



Influencia del tipo de activación en la superficie específica del carbón activado de residuo de café arábica de Chanchamayo

Influence of the type of activation on the specific surface area of the activated carbon of arabica coffee residue from Chanchamayo

Calderón, Vilma¹; Jauregui, Jhonatan²; Mallaupoma, Hilda¹

¹Facultad de Ingeniería Química,
Universidad Nacional del Centro del Perú,
Ciudad Universitaria, Huancayo, Perú

²Instituto de Investigación,
Universidad Nacional del Centro del Perú
Ciudad Universitaria, Huancayo, Perú

Cómo referenciar:

Calderón, V.; Jauregui, J.; Mallaupoma, H. (2022). Influencia del tipo activación en la superficie específica del carbón activado de residuo de café arábica de Chanchamayo. *Prospectiva Universitaria*, 19(1), 55-63.

Resumen

Es presente que en la actualidad el desarrollo del carbón activado tiene gran importancia por sus numerosas aplicaciones en las distintas industrias debido a su capacidad de adsorción, el cual depende del método de su obtención, teniendo en cuenta que para el desarrollo de la superficie específica se encontró incidencia en el control de las variables temperatura y el tiempo de calcinación, así también el tipo de biomasa con alto contenido de carbón siendo en nuestro caso los residuos como el que se obtiene después de la preparación de la bebida los que han ido en incremento considerablemente por la demanda de la bebida. Esta investigación busca identificar la metodología que proporciona mejores resultados para el incremento de la superficie específica (generación de poros superficie adsorbente), teniendo en cuenta una activación química del sustrato para lo cual se hizo uso de dos soluciones químicas una alcalina como es el caso del hidróxido de sodio y otra ácida siendo esta el ácido fosfórico. Los resultados confirman que es posible la producción de carbón activado con características aceptables, a partir del residuo del café mediante la activación química en una sola etapa de calentamiento, proceso que permite ahorrar en tiempos de operación y costos generales, obteniéndose mejores resultados en el desarrollo de superficie específica con activación ácida y a mayor temperatura de activación.

Palabras clave: superficie específica, activación química, residuo café.

Abstract

It is present that nowadays the development of activated carbon has great importance due to its numerous applications in different industries due to its adsorption capacity, which depends on the method of obtaining it, taking into account that for the development of the specific surface area it was found incidence in the control of the variables temperature and calcination time, as well as the type of biomass with high carbon content being in our case the residues as the one obtained after the preparation of the beverage which have been increasing considerably by the demand of the beverage. This research seeks to identify the methodology that provides better results for

the increase of the specific surface (generation of pores adsorbent surface), taking into account a chemical activation of the substrate for which two chemical solutions were used, one alkaline as is the case of sodium hydroxide and the other acidic being phosphoric acid. The results confirm that it is possible to produce activated carbon with acceptable characteristics from coffee residue by means of chemical activation in a single heating stage, a process that allows savings in operating time and general costs, obtaining better results in the development of specific surface with acid activation and at a higher activation temperature.

Keywords: specific surface, chemical activation, coffee residue.

1 Introducción

Los métodos más usados para la producción de carbón activado a partir de biomasa y otros materiales son la activación química y la activación física. En la activación química, el material se impregna con diferentes sustancias, tales como $ZnCl_2$, H_3PO_4 , KOH , K_2CO_3 , lo que promueven reacciones de deshidratación y oxidación para posteriormente carbonizarlo a temperaturas entre $400^\circ C$ y $900^\circ C$ (Moreno, 2012).

La química superficial del carbón activado por lo general es hidrófoba debido a la naturaleza de las láminas grafémicas caracterizadas por interacciones intermoleculares de tipo Van der Waals, a pesar de esto, la presencia de grupos superficiales oxigenados otorga características hidrofílicas a la superficie.

Esta investigación pretende determinar si el tipo de activación química, la que por antecedentes alcanza mayor superficie específica en los carbones activos tiene la misma influencia en el sustrato a partir del residuo de café, así también se busca identificar dentro las soluciones activantes la que presente mejores respuestas en el desarrollo de la superficie específica, teniendo en cuenta que estas van a diferir por el Potencial de Hidrógeno siendo estas una sustancia de activación básica y la otra ácida, teniendo en cuenta que en la superficie del carbón activado se presenta un intercambio iónico de los grupos ácidos al liberar protones, especialmente en medio básico, y de los grupos básicos que tienden a captarlos cuando se encuentran en un medio ácido, lo que genera neta cargas positivas o negativas en la superficie del carbón; pues, las condiciones en las que un carbón activado tiene una carga neta negativa serán preferibles para adsorber cationes, y aquellas en las que presente una carga neta positiva lo serán para adsorber aniones.

Se estima la diferencia en la cantidad adsorbida de los iones, comparando los resultados obtenidos en las dos condiciones a partir de las soluciones, así también se identificará las condiciones del proceso térmico que tenga mayor influencia en el desarrollo de la superficie específica como el tiempo y de la temperatura de calcinación teniendo en cuenta los antecedentes para la obtención del carbón activado. Se establece realizar la activación en una sola etapa como una posible alternativa para la reducción de costos (Savova et al., 2001).

2 Materiales y Métodos

Se preparó el carbón activado mediante activación química en una sola etapa de calentamiento, usando como precursor el residuo de café arábica de Chanchamayo. La materia prima fue recolectada y seleccionada apropiadamente, inicialmente se le realizó análisis granulométrico para conocer su distribución inicial de tamaños de partícula mediante los tamices de n° de malla (6, 10 y 14) de 3.35 mm; 2.00 mm y 1.41 mm respectivamente. Para el análisis próximo y elemental que nos permite conocer a detalle las características del material como humedad, materia volátil, entre otras, se seleccionó una muestra representativa del residuo de café Arábica de Chanchamayo con el tamaño de partícula de 2 mm, se lavó con agua destilada para eliminar las impurezas y color residual, para luego secar la muestra con flujo de aire acondicionada y analizada para su posterior activación, teniendo en cuenta las activaciones de tipo químico se preparó las soluciones, $NaOH$ (hidróxido de sodio) y H_2PO_4 (Acido fosfórico). La concentración se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (1)$$

Donde C_1 es la concentración del C_3PO_4 en porcentaje, V_1 es el volumen que se sacó del frasco de 85% en mL, C_2 es la concentración que se halló en porcentaje y V_2 es el volumen que se preparó en mL.

Para la preparación de 100 mL de H_3PO_4 al 40% se tuvo: $85\%V_1 = 40\%(0.1L)$, entonces $V_1 = 0.0470L = 47.06mL$

Se transfirió a una fiola aforándola a 100 mL con agua destilada, del mismo modo se preparó la solución del hidróxido de sodio.

Los equipos principales requeridos en las operaciones unitarias fueron el Espectrofotómetro (Spectroquant Memmert BE300) para todas las mediciones en el rango UV/VIS, se trabajó a una longitud de onda de 662 nm, Mufla (Industrias Terrígeno D-8) que alcanza hasta una temperatura máxima de $1200^\circ C$ y materiales de vidrio. Cabe precisar que para el lavado de la materia se utilizó agua destilada.

2.1 Calcinación o carbonización

Se colocó la muestra en crisoles de porcelana y se colocó en una mufla a temperatura de $700^\circ C$, Una vez que se alcanzó la temperatura de activación, se mantuvo constante durante 1 y 2 horas, tener en cuenta que el tiempo va a ser considerado a partir de que alcance dicha temperatura pasado el tiempo respectivo se dejó enfriar la muestra durante 24 horas se almaceno en bolsas plásticas herméticas para evitar la captación de la humedad para su posterior uso. De igual forma se procede con la temperatura de $900^\circ C$.

2.2 Activación del sustrato

La activación con NaOH genera productos con distribuciones de tamaño de partícula similares, para todos los tratamientos el 80% del material tiene un tamaño de partícula superior a 0.73mm aproximadamente, excepto para las condiciones de $900^\circ C - 2h$ en donde el 80% del material tiene un tamaño superior a 0.64mm aproximadamente. A las condiciones extremas el material obtenido es más pequeño, debido a que las reacciones de activación se ven favorecidas por

las altas temperaturas y el tiempo prolongado de reacción. Un comportamiento parecido se observó para la activación con H_2PO_4 en donde el aumento en la temperatura y en el tiempo de reacción benefició la producción de materiales con tamaños de partícula más pequeños. Para $900^\circ C$, el 80% del carbón producido a 1h y 2h tuvo un tamaño mayor a 0.70mm y 0.59mm respectivamente. Para los tratamientos restantes el comportamiento observado fue similar entre sí, obteniéndose el 80% del producto con tamaño superior a 0.80mm. Considerando el tamaño inicial del material que se encontraba entre 0.8mm y 2mm, la mayor reducción se encontró a $900^\circ C$ y 2h (0.59mm). El carbón activado obtenido fue caracterizado según análisis granulométrico, rendimiento y área superficial específica.

2.3 Adsorción de azul de metileno

Las isothermas de adsorción de azul de metileno se determinaron experimentalmente por lotes, sin agitación, a temperatura ambiente ($25^\circ C$), el tiempo de contacto fue el necesario para alcanzar las condiciones de equilibrio (cuando no se evidencia variación considerable en la concentración de la solución) y el diámetro de partícula del carbón activado usado fue el mismo para todos los tratamientos 0.5-0.85mm (pasante malla ASTM 20, retenido malla ASTM 35) . Para cada uno de los 20 carbones preparados se realizaron isothermas con 6 puntos, en donde cada punto representa una relación inicial adsorbato/adsorbente diferente.

Las relaciones apropiadas para cada carbón se definieron mediante pruebas preliminares de adsorción, para los carbones preparados con NaOH se usaron 6 relaciones mg azul de metileno/ mg carbón entre 0.02 y 0.24. Para el caso particular del carbón obtenido a $900^\circ C$, 2h se usaron relaciones entre 0.16 y 0.48 las cuales son más altas por que a relaciones más bajas se da una remoción completa del colorante. Cuando el material fue activado con H_2PO_4 se emplearon 06 relaciones mg azul de metileno/mg carbón entre 0.05 y 0.6. En los casos de $900^\circ C$, 1h y 2h se utilizaron relaciones entre 0.16 y 0.75. Las soluciones a varias concentraciones se prepararon a partir de una solución madre de 1000 ppm, tomado la alícuota necesaria según

la ecuación 1.

El área superficial específica aproximada de cada carbón activado obtenido experimentalmente se calculó mediante la ecuación:

$$S = qmN_aAM \quad (2)$$

Donde: N_a es el número de Avogadro, A es el área proyectada de una molécula de adsorbato sobre una superficie plana y M es el peso molecular del adsorbato

Para el estudio, el área transversal de la molécula de azul de metileno usada fue de 120 \AA^2 , valor que ha sido utilizado por varios investigadores como Brina y De Battisti (1987) para estimar áreas superficiales específicas de materiales porosos.

El rendimiento del carbón activado θ (% peso) se calculó por medio de la siguiente ecuación..

$$\theta = 100 \frac{w_f}{w_0} \quad (3)$$

Donde w_0 es la masa inicial del material y w_f es la masa de la muestra después de la activación.

La carga máxima de azul de metileno se define como la cantidad máxima de azul de metileno (mg) que adsorbe 1 gramo de adsorbente, este valor se calcula con los datos de la cantidad de azul de metileno que se adsorbió a partir de cada solución utilizando la ecuación:

$$q = \frac{C_0 - C_e}{mCA} V \quad (4)$$

Donde C_0 (mg/L) es la concentración inicial de la solución, C_e (mg/L) es la concentración de la solución en el equilibrio, V (L) es el volumen de la solución tratada, y mCA (g) es la masa del adsorbente.

2.4 Diseño Experimental

Los factores involucrados en la producción de carbón activado físicamente en una sola etapa considerados en este estudio son la temperatura de activación (T_a), el tiempo de activación (t_a) y el tipo de gas se implementó un diseño factorial 2^3 ya que este diseño permite observar y analizar los efectos de los factores involucrados, sus interacciones y encontrar las condiciones favorables para el proceso 2^3 , Dado que se trabajó en dos

niveles (inferior y superior) para cada una de las 3 variables independientes.

Tabla 1

Matriz de Factores y Niveles Normalizados

Factor		Inferior	Superior
NaOH	A Tiempo (h)	1	2
	B Temperatura (°C)	700	900
NaPO ₄	A Tiempo (h)	1	2
	B Temperatura (°C)	700	900

La tabla 1 muestra los factores y niveles examinados en este estudio, este diseño cuenta con dos puntos centrales (debido a que uno de los factores es una variable discreta) los cuales se utilizan para estimar el error experimental y la capacidad de duplicación de los datos (Hameed et al., 2008).

2.5 Proceso de adsorción

La teoría de Dubinin-Radushkevich es aplicada generalmente para determinar el mecanismo por el cual la adsorción tiene lugar usando la energía libre de adsorción media E (Deniz, 2014), la cual está dada por

$$E = \sqrt{\frac{1}{2k_a}} \quad (5)$$

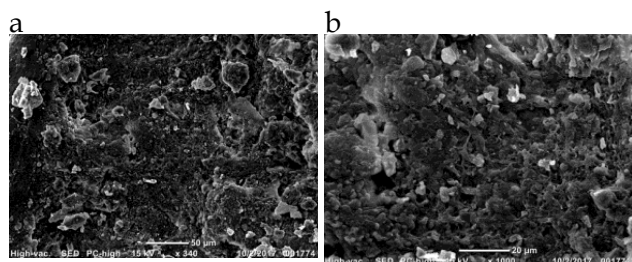
La ecuación determina la energía libre de adsorción desde una distancia infinita de la solución hasta la superficie del sólido. Para un valor de E por debajo de 8 KJ/mol , el proceso de adsorción se da de manera física, mientras que un valor entre 8 y 16 KJ/mol indica que el proceso de adsorción se da de manera química (2014).

3 Resultados

Los resultados en cuanto a la caracterización de las propiedades texturales, porosas y físico-químicas de los carbones activados y consecutivamente, se analiza la influencia de las condiciones de activación sobre las propiedades texturales, porosas, superficiales y el rendimiento de los procesos de activación.

Figura 1

Micrografías SEM del Residuo de Café



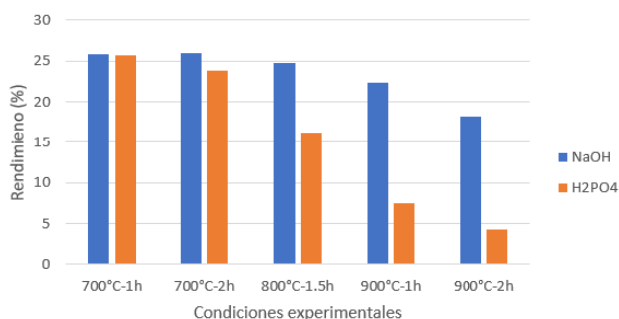
Nota. Panel A = x340, Panel B = x1000

3.1 Rendimiento

El rendimiento de la producción de carbón activado se calculó según la ecuación 3 y se definió como la relación entre el peso de la muestra después de la activación y el peso del residuo de café. El efecto de las condiciones experimentales del proceso de activación química en una sola etapa sobre el rendimiento del carbón activado se muestra en la figura.

Figura 2

Rendimiento Promedio de los Carbones Activados



En la figura 2 se observa que el H₂PO₄ produce un menor rendimiento de carbón activado que el NaOH en todas las condiciones experimentales. Las diferencias de rendimiento producidas por los dos gases activantes se hacen más pronunciadas con el aumento de la temperatura y el tiempo de activación, debido principalmente a los efectos combinados de liberación de volátiles y la pérdida de carbono fijo.

Para los carbones activados producidos con NaOH se obtuvieron rendimientos del 26.7% para las condiciones experimentales más livianas y 18.7% para las condiciones más severas, los cuales se traducen en una liberación de materia volátil y

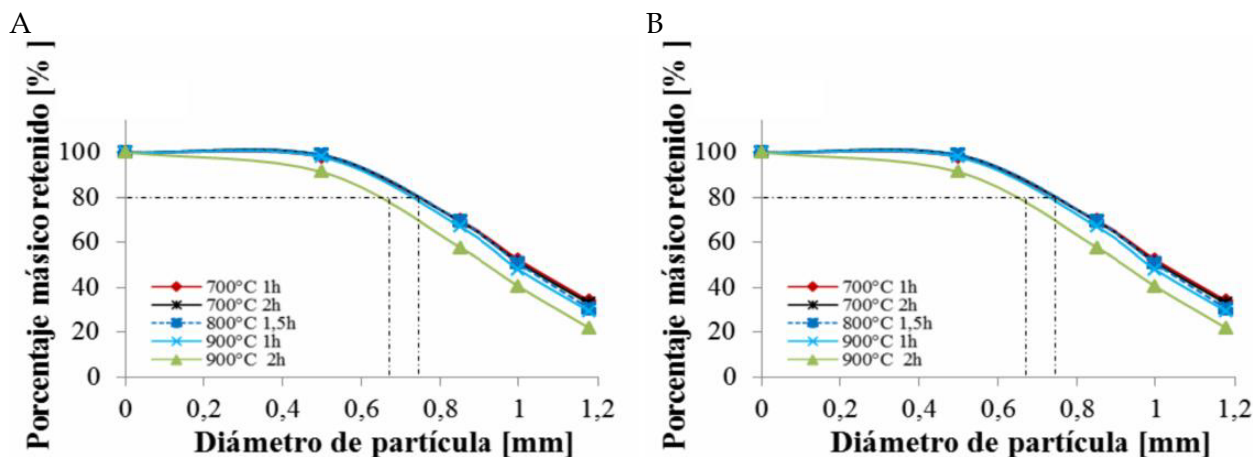
humedad del 89.5% para las condiciones más livianas y del 99.2% para las más severas. Dado lo anterior, los carbones activados producidos con NaOH no presentaron pérdida de carbono fijo (El peso combinado de los contenidos de carbono fijo y cenizas del residuo de café es del 18.08%, Para los carbones activados producidos con H₂PO₄ se obtuvieron rendimientos del 24.8% para las condiciones experimentales más livianas y 4.0% para las condiciones severas, las cuales se traducen en una liberación de materia volátil y humedad del 91.8% para las condiciones más livianas y del 100% para las condiciones más severas. A diferencia de los rendimientos obtenidos con NaOH, la activación física con H₂PO₄ si produjo pérdida de carbono fijo, posiblemente por las diferencias en las entalpías de reacción Dado que la reacción con H₂PO₄ posee una entalpia reacción menor a la del NaOH, esta reacción empieza a darse a una menor temperatura y se ve favorecida a temperaturas altas debido al carácter endotérmico de las reacciones de activación. A 900°C, las pérdidas de carbono fijo para 1h fueron del 56.7% y para 2h del 92.6%, mostrando un efecto importante del tiempo de activación a temperaturas altas como se determinará más adelante.

3.2 Análisis granulométrico

La figura 3 evidencia que para ambas atmósferas activantes, la disminución del tamaño de partícula se hace más notoria a temperaturas elevadas (900°C), este comportamiento es similar a los encontrados por (Gómez, 2010). Según (Levenspiel, 2004) la disminución del tamaño de partícula es común cuando las reacciones sólido-liquido, se dan con materiales carbonosos que tienen bajo contenido de cenizas. La activación con NaOH genera productos con distribuciones de tamaño de partícula similares, para todos los tratamientos el 80% del material tiene un tamaño de partícula superior a 0.73mm aproximadamente, excepto para las condiciones de 900°C - 2h en donde el 80% del material tiene un tamaño superior a 0.64mm aproximadamente A las condiciones extremas el material obtenido es más pequeño, debido a que las reacciones de activación se ven favorecidas por las altas temperaturas y el tiempo prolongado de reacción. Un comportamiento parecido se

Figura 3

Análisis granulométrico para los carbones activados



Nota. Panel A: Análisis granulométrico de carbones activados con H_2PO_3 ; se muestran las cinco curvas donde se consideró la variación de temperatura y tiempo de calcinación. Panel B: Análisis granulométrico de carbones activados con $NaOH_3$; se muestran las cinco curvas donde se consideró la variación de temperatura y tiempo de calcinación.

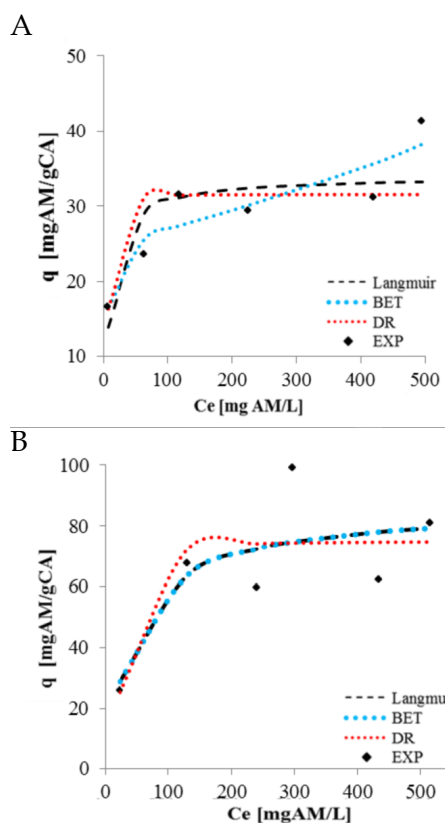
observó para la activación con H_2PO_4 en donde el aumento en la temperatura y en el tiempo de reacción benefició la producción de materiales con tamaños de partícula más pequeños. Para $900^\circ C$, el 80% del carbón producido a 1h y 2h tuvo un tamaño mayor a 0.70mm y 0.59mm respectivamente. Para los tratamientos restantes el comportamiento observado fue similar entre sí, obteniéndose el 80% del producto con tamaño superior a 0.80mm. Considerando el tamaño inicial del material que se encontraba entre 0.8mm y 2mm, la mayor reducción se encontró a $900^\circ C$ y 2h (0.59mm).

3.3 Isotermas de adsorción de azul de metileno

A partir de los datos experimentales obtenidos para cada tratamiento (con su respectiva replica) se realizaron isotermas de adsorción de azul de metileno, las cuales fueron ajustadas mediante regresiones no lineales a los modelos de isotermas de Langmuir, BET, DR.

Figura 4

Isotermas de adsorción de azul de metileno de carbones activados



Nota. Panel A: carbones activados a $700^\circ C$ y 1h con $NaOH$. Panel B: carbones activados a $700^\circ C$ y 1h con H_2PO_4 .

La cantidad de colorante adsorbido sobre el carbón activado esta expresado por q [mgAM/gCA], este parámetro según la figura 4 toma valores experimentales más altos para el caso de la activación con H_2PO_4 , variando desde 25 hasta 100 mg/g aproximadamente, lo anterior sugiere mayor superficie del material cubierta por el adsorbato. La forma de las isothermas según la clasificación propuesta por Giles et al. (1960) es tipo L, la cual insinúa que a medida que se va realizando la adsorción, es más difícil para el adsorbato encontrar sitios disponibles, lo que implica que la adsorción de las moléculas no necesariamente se da verticalmente. Por otro lado sugiere que este tipo de isothermas puede ocurrir cuando existe una atracción considerablemente alta entre el adsorbato y el adsorbente.

La carga máxima de azul de metileno es un parámetro que se vio altamente influenciado por el cambio de solución activante, ya que a las mismas condiciones de temperatura y tiempo se reportaron valores muy diferentes. Según la isoterma BET el valor promedio encontrado para la carga máxima de azul de metileno fue de 93 mgAM/gCA para la activación con H_2PO_4 , este valor conjunto con el menor rendimiento máximo a las mismas condiciones de temperatura y tiempo, insinúa que la activación con H_2PO_4 generó una mayor estructura porosa que la activación con NaOH, para la cual se obtuvo una carga máxima promedio de 30.87 mgAM/gCA.

Proceso de adsorción Según la teoría de Dubinin-Raduskevich para un valor de ΔH por debajo de 8 KJ/mol el proceso de adsorción se da de manera física, por lo tanto, se puede sugerir que todas las adsorciones se realizaron por este método. En consecuencia, el azul de metileno mantuvo su identidad durante todo el proceso, ya que no formó enlaces con el carbón activado. Además, se puede inferir que la adsorción se efectuó en multicapas (como lo contempla el modelo BET) y por interacciones débiles entre el colorante y el carbón activado (posiblemente fuerzas de van der Waals, London o dipolo-dipolo). Por lo anterior, el proceso de saturación del carbón activado con azul de metileno se considera un proceso reversible y poco selectivo. Según los datos observados el mejor ajuste a los datos experimentales fue encontrado con el modelo de isoterma BET, obteniendo para

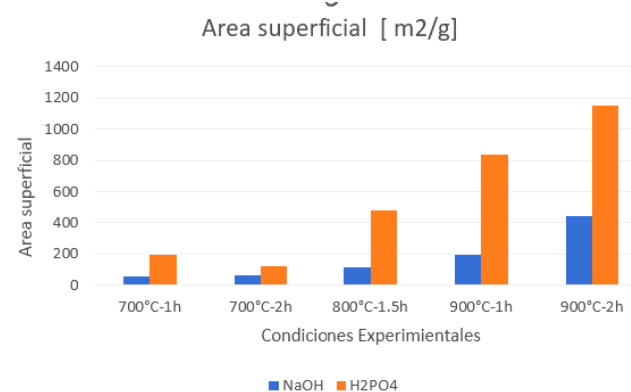
los carbones preparados con NaOH $R^2 = 0.96$ para la prueba. Para los carbones activados preparados con H_2PO_4 , los factores de determinación fueron $R^2 = 0.97$ para la prueba. Los valores encontrados para el factor de determinación son los más altos reportados hasta el momento.

En el proceso de activación química a diferencia del proceso de activación física o térmica, el material precursor en primera instancia es mezclado con agentes activantes. Los agentes químicos alteran el curso normal del proceso de carbonización, debido a su efecto deshidratante y/o oxidante que disminuye la formación de alquitranes, implicando un mayor rendimiento en el carbonizado y un mejoramiento del control y desarrollo de la estructura porosa del material.

3.4 Área superficial

En función de las condiciones experimentales estudiadas. En la Figura 7 se observa que el H_2PO_4 produce una mayor área superficial aproximada que el NaOH en todas las condiciones experimentales. Las diferencias de área superficial se evidencian, al incremento de temperatura, (Gómez, 2010) un aumento de la temperatura de activación se traduce en un aumento de la transferencia de calor desde el seno la solución activante hasta el centro del residuo de café propiciando a su vez el aumento de la transferencia de masa del entre las moléculas de la solución activante y los átomos de carbono facilitando las reacciones de activación.

Figura 5
Área Superficial Específica Promedio de los Carbones Activados



Con la información obtenida de las isothermas de adsorción de azul de metileno, se determinó el área superficial específica de los carbones activados producidos por activación física en una sola etapa. Los resultados para cada tratamiento se incluyen en la tabla 2 en función de las condiciones experimentales.

Tabla 2
Resultados por Tratamiento

Solución Activada	T (°C)	Tiempo (h)	Rendimiento	Superficie
NaOH	700	1	25.82	59.12
		2	26.02	62.57
	800	1.5	24.76	113.97
		900	1	22.35
			2	18.2
	H ₂ PO ₄	700	1	25.7
2			23.8	122.3
800		1.5	16.2	479.09
		900	1	7.5
			2	4.3

Los efectos de la temperatura de activación, tiempo de activación y tipo de activante, así como sus interacciones sobre el rendimiento de carbón activado, fueron evaluados realizando un análisis de varianza (ANOVA) al diseño de experimentos.

Para estudiar el efecto de las condiciones de preparación de los carbones activados y sus interacciones en el área superficial específica desarrollada, se realizó un análisis de varianza al diseño experimental con los respectivos valores hallados para esta variable de respuesta. El ANOVA obtenido para el área superficial específica del carbón activado se presenta en la Tabla 3.

3.5 Análisis del diseño experimental

La matriz del diseño experimental y los valores obtenidos para las variables de respuesta (rendimiento y área superficial específica estimada por la adsorción de azul de metileno) se muestran en la Tabla 3.

A través de la metodología de superficie de respuesta se obtiene que las condiciones de operación que maximizan el rendimiento del carbón activado son: temperatura de activación 700°C, tiempo de activación 1h y solución activante NaOH. La ecuación del modelo de regresión ajustado para el rendimiento de carbón activado es:

El estadístico R^2 (coeficiente de determinación) indica que el modelo de regresión obtenido para el rendimiento del carbón activado obtenido con la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento}[\%] = & 50.512 - (3.333 \times 10^{-2})A + \\ & (10.445)B + (17.178)C - \\ & (1.65 \times 10^{-2})AB - (2.49 \times 10^{-2})AC + \\ & (0.75)BC - (1.98 \times 10^{-3})ABC \end{aligned} \quad (6)$$

La ecuación 6 explica el 97.92% de su variabilidad, lo cual propone que el modelo de regresión predijo de manera satisfactoria los valores experimentales para el rendimiento en todos los tratamientos ejecutados. Lo anterior puede ser observado usando una gráfica de los datos experimentales versus los datos predichos por el modelo de regresión

Tabla 3
ANOVA del diseño experimental 2³ del estudio

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Valor-p
A: Temperatura de activación	540.56	1	540.56	0.000
B: Tiempo de activación	30.80	1	30.80	0.002
C: Tipo de activante	318.40	1	318.40	0.000
AB	10.92	1	10.92	0.039
AC	124.32	1	124.32	0.000
BC	2.72	1	2.72	0.267
ABC	0.16	1	0.16	0.785
Bloques	0.92	1	0.92	0.510
Error total	21.88	11	1.99	
Total (corr.)	1050.70	19		

4 Discusión

Los resultados de esta investigación confirman que es posible la producción de carbón activado con características aceptables, a partir de los residuos de café arábica de Chanchamayo mediante la activación Química en una sola etapa de calentamiento, proceso que permite ahorrar en tiempos de operación y costos generales, en comparación al proceso convencional de activación en dos etapas.

Se realizaron isothermas de adsorción de azul de metileno las cuales se ajustaron mejor al modelo BET y permitieron estimar el área superficial

específica de los carbones activados obtenidos. Al comparar con algunos carbones activados comerciales del mismo tamaño granulométrico, los carbones activados obtenidos con ácido fosfórico y temperatura de activación mayor a 800°C presentaron mejores características respecto al área superficial específica y número de azul de metileno.

Así también, la energía de adsorción media calculada usando el modelo de isoterma de Dubinin-Raduskevich permitió determinar que la adsorción de azul de metileno posiblemente se dio de manera física, proceso que es poco selectivo y reversible.

A través del análisis de varianza (ANOVA) del modelo experimental ²³ propuesto en este estudio se determinó que la temperatura de activación y el tipo de solución activante, así como su sinergismo fueron las variables más influyentes sobre el rendimiento y área superficial específica de los carbones activados obtenidos. A temperaturas de activación altas (900°C), las reacciones de activación y los procesos de transferencia de masa y calor se vieron favorecidos; el tamaño de la molécula y la reactividad del ácido influyeron positivamente en el área superficial y negativamente en el rendimiento del carbón activado.

Con respecto al tiempo de activación, este produjo efectos considerables en el rendimiento del carbón activado. A temperaturas altas (900°C), el tiempo influyó significativamente en el área superficial cuando la activación fue con NaOH (ob-

teniéndose el doble de área superficial a 2h con respecto a 1h); con vapor de agua el tiempo no fue significativo ya que a 900°C-2h la pérdida de carbono fijo fue tan grande (92.6%), que posiblemente se produjo un colapso de la estructura porosa definida a tiempos menores.

Referencias

- Brina, R., & De Battisti, A. (1987). Determination of the Specific Surface Area of Solids by Means of Adsorption Data. *Journal of Chemical Education*, 64(2), 175. <https://doi.org/10.1021/ed064p175>
- Deniz, F. (2014). Optimization of Biosorptive Removal of Dye from Aqueous System by Cone Shell of Calabrian Pine. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2014/138986>
- Hameed, B., Tan, I., & Ahmad, A. (2008). Optimization of basic dye removal by oil palm fibre-based activated carbon using response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2-3), 324-332. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.088>
- Savova, D., Apak, E., Ekinci, E., Yardim, F., Petrov, N., Budinova, T., Razvigorova, M., & Minkova, V. (2001). Biomass conversion to carbon adsorbents and gas. *Biomass and Bioenergy*, 21(2), 133-142. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00027-7)