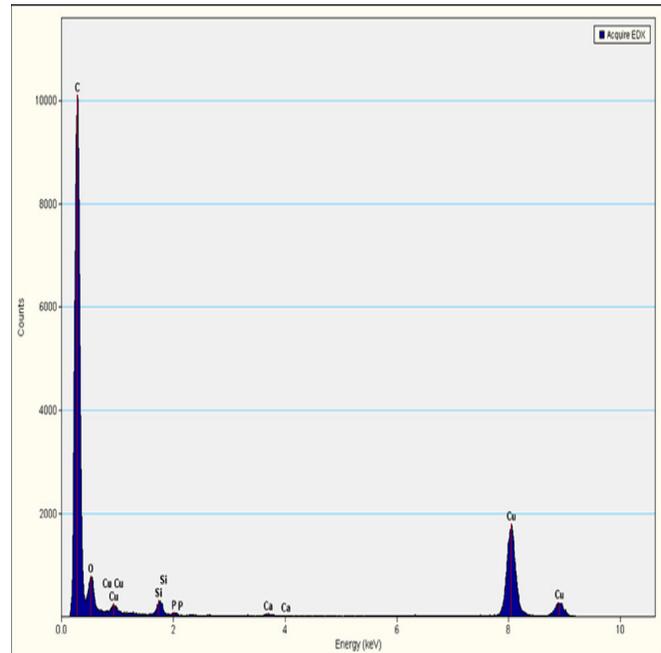


Figura 3. EDX para carbón activado

La figura 3, muestra el diagrama EDX para el carbón activado en el que es posible apreciar los picos de sílice, fósforo y oxígeno, evidencia de la existencia de silicatos de fosfato.

III. PRODUCCIÓN DE SÍLICE A PARTIR DE CASCARILLA DE ARROZ

La cascarilla de arroz está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. Adicionalmente, posee una gran variedad de compuestos inorgánicos, entre los cuales el dióxido de silicio (SiO_2), también llamado sílice, es su mayor constituyente.

Por medio de un tratamiento térmico se pueden obtener cenizas de la cascarilla de arroz, las cuales están compuestas principalmente por dióxido de silicio.

Se han realizado múltiples estudios en los cuales se evalúan los parámetros del proceso de producción de cenizas de cascarilla de arroz. Las variables más importantes en este proceso suelen ser el tiempo y la temperatura. Sin embargo, dependiendo de la configuración exacta del proceso, otras variables pueden tener una gran importancia.

El proceso descrito en [2] y su experimentación demuestran como la velocidad de fluidización en un reactor de lecho fluidizado se convierte en una variable importante.

El trabajo realizado en [25,26] permite observar la importancia del ambiente en el que ocurre el proceso térmico y su temperatura en la obtención de diferentes compuestos a partir de silicio.

En las investigaciones [27, 28, 29] se puede identificar la importancia de la velocidad de calentamiento en los procesos no isotérmicos y su influencia en el área específica y el tamaño de partícula.

Las diferencias entre los experimentos realizados en trabajos previos señalan que no hay un procedimiento único válido para llevar a cabo la producción de silicatos a partir de cascarilla de arroz. No obstante, a continuación se sugiere un proceso aplicable al caso colombiano, basándose en la superficie específica del producto final. Este proceso parte del proceso explicado en [30] y adaptado en [31]. Su esquema general puede ser observado en la figura 4.

El proceso inicia en un reactor de lecho fluidizado (RLF) en el cual se expone la cascarilla de arroz a una temperatura de 475 °C durante un tiempo menor a 2 s. La característica principal de esta pirólisis rápida es una composición a la salida en la cual el contenido fijo de carbono es alto (~50 %p/p), en comparación con procesos de pirólisis más largos, donde el contenido de carbono es nulo, o un valor muy pequeño, en caso de estar presente [32,15].

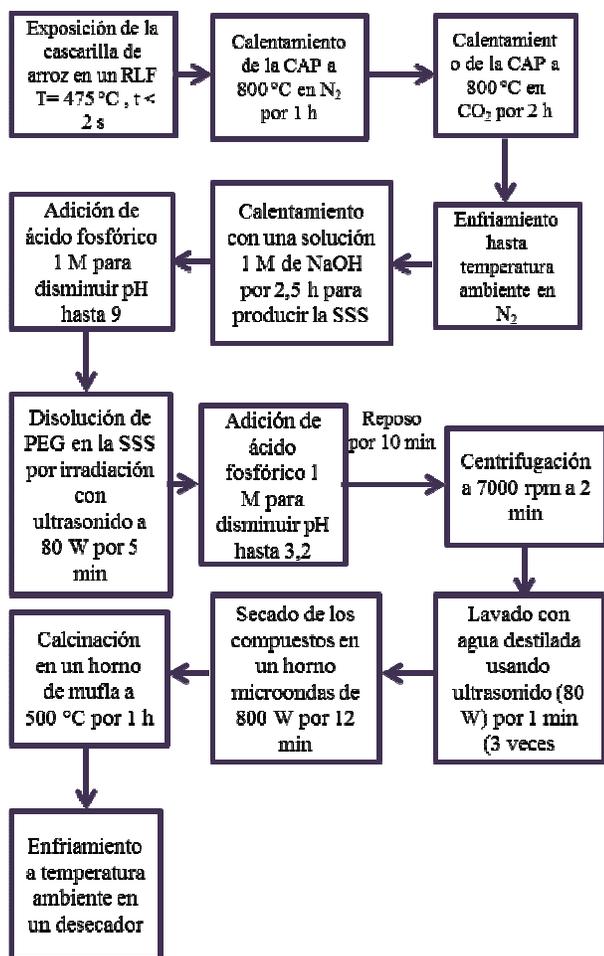


Figura 4. Esquema de la producción de sílice a partir de cascarilla de arroz.

La cascarilla de arroz pirolizada (CAP) se calienta a 800 °C en un ambiente de N₂ (300 mL/min) por 1 h y luego en un ambiente de CO₂ (550 mL/min) por 2 h. Posteriormente, se enfría hasta temperatura ambiente en N₂ y se calienta con un reflujo de 60 mL de una solución 1 M de NaOH por 2,5 h para producir una solución de silicato de sodio (SSS). Se agrega gota a gota ácido fosfórico de concentración 1 M a temperatura ambiente con el objetivo de disminuir el pH de la SSS hasta 9. A continuación, se disuelve polietilenglicol (PEG) en la SSS por irradiación con ultrasonido a 80 W por 5 min, seguido de la adición gota a gota de más ácido para alcanzar un pH de 3,2. La mezcla se deja reposar por 10 min y se centrifuga a 7000 rpm por 2 min. Se obtiene un compuesto blanco el cual se lava con agua destilada usando ultrasonido (80 W) por 1 min. El proceso de lavado se repite dos veces, seguido del secado de los compuestos en un horno microondas de 800 W por 12 min. Finalmente, la muestra se calcina a 500 °C por 1 h en un horno de mufla y se enfría a temperatura ambiente en un desecador.

Una vez finalizado el proceso se obtiene sílice con superficie específica alta. El valor obtenido de superficie específica en [31] es de 1018 ± 12 m²/g. Sin embargo, es importante recalcar que dependiendo de cada etapa, este valor puede variar. También es importante notar que el valor obtenido de superficie específica depende fuertemente del pH que tiene la muestra al final de la segunda adición de ácido. El valor alcanzado, utilizando un pH de 3,2 fue el máximo obtenido en [31].

La tabla 2 muestra las propiedades finales de la obtención de sílice, por medio del procedimiento expuesto en [31]. En este estudio se varía el pH final adicionando H₃PO₄, de acuerdo al procedimiento explicado, con el fin de conocer la afectación a las propiedades de la sílice.

pH de la muestra de Sílice	Área [BET] m ² /g	Volumen de mesoporos [cm ³ /g]	Contribución de volumen de mesoporos [%]	Diámetro de poro [nm]
3,2	1081	0,23	39	2,3
4,1	957	0,22	38,6	2,4
5,0	879	0,18	35,3	2,3
5,7	792	0,14	32,6	2,2

Tabla 2. Propiedades texturales de la sílice, obtenidas mediante el procedimiento expuesto en [31]

IV. OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO Y SÍLICE SIMULTÁNEO.

Los procedimientos de obtención de carbón activado y sílice mostrados anteriormente muestran una falta de uso racional de materia prima. Liu, Guo, Gao et al. [33] y Liu, Guo, Zhu et al.

[34] proponen una nueva metodología con la que es posible obtener ambos productos en un solo procedimiento simultáneo y con bajo impacto ambiental. La figura 5, muestra el diagrama general del procedimiento de obtención de los productos simultáneos. Este se divide en 4 fases.

a) Preparación de la materia prima:

Previamente la cascarilla de arroz se somete a pirólisis [35]. El resultado de la caracterización de ceniza se muestra en la tabla 3.

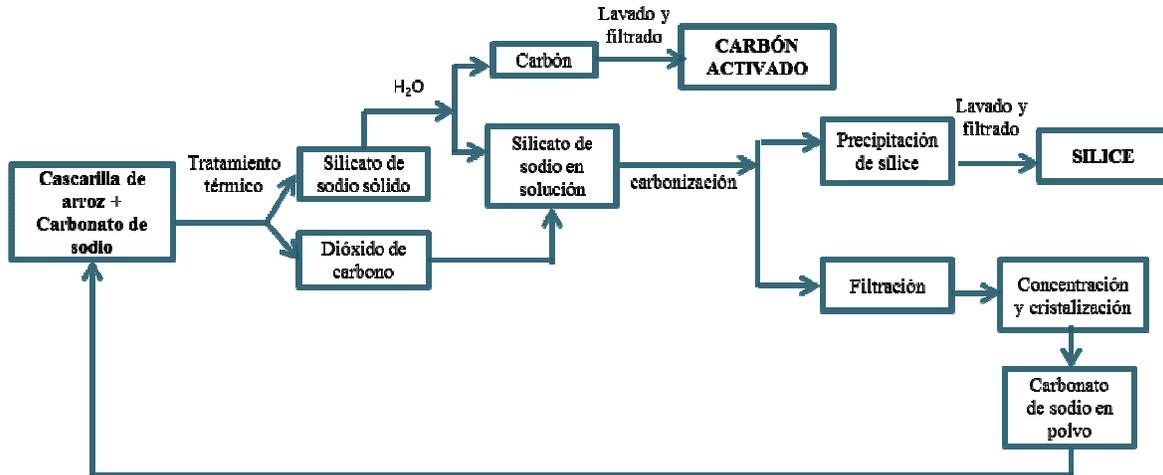


Figura 5. Obtención de carbón activado y sílice simultánea. Fuente: [34]

Elemento	% peso
Si	65
C	32
K ₂ O	0,81
CaO	0,42
Na ₂ O	0,29
MgO	0,13
Al ₂ O ₃	0,16
ZnO	0,12
Fe ₂ O ₃	0,15
CuO	0,00025
Mn ₂ O	0,64

Tabla 3. Caracterización de la ceniza de cascarilla de arroz obtenida mediante pirólisis. Fuente: [34]

c) Tratamiento térmico

La ceniza de cascarilla de arroz pre-tratada se con Na₂CO₃ ó K₂CO₃ en polvo a cierta tasa de impregnación. Posteriormente, se somete a calentamiento en un horno de porcelana por cierto período de tiempo. De acuerdo a [33, 34], el tiempo óptimo se encuentra entre 50 y 90 minutos, a

b) Pretratamiento ácido

La ceniza de cascarilla se somete a un pretratamiento con ácido clorhídrico diluido, la mezcla se calienta y agita con reflujo de condensado por 2,5 h. Finalmente la suspensión obtenida se filtra y el residuos sólido es lavado con agua destilada y secado por 12 h a 120 °C [36,37].

una temperatura de diseño bajo flujo constante de nitrógeno. Seguidamente el sistema se deja enfriar a 100°C y se transfiere a un balón de tres bocas de 500 mL.

En esta fase, el dióxido de carbono se captura con el fin de que se utilice en la fase de precipitación de sílice.

d) Preparación de carbón activado:

Entre 350 y 120 mL de agua son adicionados a la suspensión que se encuentra en un frasco tapado de tres bocas de 500 mL [33, 34] y se mantiene en punto de ebullición por un tiempo. Esto se hace con el fin de poder solubilizar los silicatos de potasio que afectan el volumen de poro del producto final. La dispersión se filtra, seguidamente el carbón activado es lavado con agua destilada hasta que la solución sea neutra, y se seca por 12 h a 120 °C.

e) Preparación de sílice:

En el proceso de carbonización, la sílice se prepara a través de la neutralización del dióxido de carbono y del proceso de separación. El filtrado obtenido dentro del reactor se mantiene a una temperatura de 70-95 °C, posteriormente, el dióxido de carbono capturado se introduce en el reactor durante 1 h. El producto de la reacción se deja envejecer por 3 h a temperatura ambiente, el precipitado se filtra y posteriormente utilizando una bomba de vacío, se lava con agua destilada hasta neutralidad, luego se seca a 120 °C, durante 24 h para obtener sílice en

polvo. El filtrado rico en Na_2CO_3 ó K_2CO_3 se cristaliza y se reutiliza en el tratamiento térmico inicial.

f) *Producto final:*

Al igual que en los procedimientos individuales, es necesario escoger las mejores condiciones para poder alcanzar el rendimiento óptimo del proceso. Estas condiciones se encuentran en la tabla 4.

<i>Condición</i>	<i>Valor óptimo</i>
Tasa de impregnación	1 : 1,5
Temperatura de activación [°C]	1000 °C
Tiempo de activación [min]	90
Cantidad de agua para disolver los silicatos de potasio [mL]	120

Tabla 4. Condiciones óptimas de proceso simultáneo. Fuente: [33]

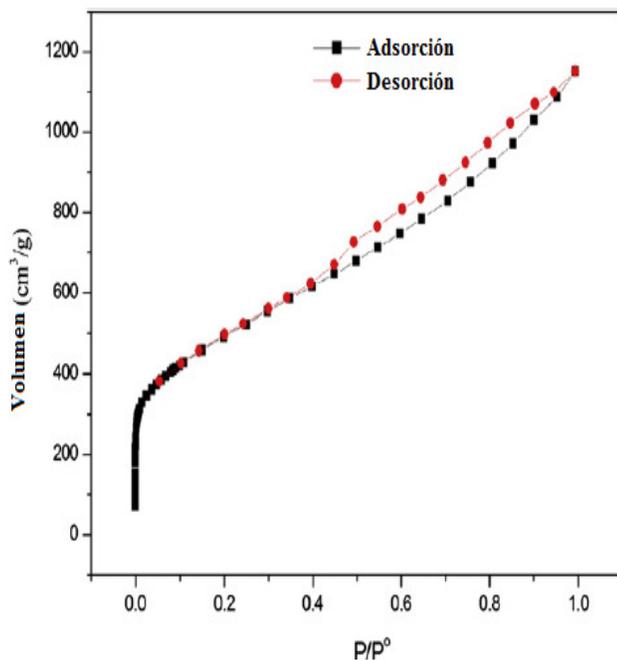


Figura 6. Isotermas de Adsorción y desorción de nitrógeno para carbón activado. Fuente: [34]

La figura 6 muestra las isotermas de adsorción y desorción de nitrógeno para las condiciones óptimas de producción del carbón activado. A bajos valores de P/P_0 , la isoterma es similar a la de absorbentes microporosos. Luego la adsorción aumenta marcadamente en un valor por debajo de 0,4 donde la condensación toma lugar y se encuentra la curva de histéresis lo que sugiere la existencia de

mesoporos, que se concentran en 4 nm. La estructura del carbón activado contiene una gran cantidad de poros y mesoporos que poseen extensivas aplicaciones en la industria [38].

La mayor área BET conseguida fue de $1713 \text{ m}^2/\text{g}$, mayor que en otros estudios con otras materias primas y procedimientos realizados. Una comparación entre las propiedades del carbón activado obtenido por medio de este procedimiento y otros carbones activados comerciales se muestra en la tabla 5.

El carbón activado obtenido por medio de este proceso tiene características de adsorción óptimas lo que se muestra con la adsorción de 210 mg/g de azul de metileno. La estructura de la sílice es completamente amorfa, el diámetro de partícula esta entre 40 y 50 nm, la adsorción de de ftalato de dibutilo fue de 3 mL/g .

<i>Propiedad del carbón activado</i>	<i>C1: Carbón preparado con el proceso simultáneo</i>	<i>C2: Carbón activado comercial</i>	<i>C3: Carbón activado comercial</i>
Área BET [m^2/g]	1713	1579	1750
Volúmen de poro [cm^3/g]	1,785	0,95	1,42
Volúmen de microporo [$w < 2\text{nm}$]	0,715	0,19	0,07
Volúmen de mesoporo [$w > 2\text{nm}$]	1.07	0,76	1,35
Diámetro de poro promedio [nm]	4,166	2,42	3,25
Capacidad de adsorción de azul de metileno [mg/g]	210	110	28
Capacidad de adsorción de yodina [mg/g]	2482	2365	2140

Tabla 5. Comparación de propiedades entre carbón activado obtenido en el proceso simultáneo a una temperatura de activación de 1000 °C utilizando K_2CO_3 con un tiempo de activación de 90 min (C1). Con carbón activado a partir de madera temperatura de activación 750 °C

usando como reactivo $ZnCl_2$ (C2) y finalmente con carbón activado obtenido a partir de madera utilizando $ZnCl_2$ y una temperatura de 850 °C (C3). Fuente: [33]

V. CONCLUSIONES

El procedimiento de producción simultánea de carbón activado y sílice, muestra una nueva oportunidad para integrar procesos y hacerlos más eficientes y amigables con el medio ambiente. Al comparar las propiedades de los productos finales con los procedimientos individuales no hay una gran diferencia o pérdida de calidad en las propiedades más significativas como estructura, área específica, volumen de poro y capacidad de adsorción. Sin embargo, sí hay una mejora en el aprovechamiento total de la cascarilla de arroz, en el reciclaje de reactivo y una disminución de la contaminación al capturar CO_2 que posteriormente se usa en el mismo procedimiento.

Es claro que hay un campo interesante por explorar con miras a mejorar este procedimiento y poder realizar un escalamiento industrial. Este tipo de desarrollo representa para los sectores arroceros colombianos una oportunidad para lograr avances tecnológicos, científicos y económicos, que podrían jalonar el desarrollo de las regiones arroceras, generando nuevas oportunidades de negocios.

VI. RECOMENDACIONES

Llevar a cabo, el análisis económico de esta nueva metodología con el fin de conocer los alcances financieros que se pueden generar en comparación con las metodologías tradicionales.

REFERENCIAS

- [1] Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. (2012, Febrero 28). Boletín de prensa: Encuesta nacional de arroz mecanizado II semestre de 2012.
- [2] J. D. Martínez, T. Pineda, J. P. López, and M. Betancur, "Assessment of the rice husk lean-combustion in a bubbling fluidized bed for the production of amorphous silica-rich ash", *Energy*, vol. 36(6), pp. 3846-3854, Jun. 2011.
- [3] Y. Song, W. Qiao, S. Yoon, and I. Mochida, "Toluene adsorption on various activated carbons with different pore structures", *New Carbon Materials*, vol. 20(4), pp. 294-298, Dec. 2005.
- [4] D. Mohana, and C. U. Pittman Jr, "Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 137(2), pp. 762-811, Sep. 2006.
- [5] Y. Chen, Y. Zhu, Z. Wang, Y. Li, L. Wang, L. Ding, X. Gao, Y. Ma, and Y. Guo, "Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process-A review", *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 163(1), pp. 39-52, Mar. 2011.
- [6] G. Cacciola, G. Restuccia, and L. Mercadante, "Composites of activated carbon for refrigeration adsorption machines", *Carbon*, vol. 33(9), pp. 1205-1210, Mar. 1995.
- [7] Y. Guo, K. Yu, Z. Wang, and H. Xu, "Effects of activation conditions on preparation of porous carbon from rice husk", *Carbon*, vol. 41(8), pp. 1645-1648, Feb. 2003.
- [8] X. Liu, R. Zhang, L. Zhan, D. Long, W. Qiao, J. Yang, and L. Ling, "Impedance of carbon aerogel/activated carbon composites as electrodes of electrochemical capacitors in aprotic electrolyte", *New Carbon Materials*, vol. 22(2), pp. 153-158, Jun. 2007.
- [9] F. Adama, J. N. Appaturia, and A. Iqbal, "The utilization of rice husk silica as a catalyst: Review and recent progress", *Catalysis Today*, vol. 190(1), pp. 2-14, Aug. 2012.
- [10] H. Chao-Lung, B. L. Anh-Tuan, and C. Chun-Tsun, "Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 25(9), pp. 3768-3772, Sep. 2011.
- [11] N. Van Tuan, G. Ye, K. van Breugel, A. L. A. Fraaij, and Bui Danh Dai, "The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 25(4), pp. 2030-2035, Apr. 2011.
- [12] J. Umeda, K. Kondoh, M. Kawakami, and H. Imai, "Powder metallurgy magnesium composite with magnesium silicide in using rice husk silica particles", *Powder Technology*, vol. 189(3), pp. 399-403, Feb. 2009.
- [13] W. Panpa, and S. Jinawath, "Synthesis of ZSM-5 zeolite and silicalite from rice husk ash", *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 90(3-4), pp. 389-394, Aug. 2009.
- [14] F. Bondioli, F. Andreola, L. Barbieri, T. Manfredini, and A. M. Ferrari, "Effect of rice husk ash (RHA) in the synthesis of (Pr,Zr)SiO₄ ceramic pigment", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 27(12), pp. 3483-3488, Apr. 2007.
- [15] V. B. Carmona, R. M. Oliveira, W. T. L. Silva, L. H. C. Mattoso, and J. M. Marconcini, "Nanosilica from rice husk: Extraction and characterization", *Industrial Crops and Products*, vol. 43, pp. 291-296, May. 2013.
- [16] E. A. Basha, R. Hashim, H. B. Mahmud, and A. S. Muntohar, "Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement", *Construction and Building Materials*, vol. 19(6), pp. 448-453, Jul. 2005.
- [17] M. A. Lillo-Ródenas, D. Cazorla-Amorós, and A. Linares-Solano, "Behaviour of Activated Carbons with Different Pore Size Distributions and Surface Oxygen Groups for Benzene and Toluene Adsorption at Low Concentrations", *Carbon*, vol. 43(8), pp. 1758-1767, Jul. 2005.

- [18]D. Lozano-Castelló, M. A. Lillo-Ródenas, D. Cazorla-Amorós, and A. Linares-Solano, "Preparation of Activated Carbons from Spanish Anthracite: I. Activation by KOH", *Carbon*, vol. 39(5), pp. 741-749, Apr. 2001.
- [19]H. Benaddi, D. Legras, J. N. Rouzaud, and F. Beguin, "Influence of the atmosphere in the chemical activation of wood by phosphoric acid", *Carbon*, vol. 36(3), pp. 306-309, Jan. 1998.
- [20]Y. Li, X. Ding, Y. Guo, L. Wang, C. Rong, Y. Qu, X. Ma, and Z. Wang, "A simple and highly effective process for the preparation of activated carbons with high surface area", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 127(3), pp. 495-500, Jun. 2011.
- [21]Y. Guo, S. Yang, K. Yu, J. Zhao, Z. Wang, and H. Xu, "The preparation and mechanism studies of rice husk based porous carbon", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 74(3), pp. 320-323, Apr. 2002.
- [22]P. K. Malik, "Use of activated carbons prepared from sawdust and rice-husk for adsorption of acid dyes: a case study of Acid Yellow 36", *Dyes and Pigments*, vol. 56(3), pp. 239-249, Mar. 2003.
- [23]Y. Guo, K. Yu, Z. Wang, and H. Xu, "Effects of activation conditions on preparation of porous carbon from rice husk", *Carbon*, vol. 41(8), pp. 1645-1648, Feb. 2003.
- [24]D. Mohana, and C. U. Pittman Jr., "Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 137(2), pp. 762-811, Sep. 2006.
- [25]B. Treviño Cardona, I. Gómez de la Fuente, and V. Rodríguez Lugo, "Obtención y caracterización de carburo y nitruro de silicio a partir de cascarilla de arroz", *Revista Ingenierías-Universidad Autónoma de Nuevo León*, vol. 6(19), pp. 21-27, Jun. 2003.
- [26]M. Sarangi, P. Nayak, and T. N. Tiwari, "Effect of temperature on nano-crystalline silica and carbon composites obtained from rice-husk ash", *Composites Part B: Engineering*, vol. 42(7), pp. 1994-1998, Oct. 2011.
- [27]T. Liou, "Preparation and characterization of nano-structured silica from rice husk", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 364(1-2), pp. 313-323, Jan. 2004.
- [28]V. P. Della, I. Kühn, and D. Hotza, "Rice husk ash as an alternate source for active silica production", *Materials Letters*, vol. 57(4), pp. 818-821, Dec. 2002.
- [29]W. Xu, T. Y. Lo, and S. A. Memon, "Microstructure and reactivity of rich husk ash", *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 541-547, Apr. 2012.
- [30]Q. Lu, X. Yang, and X. Zhu, "Analysis on chemical and physical properties of bio-oil pyrolyzed from rice husk", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 82(2), pp. 191-198, Jul. 2008.
- [31]D. Li, D. Chen, and X. Zhu, "Reduction in time required for synthesis of high specific surface area silica from pyrolyzed rice husk by precipitation at low pH", *Bioresource Technology*, vol. 102(13), pp. 7001-7003, Jul. 2011.
- [32]J. Umeda, and K. Kondoh, "High-purification of amorphous silica originated from rice husks by combination of polysaccharide hydrolysis and metallic impurities removal", *Industrial Crops and Products*, vol. 32(3), pp. 539-544, Nov. 2010.
- [33]Y. Liu, Y. Guo, W. Gao, Z. Wang, Y. Ma, and Z. Wang, "Simultaneous preparation of silica and activated carbon from rice husk ash", *Journal of Cleaner Production*, vol. 32, pp. 204-209, Sep. 2012.
- [34]Y. Liu, Y. Guo, Y. Zhu, D. An, W. Gao, Z. Wang, Y. Ma, and Z. Wang, "A sustainable route for the preparation of activated carbon and silica from rice husk ash", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 186(2-3), pp. 1314-1319, Feb. 2011.
- [35]G. San Miguel, G. D. Fowler, and C. J. Sollars, "A study of the characteristics of activated carbons produced by steam and carbon dioxide activation of waste tyre rubber", *Carbon*, vol. 41(5), pp. 1009-1016, Apr. 2003.
- [36]M. Jagtoyen, M. Thwaites, J. Stencil, B. McEnaney, and F. Derbyshire, "Adsorbent carbon synthesis from coals by phosphoric acid activation", *Carbon*, vol. 30(7), pp. 1089-1096, Apr. 1992.
- [37]M. S. Solum, R. J. Pugmire, M. Jagtoyen, and F. Derbyshire, "Evolution of carbon structure in chemically activated wood", *Carbon*, vol. 33(9), pp. 1247-1254, Mar. 1995.
- [38]G. Gong, Q. Xie, Y. Zheng, S. Ye, Y. Chen, "Regulation of pore size distribution in coal-based activated carbon", *New Carbon Materials*, vol. 24(2), pp. 141-146, Jun. 2009.