

Capacidad de remoción de plomo (II) en aguas industriales por carbón activado obtenido de residuos textiles

Lead (II) removal capacity in industrial waters by activated carbon obtained from textile waste

Karla V. Sabino-Montero

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Maracaibo, Venezuela.

 <https://orcid.org/0009-0002-5853-4550> | Correo electrónico: karlavsm6@gmail.com

María G. Urdaneta-Tulli

empresa

 <https://orcid.org/0009-0001-2051-7395> | Correo electrónico: mariurdanetatulli@gmail.com

Douglas Linares-Moya

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Maracaibo, Venezuela

 <https://orcid.org/0000-0002-0337-0715> | Correo electrónico: douglas.linares.moya@gmail.com

Recibido: 15-04-2024 Admitido: 29-04-2024 Aceptado: 30-05-2024

Resumen

La investigación realizada tuvo como objetivo general la determinación de la capacidad de remoción de plomo (II) en aguas industriales textiles sintéticas por acción de dos carbones activados obtenidos a partir de residuos textiles. Para ello, se llevó a cabo su obtención a partir de tela de Fanela Tubular (CA 1) y tela Cottone (CA 2), con una composición del 70 % y 93 % de algodón respectivamente, luego, se caracterizaron los carbones activados para determinar sus propiedades fisicoquímicas, las cuales fueron comparadas con el carbón activado comercial tomado como referencia, y por último, se determinaron los porcentajes de remoción de Pb (II) en aguas industriales textiles sintéticas con concentraciones iniciales de 400, 600, 800 y 1000 mg/L. Se registraron rendimientos de 15,46 % para el CA 1, y de 21,90 % para el CA 2. Los valores obtenidos de porcentaje de humedad, cenizas, material volátil, densidad aparente y área superficial, resultaron ser de 11,31 %, 43,16 %, 61,37 %, 0,284±0,023 g/mL y 945,667±70,685 m²/g, para el CA 1; de 11,43 %, 39,90 %, 64,62 %, 0,549±0,007 g/mL y 1290,000±130,000 m²/g para el CA 2; y de 23,12 %, 34,76 %, 55,42 %, 0,500±0,005 g/mL y 1570,000±95,394 m²/g para el CA Comercial, respectivamente, observando que el CA 2 presentó mejores resultados de cenizas, material volátil y área superficial. Por último, se registraron resultados de porcentaje de remoción de Pb (II) de 13,90 %, 11,82 %, 11,49 % y 10,70 % para el CA 1, 20,46 %, 18,74 %, 18,02 % y 17,82 % para el CA 2, y 36,91 %, 34,49 %, 33,52 % y 32,50 % para el CA Comercial, respectivamente para las concentraciones iniciales mencionadas, obteniendo que el CA 2 presentó mayor eficiencia de remoción entre los dos carbones activados obtenidos.

Palabras clave: carbón activado, remoción, caracterización, Fanela Tubular, Cottone

Abstract

The general objective of the research was to determine the removal capacity of lead (II) in synthetic textile industrial waters by the action of two activated carbons obtained from textile waste. It was obtained from Tubular Flannel fabric (CA 1) and Cottone fabric (CA 2), with a composition of 70 % and 93 % cotton respectively, then the activated carbons were characterized to determine its physicochemical properties, which were compared with the commercial activated carbon taken as a reference, and finally, the removal percentages of Pb (II) in synthetic textile industrial waters with initial concentrations of 400, 600, 800 and 1000 mg/L were determined. Yields of 15,46 % were recorded for CA 1, and 21,90 % for CA 2. The values obtained for the percentage of humidity, ash, volatile material, apparent density and surface area, were 11,31 %, 43,16 %, 61,37 %, 0,284±0,023 g/mL and 945,667±70,685 m²/g for CA 1; 11,43 %, 39,90 %, 64,62 %, 0,549±0,007 g/mL and 1290,000±130,000 m²/g for CA 2; and 23,12 %, 34,76 %, 55,42 %, 0,500±0,005 g/mL and 1570,000±95,394 m²/g for CA Commercial, respectively, observing that CA 2 presented better results of ash, volatile material and surface area. Finally, removal results of Pb (II) percentages of 13,90 %, 11,82 %, 11,49 % and 10,70 % for CA 1, 20,46 %, 18,74 %, 18,02 % and 17,82 % for CA 2, and 36,91 %, 34,49 %, 33,52 % and 32,50 % for CA Commercial, respectively for the initial concentrations mentioned, obtaining that CA 2 presented higher efficiency of removal between the two activated carbons obtained.

0,500±0,005 g/mL and 1570,000±95,394 m²/g for Commercial CA, respectively. CA 2 presented better results for ashes, volatile material and surface area. Finally, Pb (II) removal percentage results of 13,90 %, 11,82 %, 11,49 % and 10,70 % were recorded for CA 1, 20,46 %, 18,74 %, 18,02 % and 17,82 % for CA 2, and 36,91 %, 34,49 %, 33,52 % and 32,50 % for Commercial CA, respectively for the initial concentrations mentioned, obtaining that CA 2 presented a greater removal efficiency between the two activated carbons obtained.

Keywords: activated carbon, removal, characterization, Tubular Flannel, Cottone

Introducción

A nivel mundial, el sector de las industrias textiles representa una problemática que se ha visto incrementada con el paso de los años, debido a los efluentes que dichas industrias generan, los cuales contienen una gran cantidad de colorantes y metales pesados que son utilizados en los procesos. Dichos efluentes reciben un tratamiento deficiente, o incluso, no cuentan con el debido tratamiento, por la gran cantidad de recursos que se necesitan [1]. Algunos de los metales pesados que se encuentran en mayor proporción son el plomo (Pb) y el níquel (Ni), los cuales, al ser descargados en los cuerpos de agua, pueden generar graves consecuencias al ser humano, y al ecosistema en general.

De igual modo, otra problemática a nivel mundial consiste en el incremento de los residuos textiles generados, ya que el 90 % de éstos contribuye a la contaminación de océanos, suelos y aire, debido a que son sometidos a tratamientos de pirólisis y combustión, provocando la contaminación del aire [2]. La elevada generación de residuos textiles ha incrementado con el paso de los años, tanto en países europeos como latinoamericanos, lo que implica el aumento de la contaminación ambiental generada por éstos. El carbón activado presenta diversas aplicaciones ambientales, destacando la adsorción de iones metálicos de plomo [3]. Por ello, ante la problemática expuesta, se han desarrollado estudios basados en la obtención de carbones activados a partir de residuos, y su empleo en el tratamiento de efluentes industriales, disminuyendo de esta forma los costos de producción y generando nuevas alternativas para el reciclaje de dichos residuos [4].

Con base en la problemática planteada, la presente investigación propone la obtención de carbón activado a partir de residuos textiles para remover iones de plomo (II) en aguas industriales, contribuyendo de este modo a la reducción de contaminantes en dichos efluentes, y disminuyendo su impacto al ambiente, lo que favorece el reciclaje de estos residuos y los convierte en una alternativa para el tratamiento de las aguas industriales provenientes del sector textil. De igual forma, las telas basadas en fibras vegetales constituyen materiales candidatos para la producción de carbón activado, debido a las propiedades que les confiere la celulosa. A partir de lo expuesto se puede afirmar que la tela de Franela Tubular y la tela Cottone, con porcentajes de algodón del 70 y 93 % respectivamente, resultan aptas como materiales precursores para la producción de carbón activado. En el estudio publicado por Sánchez [5] se evaluaron las propiedades adsorbentes del carbón activado obtenido a partir de residuos de telas de algodón, obteniendo que, para el carbón activado elaborado a partir de tela de 100 % de algodón, se obtuvo una mayor eficiencia de remoción, del 85,5 %; mientras que en el estudio realizado por Rodríguez *et al.* [6], se estudió la obtención de telas de carbón activado a partir de tela de 100 % algodón, con un rendimiento del 21 %.

Con base a esto, el presente estudio tiene como objetivo determinar la capacidad de remoción de plomo (II) de los carbones activados generados a partir de residuos textiles en aguas industriales, lo cual se llevó a cabo mediante su obtención a partir de telas basadas en fibras vegetales, por activación química, la determinación de sus propiedades fisicoquímicas por medio de su caracterización y, por último, su uso en la remoción de iones de Pb (II) en aguas industriales textiles sintéticas.

Materiales y Métodos

La presente investigación es de tipo correlacional, analítica y descriptiva, con un nivel aprehensivo y un diseño experimental, ya que se manipularon las variables en un laboratorio; transeccional correlacional-causal, debido a que se estudia la relación entre la concentración inicial y la remoción; y cuantitativo, por haber obtenido resultados numéricos. Se trabajó con dos unidades de análisis, el carbón activado y el efluente textil

sintético. De esa manera, para cumplir con el objetivo planteado, se ejecutaron las fases correspondientes al procedimiento experimental descrito a continuación:

Fase I. Obtención del carbón activado

Para la obtención del carbón activado se tomaron en cuenta dos tipos de tela basadas en fibras vegetales, bajo las denominaciones de Franela Tubular, cuya composición es de 70 % algodón y 30 % poliéster, y Cottone, con 93 % de algodón y 7 % de elastano [7, 8].

Actividad I. Preparación del material precursor

Se procedió a recortar las telas adquiridas en trozos correspondientes a un tamaño de 5 cm de cada lado, de forma aproximada.

Actividad II. Activación química

Para la activación química empleando como agente activador el $H_3PO_4/FeCl_3$, se empleó la metodología modificada por Sánchez (2017) [5]. En primer lugar, se impregnaron las telas de algodón con H_3PO_4 al 70 % en volumen durante 24 h, utilizando una relación de volumen de agente activante y masa del material precursor de 5:2. Posterior a ello, se pre-carbonizaron las telas en una estufa a 85 °C durante 24 h, y luego, se carbonizaron en la mufla a 456 °C durante 2 horas aproximadamente, hasta que se presenciara la reducción de vapor emitido durante el calentamiento. En este paso no se utilizó la atmósfera inerte de argón, debido a la carencia del equipo necesario, por lo que se emplearon los crisoles con sus respectivas cubiertas para la disminución de la entrada de aire.

Luego, se trituraron los carbones activados con el empleo de un mortero, y se lavaron con HCl al 10 % en peso, NaOH al 1 % en peso, y agua destilada, hasta alcanzar un pH neutro, el cual fue determinado a través de una cinta indicadora de pH. Posterior a ello, se secaron los carbones activados en una estufa a 100 °C por 24 h, y se tamizaron con un tipo de tela en forma de malla, bajo la denominación de Organza.

En seguimiento al proceso, se adicionó el agente activante $FeCl_3$ con concentración de 0,56 M, a una relación de 10:3 de volumen de tricloruro de hierro y masa de carbón activado, en condiciones de vacío. Luego, se agitó durante 15 minutos sobre una plancha de calentamiento, en conjunto a un agitador magnético, y se dejaron en reposo por 48 horas. Fueron sometidos a condiciones de 110 °C por 6,8 h, para luego ser lavados con agua destilada y sometidos a condiciones de 110 °C por 6.8 h en la estufa. Por último, se almacenaron en un desecador.

Fase II. Rendimiento

La estimación del rendimiento de los dos carbones activados obtenidos fue calculada utilizando la Ecuación 1, la cual fue tomada del estudio realizado por Vanegas [4].

$$\%Rendimiento = \frac{Masa\ del\ CA\ resultante\ (g)}{Masa\ del\ material\ precursor\ (g)} \cdot 100 \quad (Ec. 1)$$

Fase III. Análisis fisicoquímicos

Se realizó el análisis fisicoquímico para los dos carbones activados obtenidos, y para el carbón activado comercial tomado como referencia (Scharlau CA0351).

I. Humedad

El contenido de humedad se obtuvo de acuerdo al proceso establecido por la norma NTC 4467 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC], 1998) [9]. Para ello, se secaron 2 gramos de carbón activado en la estufa a 110 °C por 2 horas. Luego, se colocó en un desecador durante 20 minutos,

y se pesó de manera inmediata. Este último paso se repitió hasta obtener un peso constante, registrando la diferencia de masa en la Ecuación 2.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Masa CA inicial (g)} - \text{Masa CA final (g)}}{\text{Masa CA inicial (g)}} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

II. Cenizas

El contenido de cenizas se obtuvo a través del proceso establecido por la norma NTC 4467 (ICONTEC, 1998) [9]. Para ello, se secó una muestra de carbón activado hasta peso constante a 150 °C por 3 h en la estufa. Luego, se calcinó 1 gramo de la muestra en la mufla a 650 °C por 5 horas. Se colocó en el desecador, y se registró la masa resultante, lo cual se realizó hasta obtener un peso constante. Por último, el porcentaje de cenizas fue calculado por la Ecuación 3.

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{\text{Masa Cenizas (g)}}{\text{Masa CA inicial en base seca (g)}} \cdot 100 \quad (\text{Ec.3})$$

III. Material volátil

El contenido de material volátil en base seca fue determinado mediante el método American Society for Testing and Materials (ASTM D3175-20, 2020) [10]. Para ello, se calentó 1 gramo de carbón activado a 950 °C por 7 minutos en la mufla, registrando la masa final, y calculando la diferencia según la Ecuación 4. El porcentaje de material volátil en base seca se determina por la Ecuación 5.

$$\% \text{ Pérdida de masa} = \frac{\text{Masa CA inicial (g)} - \text{Masa Cenizas (g)}}{\text{Masa CA inicial (g)}} \cdot 100 \quad (\text{Ec.4})$$

$$\% \text{ Material volátil} = \% \text{ Pérdida de masa} - \% \text{ Humedad} \quad (\text{Ec.5})$$

IV. Densidad aparente

La densidad aparente se determinó según el procedimiento establecido por la Norma NTC 4467 (ICONTEC, 1998) [9]. Para ello, se pesaron 10 g de carbón activado. Luego, se transfirió una tercera parte a un cilindro graduado de 50 mL, se apisonó suavemente, y se agregó mayor cantidad hasta terminar con la muestra. Se apisonó por 5 minutos, y luego por períodos de 2 minutos, hasta completar el asentamiento. Por último, se registró el volumen del carbón activado, y se aplicó la Ecuación 6.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{Ec.6})$$

V. Área superficial

Se siguió el procedimiento descrito por Tubert y Talanquer [11], preparando inicialmente soluciones de ácido acético de concentraciones de 0,5, 0,4, 0,3, 0,2, 0,1 y 0,05 M, a las cuales se añadieron muestras de 2 g de CA 1, CA 2 y CA Comercial por 1 hora, sometidas a agitación. Luego, se filtraron las soluciones por gravedad, y se valoraron con NaOH 1 M. Se determinaron las concentraciones desconocidas de las soluciones de ácido acético tratadas, y se construyeron las isotermas de Langmuir y Freundlich. Para ello, se determinaron las capacidades de adsorción con la Ecuación 7 [12].

$$q_e = \frac{(C_i - C_b)}{W} \cdot V \quad (\text{Ec.7})$$

Luego, para el modelo de Langmuir, se siguió el procedimiento descrito por Montenegro [13], graficando la isoterma siguiendo la forma linealizada de dicho modelo, la cual está expresada en la Ecuación 8, para lo cual, se calcularon y graficaron los valores de $1/C_e$ en el eje X y $1/q_e$ en el e:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{C_e} \cdot \frac{1}{k \cdot q_m} \quad (\text{Ec.8})$$

Seguidamente, para la construcción de las isotermas siguiendo el modelo de Freundlich, se graficó la curva en función de la Ecuación 9 [13].

$$\log q = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad (\text{Ec.9})$$

Una vez construidas las isotermas de adsorción de ácido acético para el CA 1, CA 2 y CA Comercial, se seleccionó el modelo con mayor valor de correlación en cada caso, determinando la cantidad máxima de adsorbato que adsorbe un gramo de carbón activado (N_{\max}), siendo el inverso de la pendiente de la isoterma. De esa manera, sustituyendo el valor del número de Avogadro (N_0), y el valor asumido de área molecular teórica de ácido acético (σ), se calculó el área superficial a partir de la Ecuación 10.

$$A = N_{\max} \cdot N_0 \cdot \sigma \quad (\text{Ec.10})$$

Fase IV. Preparación y análisis de muestras

I. Muestras de soluciones acuosas de plomo

Se prepararon soluciones de Pb (II) con concentraciones de 400, 600, 800 y 1000 mg/L. Luego, se añadió 1 g de CA 1, CA 2 y CA Comercial a cada 30 mL de solución acuosa, por 24 h, con 30 minutos de agitación continua. Adicionalmente, se prepararon muestras control, referidas a soluciones acuosas expuestas al ambiente del laboratorio, a las mismas concentraciones iniciales, sin adicionar carbón activado, por 24 h. Una vez transcurrido el tiempo, se filtraron todas las muestras, menos las de control, y se procedió a determinar sus concentraciones finales. En primer lugar, se determinó la longitud de onda adecuada para realizar las lecturas de absorbancias del Pb (II) por medio de un barrido espectral, lo cual se llevó a cabo empleando el espectrofotómetro UV Visible modelo SP-MUV5100 de la marca INFITEK, realizando lecturas de absorbancia a una solución acuosa de plomo de 400 mg/L, diluida con 1 mL de EDTA 0,01 M y 1 mL de solución buffer de pH 10, formando así un complejo de plomo con EDTA, en un rango de 190 a 1100 nm, seleccionando la longitud de onda con mayor valor de absorbancia.

Una vez identificada la longitud de onda adecuada para el Pb (II), se construyó la curva de calibración, a partir de los valores de absorbancia para soluciones estándar de 500, 375, 250, 200 y 150 mg/L (diluidas previamente con EDTA y solución buffer). Posterior a ello, se leyeron las absorbancias para las soluciones acuosas resultantes de la remoción por cada carbón activado, para luego realizar las lecturas en el espectrofotómetro, obteniendo los valores respectivos de concentración a partir de la ecuación de la recta de la curva de calibración. Cabe resaltar que el valor de concentración fue duplicado, ya que la solución leída se diluyó a la mitad con EDTA y buffer para la formación del complejo.

II. Muestras de aguas industriales textiles sintéticas

En primer lugar, se realizaron barridos espectrales a las soluciones preparadas de 8,2 mg/L de níquel, concentración que fue tomada del estudio de Febres y Montesdeoca [14], y 100 mg/L de los colorantes Wiki Wiki, Rojo Congo y Azul de Metileno, concentración tomada del estudio de Ramírez y Valero [15],

siendo preparadas por separado, a modo de seleccionar un colorante que no interfiera con la longitud de onda establecida para el Pb (II). Luego, se prepararon las muestras de aguas industriales textiles sintéticas, con el objetivo de simular los efluentes textiles, a partir de concentraciones constantes de 8,2 mg/L de níquel y 100 mg/L del colorante seleccionado, y concentraciones iniciales de 400, 600, 800 y 1000 mg/L de plomo. El ensayo de remoción y filtrado de soluciones, además de la determinación de la concentración final de plomo, fue realizado del mismo modo que para las soluciones acuosas, empleando la curva de calibración elaborada previamente. Todos los ensayos se realizaron por triplicado.

Fase V. Construcción de isothermas de adsorción de Pb (II)

Se aplicó la Ecuación 7, para muestras de 1 g de carbón y 30 mL de solución, y las respectivas concentraciones iniciales y finales. Luego, se aplicaron las Ecuaciones 8 y 9 para construir las isothermas de Langmuir y Freundlich, seleccionando el modelo al que más se ajustan los datos por medio de su valor de coeficiente de determinación (R^2). Luego, para el modelo de Freundlich se calcularon las constantes, determinando el valor de n como el inverso de la pendiente y K como se muestra en la Ecuación 11, donde b es el corte con el eje Y:

$$K=10^b \quad (\text{Ec.11})$$

Fase VI. Cálculo del porcentaje de remoción de plomo

Una vez realizada la remoción de plomo por acción del CA 1, CA 2 y CA Comercial, se calculó el porcentaje de remoción en cada muestra, en base a las concentraciones finales e iniciales de éste en cada una de ellas, siguiendo la Ecuación 12, la cual fue descrita por Sime [12].

$$\text{Remoción}(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \cdot 100 \quad (\text{Ec.12})$$

Fase VII. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa Statistix versión 10. Se aplicaron las pruebas F y t de Student para la comparación de los rendimientos del CA 1 y CA 2. Por otro lado, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparar los resultados de la caracterización y remoción para los dos carbones activados obtenidos y el comercial tomado como referencia, y por último, la prueba de Dunn, para analizar la distribución de los datos entre los grupos pareados, los cuales pudieron presentar diferencias significativas.

Fase VIII. Comparación del carbón activado obtenido con el comercial

Se aplicó la Ecuación 13 para comparar los valores obtenidos del análisis fisicoquímico y los porcentajes de remoción del CA 1 y CA 2 con respecto al CA Comercial.

$$Ep(\%) = \frac{CA_{\text{experimental}} - CA_{\text{Comercial}}}{CA_{\text{Comercial}}} \cdot 100 \quad (\text{Ec.13})$$

Resultados

Obtención de carbón activado a partir de los residuos de dos tipos diferentes de telas basadas en fibras vegetales, mediante activación química

En primer lugar, se registraron en la Tabla 1 los resultados de masa y rendimiento (obtenidos por triplicado) para cada material precursor y de los dos carbones activados obtenidos, los cuales fueron generados a partir de la tela Franela Tubular (CA 1), y la tela Cottone (CA 2).

Tabla 1. Masa del material precursor, de los carbones activados obtenidos, y el rendimiento promedio para el CA 1 y el CA 2

Tipo de tela	Algodón (%)	Masa del material precursor (g)	Masa del carbón activado (g)	Rendimiento (%)	Rendimiento promedio (%)
Tela 1 (Franela Tubular)	70	89,360	14,377	16,09	15,46
		90,456	12,876	14,24	
		89,021	14,284	16,05	
Tela 2 (Cottone)	93	94,342	22,225	23,56	21,90
		95,224	21,038	22,09	
		95,897	19,221	20,04	

Como se puede evidenciar, para el CA 1 se obtuvo un rendimiento promedio del 15,46 %, mientras que para el CA 2 se registró uno de 21,90 %. Se denota que a partir del tipo de tela Cottone se obtuvo un mayor rendimiento, con un incremento del 29,41 %, lo que implica que se produce una mayor cantidad de carbón activado a partir de una misma cantidad de material precursor, en comparación del tipo de tela Franela Tubular. Según lo establecido en el estudio realizado por Vanegas [4], se reporta que el carbón activado generado mediante activación química con H_3PO_4 , a partir de la tela mezclilla, presentó un rendimiento del 42,12 %, mientras que el generado por $FeCl_3/ZnCl_2$ registró uno de 46 %. Esto indica que el empleo de $FeCl_3$ en conjunto con el $ZnCl_2$ como activantes logran un mayor efecto en el rendimiento del carbón activado a partir de tela, lo cual pudo influir en el bajo rendimiento de la presente investigación, en donde se empleó la combinación de H_3PO_4 y $FeCl_3$, sin tomar en cuenta el $ZnCl_2$.

Cabe resaltar que en el estudio mencionado anteriormente, se empleó la tela mezclilla como material precursor, con una composición de 74 % de algodón, mientras que, las telas empleadas en la presente investigación, se componen de 70 % y 93 % de esta fibra para el tipo de tela Franela Tubular y Cottone, respectivamente, por lo que se deja en evidencia que el porcentaje de algodón no fue un factor para la reducción del rendimiento obtenido, tomando en consideración que a mayor cantidad de fibras vegetales en la tela como material precursor, más carbono poroso se genera en el proceso de producción, dado que el algodón está constituido por 91 % de celulosa, 8 % de agua, 0,52 % de proteína, 0,35 % de grasas y ceras, y 0,13 % de cenizas [5]. Otro factor influyente en la disminución del rendimiento de los carbones activados obtenidos resulta en la dificultad de sellar los crisoles de manera hermética al momento de realizar la carbonización.



Figura 1. Carbón activado resultante, a) CA 1 a partir de la tela Franela Tubular, b) CA 2 a partir de la tela Cottone y c) CA Comercial tomado como referencia

Por otro lado, en la Tabla 2 se aprecian los resultados de la prueba F para evaluar la homogeneidad de la varianza, y de la prueba *t* de Student para dos muestras independientes según el método adecuado, en cuanto a los porcentajes de rendimiento del CA 1 y CA 2.

Tabla 2. Resultados obtenidos de la prueba F y t de Student para el rendimiento del CA 1 y CA 2

Pruebas	p
F plegada (ambos lados)	0,529
<i>t</i> de Student (método Pooled)	0,006

Se observa que el valor de *p* para la prueba F es mayor al nivel de significancia establecido de 0,05, lo que indica que las varianzas de las dos muestras son iguales. En ese sentido, al ubicar el valor de *p* correspondiente al método Pooled, el cual se utiliza para dos muestras independientes sin diferencia en la varianza, se observa que éste es menor a 0,05, por lo que existe una diferencia significativa de la media entre los rendimientos de los carbones activados obtenidos.

Efectos de la composición química de cada tipo de tela empleado como material precursor por medio de la caracterización de las propiedades fisicoquímicas

Se lograron obtener los resultados de porcentaje de humedad, cenizas, material volátil, densidad aparente y área superficial por triplicado, cuyos promedios logran apreciarse en la Tabla 3. Además, en la Tabla 4 se plantean los errores porcentuales entre cada parámetro fisicoquímico evaluado tanto para el CA 1 como para el CA 2, con respecto a los registrados para el CA Comercial.

Tabla 3. Resultados promedio de la caracterización fisicoquímica para el CA 1, CA 2 y CA Comercial

Parámetros fisicoquímicos	CA 1	CA 2	CA Comercial
Humedad (%)	11,31	11,43	23,12
Cenizas (%)	43,16	39,90	34,76
Material volátil (%)	61,37	64,62	55,42
Densidad aparente (g/mL)	0,284±0,023	0,549±0,007	0,500±0,005
Área superficial (m ² /g)	945,667±70,685	1290,000±130,000	1570,000±95,394

Tabla 4. Errores porcentuales de los parámetros fisicoquímicos del CA 1 y CA 2 con respecto al CA Comercial

Error porcentual	Humedad	Cenizas	Material volátil	Densidad aparente	Área superficial
CA 1 (%)	51,08	24,17	10,74	43,20	39,77
CA 2 (%)	50,56	14,79	16,60	9,80	17,83

Tal y como se observa, el promedio del porcentaje de humedad para el CA 1 fue de 11,31 %, mientras que para el CA 2 fue de 11,43 %. Se denota que ambos resultados fueron muy similares entre sí, con una diferencia del 1,06 %, sin embargo, en comparación con el CA Comercial, cuyo porcentaje de humedad fue del 23,12 %, el CA 1 y CA 2 se reducen en un 51,08 % y 50,56 % respectivamente, siendo una variación significativa bajo iguales condiciones de medición. Esta variación pudo deberse al tiempo de almacenamiento, ya que, al exponer los carbones activados al ambiente, estos empiezan a adsorber el vapor de agua contenido en el aire, razón por la cual se registró un mayor porcentaje de humedad en el comercial, cuyo tiempo de almacenaje es mucho mayor al de los carbones activados obtenidos. En ese sentido, teniendo en cuenta que para estos últimos

el tiempo de exposición hacia el ambiente fue de 2 semanas al momento de realizar el ensayo de humedad, puede apreciarse que el CA 1 reportó un resultado ligeramente menor que el CA 2, lo cual puede deberse a la mayor capacidad de adsorción que presenta este último, relacionado al hecho de que contiene una mayor fracción de algodón en su composición, sin embargo, el incremento del porcentaje de humedad implica que el vapor de agua ocupa sitios de poros que ya no estarán disponibles para la adsorción de plomo, por lo que al momento de realizar la remoción sin una previa deshidratación del carbón activado, es probable que se reporten menores porcentajes.

Se puede cotejar la información experimental recolectada con los resultados del estudio realizado por Carrasco y Londa [16], donde se obtuvo un porcentaje de humedad del carbón activado de cáscara de coco con ácido fosfórico al 40 % y 85 % de 9,638 % y 9,296 %, respectivamente. Puede notarse que a pesar de que la concentración de ácido fosfórico en el presente estudio fue alta (del 70 %), se obtuvieron mayores porcentajes de humedad que lo registrado por la información referenciada, lo cual puede deberse a la diferencia existente del material precursor, ya que en el trabajo mencionado se trabajó con cáscaras de coco, mientras que en la presente investigación se utilizó la tela basada en fibras vegetales.

En seguimiento a los parámetros fisicoquímicos, logra apreciarse que el promedio del porcentaje de cenizas del CA 1 fue de 43,16 %, y, el correspondiente al CA 2 fue de 39,90 %. Se denota que ambos resultados fueron ligeramente similares entre sí, con una diferencia del 7,55 %, sin embargo, en comparación con el CA Comercial, del cual se registró un resultado de 34,76 %, el porcentaje de cenizas para el CA 1 y CA 2 se incrementó en un 24,17 % y 14,79 %, respectivamente, siendo una variación significativa bajo los mismos efectos de condiciones de medición. El aumento apreciado se debe al tipo de material precursor, el cual pudo contener mayor cantidad de óxidos metálicos, impurezas, entre otros materiales que no se vaporizaron a la temperatura indicada del método. En cuanto a la diferencia observada entre el CA 1 y el CA 2, se observa que ambos fueron producidos a través del mismo método de activación, por lo que los factores de tiempo, temperatura y tipo de activador empleado, no influyeron en la variación descrita, lo cual si se le puede atribuir a un posible aumento de material inorgánico e impurezas presentes en la composición del material precursor del CA 1 (Franela Tubular).

En ese sentido, es importante destacar que mientras menor sea el contenido de cenizas, mayor es el área superficial y la capacidad de adsorción que tendrá el carbón activado [16], lo que implica que el CA 2 tiene mayor probabilidad de presentar mejores resultados de remoción. De esa manera, los resultados obtenidos para el presente estudio pueden compararse con los registrados por Arévalo y Reátegui [17], en donde para un proceso de activación química con ácido fosfórico al 30 y 60 %, para un mayor tiempo de activación experimentado de 75 minutos, se obtuvieron los porcentajes de 11,04±0,14 % y de 8,75±0,11 % de cenizas respectivamente, apreciando una relación inversa entre la concentración de ácido fosfórico utilizado en el proceso de activación y el porcentaje de cenizas. A partir de lo expuesto, puede afirmarse que el uso de la concentración del agente activador H_3PO_4 del 70 % en el presente estudio se considera correcto, dado que, según los datos referenciados, podría reducirse la cantidad de materia inorgánica que no aporta en la remoción de plomo sobre la muestra residual textil.

También se caracterizó el porcentaje de material volátil en base seca, siendo de 61,37 % para el CA 1, y de 64,62 % para el CA 2. Se evidenció que ambos resultados fueron muy similares entre sí, con una variación del 5,30 %, sin embargo, en comparación con el CA Comercial, cuyo resultado fue del 55,42 %, el CA 1 y CA 2 se alejan en 10,74 % y 16,60 % respectivamente. Esta variación pudo deberse al tipo de material precursor empleado o al método de activación química ejecutado, donde se estableció un contacto del carbón activado con diferentes compuestos como el H_3PO_4 , el HCl y el $FeCl_3$, los cuales pudieron contenerse en los poros del carbón activado final en pequeñas trazas que no lograron ser retiradas durante el proceso de producción. De esa manera, las diferencias observadas entre los carbones activados obtenidos pueden deberse a que el CA 2 logró retener mayores trazas de los compuestos, por lo que, al momento de calentarlo a la temperatura indicada por el método seleccionado, tuvo un incremento en la reducción de masa. También puede estar relacionado de manera directa con el porcentaje de carbono fijo, ya que el CA 2 presenta mayor proporción de fibra vegetal en

su composición, por lo que, al activarlo y carbonizarlo, pudo mantener una mayor fracción de carbono fijo, la cual se evaporó como dióxido de carbono por la presencia de oxígeno durante el ensayo realizado.

Comparando los resultados experimentales con los reportados en el estudio de Fernández [18], donde se analizaron tres muestras de carbón activado llevados a cabo a partir de la activación física, se obtuvieron menores porcentajes de material volátil, del 30,76 %, 30,16 % y 29,76 % para el carbón lavado (CL), carbón oreganal (CO) y el carbón tipo D (CT) respectivamente. Esto confirma el hecho que dependiendo del método de activación que se ejecute se obtendrá un porcentaje distinto de material volátil. En ese sentido, es de destacar que los resultados encontrados en la literatura diferencian el material volátil del porcentaje de carbono fijo generalmente, debido a que cuentan con los equipos necesarios para lograr determinar cada parámetro por separado, razón por la cual los valores de material volátil serán reducidos en mayor proporción al no tomar en consideración la vaporización del carbono fijo como dióxido de carbono durante el ensayo.

En relación a la densidad aparente, se obtuvieron los resultados de $0,284 \pm 0,023$ y $0,549 \pm 0,007$ g/mL para el CA 1 y el CA 2 respectivamente. Se denota una variación significativa entre ambos resultados, ya que se obtuvo un error porcentual del 48,27 %, sin embargo, en comparación con el CA Comercial con densidad aparente de $0,500 \pm 0,005$ g/mL, el CA 1 y CA 2 se alejan en un 43,20 % y 9,80 %, de forma respectiva. Es de resaltar que las partículas del CA 1 se observan de menor tamaño que las del CA 2, por lo que ocupan mayor espacio, sin embargo, en vez de aumentar la densidad aparente se aprecia que la misma disminuye. A partir de lo anterior, la diferencia de dicho parámetro no se debe a los factores geométricos del tamaño de las partículas, la forma o el grado de compactación, por lo que se le atribuye a la composición de la tela como material precursor, diferenciándose por la cantidad de fibra vegetal, lo cual puede generar diferencias de peso entre las partículas de cada material. En comparación con estudios realizados previamente, se pueden cotejar los resultados con los reportados por Acevedo (2018) [19], quien determinó la densidad aparente de dos carbones activados de tipo granular, uno con el material precursor basado en coco, y el segundo basado en madera, obteniendo un promedio de 0,44 y 0,24 g/mL de forma respectiva, lo cual deja en evidencia el hecho de que la composición del material precursor influye en gran medida sobre la relación de masa y volumen del material, bajo las mismas condiciones de producción, y basados en un mismo tipo de partícula (granular).

Por último, se obtuvieron mayores valores de área superficial para el CA 2 a comparación del CA 1, siendo estos de $1290,000 \pm 130,000$ y $945,667 \pm 70,685$ m²/g, respectivamente, tomando como referencia el valor obtenido para el CA Comercial, siendo este de $1570,000 \pm 95,394$ m²/g. En el estudio publicado por Ramírez *et al.* [20] se obtuvo que los carbones activados producidos a partir de fibra y cáscara de palma de aceite presentaron áreas superficiales de 835,30 y 575,13 m²/g, y mostraron capacidades máximas de adsorción de 763,4 y 724,6 mg/g, lo que implica que una mayor área superficial permite adsorber una mayor cantidad de contaminantes, por lo cual, en la presente investigación se puede afirmar que el CA Comercial presenta mayor probabilidad de tejer un incremento en la capacidad de remoción, seguido del CA 2 y, por último, el CA 1.

De igual forma, en la investigación tomada como antecedente, siendo este el estudio publicado por Rodríguez *et al.*, [6], se prepararon dos telas de carbón activado a partir de la activación química de textiles de algodón, para las cuales se obtuvieron valores de área superficial de 796 m²/g y 951 m²/g, presentando similitud con los obtenidos en la presente investigación. También, los resultados obtenidos se asemejan a los reportados en el estudio realizado por Quintana *et al.*, [21], donde se obtuvo que el área superficial del carbón activado producido a partir de cascarilla de café resultó ser de 1263 m²/g.

En cuanto al análisis estadístico, en la Tabla 5 se observa el valor de *p* obtenido tras la realización de la Prueba de Kruskal – Wallis (K-W), siendo una prueba no paramétrica basada en el rango de medias, la cual se utiliza para corroborar si existen diferencias relevantes a nivel estadístico entre los tres grupos independientes, referidos al CA 1, CA 2 y CA Comercial. Cabe resaltar que se emplea una prueba ANOVA no paramétrica, ya que no se puede asumir distribución normal o varianzas iguales entre los grupos que se comparan, por presentar solo tres datos por muestra. En adición a ello, también se observan los resultados obtenidos de la Prueba de Dunn, utilizada para verificar una distinción estadísticamente significativa entre la distribución de muestras pareadas. Para ello, se empleó el abecedario, asignando la letra A a la muestra con el rango de medias

de mayor valor, y así de manera secuencial, repitiendo la letra designada en aquellas muestras que no presentan diferencias significativas en cuanto a la distribución estadística de sus resultados.

Tabla 5. Resultados de la Prueba de Kruskal – Wallis y la Prueba de Dunn para CA 1, CA 2 y CA Comercial en cuantos a los parámetros fisicoquímicos

Parámetros fisicoquímicos	CA 1	CA 2	CA Comercial	p (K-W)
Humedad (%)	B	AB	A	0,001
Cenizas (%)	A	AB	B	0,007
Material volátil (%)	AB	A	B	0,001
Densidad (g/mL)	B	A	AB	0,001
Área superficial (m ² /g)	B	AB	A	0,001

Se observó que, para todos los parámetros fisicoquímicos evaluados durante la caracterización, el valor de *p* de la Prueba de Kruskal – Wallis fue menor al nivel de significancia establecido de 0,05, por lo cual, se rechaza la hipótesis nula, lo que implica que existen diferencias estadísticamente significativas entre algunas de las distribuciones de las muestras.

Por otro lado, en cuanto a la Prueba de Dunn, logra apreciarse que el rango de medias de la humedad promedio correspondiente al CA Comercial es identificado con la letra A, lo que implica que los valores de las observaciones de ese grupo tienden a ser mayores que el resto, sin embargo, estadísticamente no existen diferencias significativas de la distribución de los datos, con respecto al porcentaje de humedad del CA 2, debido a que ambos se identifican con la letra A. De igual forma, el porcentaje de humedad del CA 1 es considerado estadísticamente igual que el del CA 2, caso contrario al porcentaje de humedad entre el CA Comercial y el CA 1, donde sí se encontraron diferencias significativas. En relación al porcentaje de cenizas, se aprecia que el rango de medias reportado para el CA 1 es superior al resto, sin embargo, estadísticamente no existen diferencias significativas de la distribución de los datos con respecto al porcentaje de cenizas del CA 2, siendo este último similar al CA Comercial, caso contrario al porcentaje de cenizas entre el CA 1 y el CA Comercial, donde sí se establecieron diferencias.

En el caso del porcentaje de material volátil en base seca, se aprecian similitudes en cuanto al CA 2 con el CA 1, y el CA 1 con el CA comercial, siendo los valores correspondientes al CA 2 superior al resto, mientras que en relación a la densidad aparente, las similitudes fueron apreciadas en el CA 2 con el CA Comercial, y en este último con el CA 1, caso contrario a la relación entre el CA 2 y el CA 1, donde sí se encontraron diferencias significativas en cuanto a la distribución de sus resultados. Por último, para el área superficial, se apreciaron similitudes en el CA Comercial con el CA 2, y en el CA 1 con el CA 2, mientras que entre el CA Comercial y el CA 1 si existen diferencias significativas.

Capacidad de remoción de plomo (II) en muestras de aguas industriales textiles sintéticas por acción de cada carbón activado obtenido, en función de la concentración inicial del metal

Una vez realizado el barrido espectral para el plomo, se determinó que la longitud de onda adecuada para realizar las lecturas de absorbancia en el espectrofotómetro para dicho metal es de 283,3 nm, lo cual confirma lo obtenido por Acuña (2012) [22] en su investigación, donde la longitud de onda utilizada para el plomo fue de 283,31 nm. En la Figura 2, se aprecia el barrido espectral realizado para el plomo, junto con la curva de calibración construida para éste.

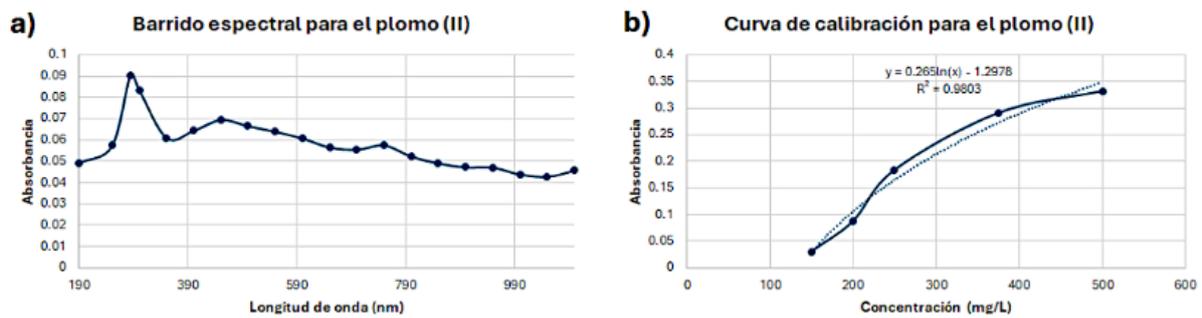


Figura 2. a) Barrido espectral para el plomo a 400 mg/L, y b) Curva de calibración construida para el plomo a 283,3 nm

Luego, en la Tabla 6 se reportaron los resultados promedio obtenidos del triplicado de porcentajes de remoción de Pb (II) en las soluciones acuosas de plomo, y las aguas industriales textiles sintéticas, tratadas por el CA 1, CA 2 y CA Comercial. También, en la Tabla 7 se plantean los errores porcentuales entre los porcentajes de remoción de Pb (II) por acción del CA 1 y CA 2 con respecto a los registrados para el CA Comercial.

Tabla 6. Porcentajes de remoción de Pb (II) promedio en soluciones acuosas y aguas industriales textiles sintéticas por acción del CA 1, CA 2 y CA Comercial, para concentraciones iniciales de plomo de 400, 600, 800 y 1000 mg/L

Concentración inicial teórica (mg/L)	Porcentaje de remoción promedio de Pb (II) (%)					
	Soluciones acuosas de plomo			Aguas industriales textiles sintéticas		
	CA 1	CA 2	CA Comercial	CA 1	CA 2	CA Comercial
400	19,15	28,34	48,39	13,90	20,46	36,91
600	16,36	25,21	46,47	11,82	18,74	34,49
800	15,30	25,02	46,20	11,49	18,02	33,52
1000	15,01	24,74	45,29	10,70	17,82	32,50

Tabla 7. Error porcentual de porcentajes de remoción del CA 1 y CA 2 con respecto al CA Comercial

Error porcentual	Porcentaje de remoción de Pb (II) en soluciones acuosas				Porcentaje de remoción de Pb (II) en aguas industriales textiles sintéticas			
	Concentración inicial teórica (mg/L)				Concentración inicial teórica (mg/L)			
	400	600	800	1000	400	600	800	1000
CA 1 (%)	60,43	64,79	66,88	66,86	62,34	65,73	65,72	67,08
CA 2 (%)	41,43	45,75	45,84	45,37	44,57	45,67	46,24	45,17

Se observa que el CA Comercial alcanzó los porcentajes de remoción más altos en soluciones acuosas de plomo, encontrándose estos entre 48,39 % y 45,29 %. De igual forma, se reportó que el CA 2 presentó los porcentajes de remoción de Pb (II) más altos entre los dos carbones activados obtenidos, encontrándose estos entre 28,34 % y 24,74 %, alejándose del CA Comercial de un 41,43 % a 45,37 %, mientras que para el CA 1 se obtuvieron valores entre 19,15 % y 15,01 %, alejándose del CA Comercial de un 60,43 % a 66,86 %. Por otro lado, para las aguas industriales textiles sintéticas (conformadas por plomo, níquel y colorante Wiki Wiki, ya que estos dos últimos no produjeron interferencia con la lectura de las absorbancias del plomo) se alcanzaron porcentajes de remoción de 36,91 % a 32,50 % para el CA Comercial, de 20,46 % a 17,82 % para el CA 2

(alejándose del CA Comercial en un 62,34 % a 67,08 %) y de 13,90 % a 10,70 % para el CA 1 (alejándose del CA Comercial en un 44,57 % a 45,17 %), con lo cual, se obtuvo de igual manera que el CA 2 alcanzó los mayores valores de porcentajes de remoción entre los dos carbones activados obtenidos. Esto concuerda con lo obtenido previamente en los valores de área superficial, donde el CA 2 presentó el mayor valor entre los dos carbones activados, lo cual le confiere una mayor capacidad de adsorción.

De igual forma, se obtuvo que la concentración inicial de Pb (II) desempeña un papel importante en la remoción de dicho metal, ya que, al aumentar la concentración inicial de 400 a 1000 mg/L en las soluciones acuosas de plomo, para una muestra constante de carbón activado de 1 g, se evidencia una disminución en los porcentajes de remoción del CA 1, CA 2 y CA Comercial, los cuales fueron descritos anteriormente, tanto para las soluciones acuosas como para las aguas industriales textiles sintéticas. Lo anterior concuerda con lo obtenido en el trabajo de Sime [12], donde se obtuvo que, para un aumento de la concentración inicial de plomo de 70 a 130 mg/L, los porcentajes de remoción disminuyeron de 97,12 a 94,77 %. De este modo, la reducción del porcentaje de remoción se debe a que, con el incremento de la concentración inicial de plomo (para una cantidad de adsorbente constante) se produce un aumento de la cantidad de iones de plomo adheridos a la superficie del adsorbente, provocando la saturación de este último, ya que el sitio activo no resulta suficiente [12].

Luego, en el estudio realizado por Sánchez [5], se obtuvieron valores de eficiencia de remoción de arsénico desde 7,81 % a 17,19 %, 46,87 % hasta 65,63 % y 70,31 % hasta 75,78 % empleando 50 g de muestras de carbón activado producido a partir de telas con un 25 %, 50 % y 100 % de algodón, respectivamente, obteniendo una mayor eficiencia de remoción a medida que se aumenta el porcentaje de algodón del material precursor del carbón activado. Esto concuerda con lo obtenido en el presente estudio, donde se obtuvo que el CA 2 presentó una mayor eficiencia de remoción que el CA 1, tanto en soluciones acuosas de plomo como en aguas industriales textiles sintéticas, lo que implica una relación positiva entre el porcentaje de remoción de Pb (II) y el porcentaje de algodón presente en el material precursor.

Por otro lado, se puede denotar que los porcentajes de remoción alcanzados para las muestras de aguas industriales textiles sintéticas son inferiores a los alcanzados para las muestras de soluciones acuosas, lo que implica que la eficiencia de remoción disminuye cuando el plomo se encuentra acompañado de otras sustancias (níquel y colorante), las cuales también fueron adsorbidas. En el estudio publicado por Tejada-Tovar [23] se explica que la diferencia obtenida en los porcentajes de remoción de plomo y níquel, en una misma solución, se deben a la rápida saturación de los sitios activos debido a la competencia de los iones por éstos, por lo cual, existe una adsorción competitiva entre dichos metales.

Luego, en cuanto al análisis estadístico, en la Tabla 8 se observan los valores de *p* obtenidos tras la realización de la prueba de Kruskal - Wallis y la prueba de Dunn:

Tabla 8. Resultados de la Prueba de Kruskal – Wallis y la Prueba de Dunn para el CA 1, CA 2 y CA Comercial en cuanto a los porcentajes de remoción de Pb (II) en soluciones acuosas y aguas industriales textiles sintéticas

Porcentaje de remoción (%)	CA 1	CA 2	CA Comercial	<i>p</i> (K-W)
Soluciones acuosas	C	B	A	0,000
Aguas industriales textiles sintéticas	C	B	A	0,000

Se observa que el valor de *p* de la Prueba de Kruskal – Wallis para todos los porcentajes de remoción analizados es menor a 0,05, por lo cual, se afirma que existen diferencias estadísticamente significativas entre las distribuciones de las muestras. Luego, en cuanto a la Prueba de Dunn, se aprecia que todos los grupos se identifican con letras diferentes (A, B y C), de modo que los porcentajes de remoción obtenidos para el CA Comercial se identifican con la letra A y son mayores que el resto, mientras que los obtenidos para el CA 1 se identifican con la letra C y son menores que el resto, encontrando diferencias significativas entre todos los

porcentajes de remoción para los tres carbones activados estudiados, tanto para las soluciones acuosas como para las aguas industriales textiles sintéticas. Por otro lado, los resultados obtenidos de concentraciones finales de plomo promedio en las muestras control, tanto para las soluciones acuosas como para las aguas industriales textiles sintéticas, se reportan en la Tabla 9.

Tabla 9. Concentraciones finales promedio de las muestras control de soluciones acuosas de plomo y aguas industriales textiles sintéticas

Concentración inicial teórica de Pb (II) (mg/L)	Concentración final promedio de Pb (II) (mg/L)	
	Soluciones acuosas de plomo	Aguas industriales textiles sintéticas
400	403,151±0,879	401,635±1,748
600	599,172±3,457	598,415±2,258
800	804,224±1,754	803,216±3,031
1000	1000,991±2,182	988,476±2,174

Como se pudo observar, no hubo un cambio significativo en las concentraciones de Pb (II) de las soluciones que no fueron tratadas con carbón activado (muestras control). Las leves diferencias obtenidas se encuentran dentro del error experimental permisible. Esto implica que los factores externos no produjeron pérdidas ni incrementos en las concentraciones de plomo sin tratar por carbón activado, lo que implica que la remoción se llevó a cabo únicamente a la acción de los carbones activados.

En las Figuras 3 y 4 se observan las isotermas de adsorción de Pb (II) en soluciones acuosas y aguas industriales textiles sintéticas por acción del CA 1, CA 2 y CA Comercial, siguiendo los modelos de Langmuir y Freundlich, y, en la Tabla 10, sus respectivos valores de correlación.

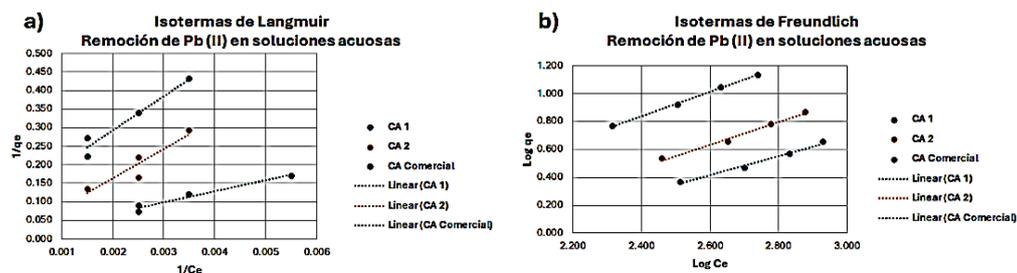


Figura 3. Isotermas de adsorción de Pb (II) siguiendo los modelos de a) Langmuir, y b) Freundlich, en soluciones acuosas por acción del CA 1, CA 2 y CA Comercial

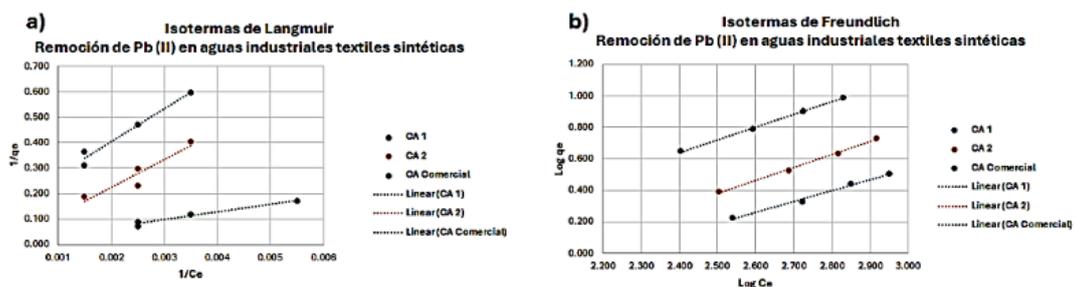


Figura 4. Isotermas de adsorción de Pb (II) siguiendo los modelos de a) Langmuir, y b) Freundlich, en aguas industriales textiles sintéticas por acción del CA 1, CA 2 y CA Comercial

Tabla 10. Coeficientes de determinación para las isotermas de adsorción de Pb (II) en soluciones acuosas y aguas industriales textiles sintéticas por acción del CA 1, CA 2 y CA Comercial

Coeficiente de determinación (R ²)	Adsorción de Pb (II) en soluciones acuosas			Adsorción de Pb (II) en aguas industriales textiles sintéticas		
	CA 1	CA 2	CA Comercial	CA 1	CA 2	CA Comercial
Modelo de Langmuir	0,9793	0,9825	0,9979	0,9824	0,9947	0,9979
Modelo de Freundlich	0,9885	0,9890	0,9990	0,9909	0,9973	0,9993

Se obtuvieron mayores valores de correlación para las isotermas de Freundlich en la adsorción de Pb (II) tanto en soluciones acuosas como en aguas industriales textiles sintéticas, por acción del CA 1, CA 2 y CA Comercial, en comparación del modelo de Langmuir, lo que implica que la data se ajusta mejor al modelo de Freundlich, indicando que el proceso de adsorción ocurre en multicapas [23]. Luego, en cuanto a las constantes de Freundlich, se obtuvieron valores de n de 1,4524, 1,232 y 1,139, y K resultó en valores de 23,643, 29,971 y 18,694, para el CA 1, CA 2 y CA Comercial en soluciones acuosas, respectivamente, mientras que, en la remoción de plomo en aguas industriales textiles sintéticas, n obtuvo valores de 1,448, 1,230 y 1,241, y K resultó tener valores de 34,332, 44,854 y 19,561, para el CA 1, CA 2 y CA Comercial, respectivamente. Dado que los valores obtenidos de n son mayores a 1, el proceso de adsorción ocurre de manera favorable [25].

Conclusiones

En relación a la obtención de carbón activado a partir de los residuos textiles, se obtuvo un rendimiento de 15,46 % para el CA 1, y de 21,90 % para el CA 2, lo que implica una relación positiva entre la composición de algodón en el material precursor y el rendimiento de carbón activado generado.

Se establecieron los efectos de la composición química de cada tipo de tela por medio de la caracterización de cada carbón activado generado, reportando de esa manera que el CA Comercial presentó un mayor porcentaje de humedad de 23,12 %, debido a su mayor tiempo de almacenamiento, en comparación al CA 2 (11,43 %) y el CA 1 (11,31 %), los cuales se diferencian por la proporción de fibra vegetal en la composición de su material precursor. Se obtuvo un mayor porcentaje de cenizas sobre el CA 1 (43,16 %), seguido del CA 2 (39,90 %), y por último el CA Comercial (34,76 %), lo cual puede deberse a la presencia de impurezas en la composición del material precursor. Por otro lado, el porcentaje de material volátil fue mayoría en el CA 2 (64,62 %), seguido del CA 1 (61,37 %), y por último el CA Comercial (55,42 %), lo cual se debe al tipo de activación y una mayor cantidad de carbono fijo.

El CA 2 registró una mayor densidad aparente de 0,549±0,007 g/mL, a diferencia del CA 1 con 0,284±0,023 g/mL, y del CA Comercial con 0,500±0,005 g/mL. La diferencia de dicho parámetro no se debe a los factores geométricos del tamaño de las partículas, la forma o el grado de compactación, por lo que se le atribuye a la composición de la tela como material precursor. Además, se registraron valores de área superficial de 945,667±70,685, 1290±130,000 y 1570±95,394 m²/g para el CA 1, CA 2 y el CA Comercial respectivamente, lo cual le aportó a este último una mayor eficiencia de remoción.

En la remoción de Pb (II) en aguas industriales textiles sintéticas por acción de cada carbón activado, se obtuvieron porcentajes de remoción para el CA 1 de 13,90 %, 11,82 %, 11,49 % y 10,70 %; 20,46 %, 18,74 %, 18,02 % y 17,82 % para el CA 2; y de 36,91 %, 34,49 %, 33,52 % y 32,50 % para el CA Comercial, con concentraciones iniciales de 400, 600, 800 y 1000 mg/L, de forma respectiva, obteniendo que el CA Comercial presentó las mejores eficiencias de remoción, seguido del CA 2 y, por último, el CA 1. También, se obtuvo que la presencia de níquel y colorante disminuyó la cantidad de plomo (II) adsorbida, ya que se obtuvieron porcentajes de remoción menores que los registrados para las soluciones acuosas. Además, no se reportaron cambios significativos en las concentraciones de las muestras control. De igual modo, se registró que el proceso de adsorción de Pb (II) en soluciones acuosas y en aguas industriales textiles sintéticas por acción del CA 1,

CA 2 y CA Comercial se ajustó mejor al modelo de Freundlich, lo que implica que el proceso de adsorción ocurre en multicapas.

Referencias

- [1] D. C. Aguirre, “Determinación de la capacidad de bioadsorción en la cáscara de naranja para la remoción de cadmio en aguas residuales de dos fábricas de textiles en el cantón Pelileo Provincia de Tungurahua”, Trabajo de fin de grado, ESPOCH., Orellana, Ecuador, 2017 [En Línea]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/7856/1/236T0289.PDF>
- [2] A. P. Huerta, y D. A. Irrazabal, “Análisis de la economía circular aplicada a la industria textil para la fabricación de textiles a partir de residuos textiles pre y post consumo”, Tesis de fin de grado, Univ. Católica San Pablo., Arequipa, Perú, 2020 [En Línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucsp.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/59811e4f-ff53-4e29-b829-c28b6e9ece1e/content>
- [3] F. Colpas, A. Taron, y R. Gonzalez, “Área superficial de carbones activados y modificados obtenidos del recurso agrícola Saccharum officinarum”, *Rev. de CC. Agrícolas*, vol. 34, no. 2, pp. 62-72, 2017 [En Línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.22267/rcia.173402.72>
- [4] G. Vanegas, “Preparación y caracterización de Carbón activado obtenido a partir de residuos textiles de mezclilla”, Tesis de Maestría, Univ. Nacional de Colombia., Bogotá, Colombia, 2021 [En Línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/81024/1033793506.2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] S. Sánchez, “Adsorción de Arsénico de efluente textil con carbón activado obtenido a partir de residuos de tela de algodón en la industria textil Corporación Wama S.A.C.”, Tesis de Grado, Univ. César Vallejo., Lima, Perú, 2017 [En Línea]. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/21160/S%3%a1nchez_BSA.pdf?sequence=6&isAllowed=y
- [6] G. Rodríguez, L. Giraldo, y J. Moreno, “Preparación y caracterización de carbón activado. Influencia del material precursor de algodón”, *Rev. Colombiana de Quim.*, vol. 36, no. 1, pp. 43-53, 2007 [En Línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28042007000100004
- [7] E. Baxter, y M. Trelles, “Especificaciones técnicas de las bases textiles que se ofertan en el medio. Manual informativo dirigido a estudiantes, diseñadores y vendedores del ramo”, Trabajo de fin de grado, Univ. del Azuay., Cuenca, Ecuador, 2014. [En Línea]. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/3859>
- [8] “Especificaciones Técnicas Franela”. Textil Jadue, (s.f.). [Ficha técnica]. Disponible en: <https://textiljadue.cl/wp-content/uploads/2019/04/Ficha-T%C3%A9cnica-Franela.pdf>
- [9] Productos Químicos Industriales. Carbón activado. Métodos de ensayo. Norma Técnica Colombiana NTC 4467:1998, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, Bogotá, Colombia: 1998. [En Línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/103831105/Azul-de-Metileno>
- [10] Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke, American Society for Testing and Materials, ASTM D3175-20. Pennsylvania, United States, 2020.
- [11] I. Tubert, y V. Talanquer, “Sobre adsorción”, *Rev. Educ. Química*, vol. 8, no. 4, pp. 186-190, 1997 [En Línea]. Disponible en: <https://revistas.unam.mx/index.php/req/article/view/66595>
- [12] T. Sime, “Investigation of activated carbon as adsorbent for paint industry wastewater treatment”, Tesis de Maestría, Addis Ababa Science and Technology University., Adís Abeba, Etiopía, 2018 [En Línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/72666889/Investigation_of_Activated_Carbon_as_Adsorbent_for_Paint_Industry_Wastewater_Treatment
- [13] M. Montenegro, “Evaluación del proceso de adsorción en tres tipos de carbón activado granular para una fuente de agua superficial”, Trabajo de fin de grado, Univ. de los Andes., Bogotá, Colombia, 2017 [En

Línea]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/2c3e7669-7a5b-473a-896f-0a6781edfdca/content>

[14] J. Febres, y D. Montes, “Aplicación de tecnología de electrocoagulación para remoción de metales pesados: níquel, cobalto, cromo hexavalente y DQO en efluente eoca, K textil”, Tesis de fin de grado, Univ. de Guayaquil., Guayaquil, Ecuador, 2021

[15] Y. Ramírez, y L. Valero, “Combinación de ozono y nano partículas magnéticas verdes para la degradación de azul de metileno en agua residual sintética textil”, Trabajo de fin grado, Univ. Católica de Colombia., Bogotá, Colombia, 2021 [En Línea]. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/b423ef00-ae74-43d6-a8a8-8024bed2b479/content>

[16] B. Carrasco, y E. Londa, “Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco “Cocos nucifera L”, Trabajo de fin de grado, Univ. de Cuenca., Cuenca, Ecuador, 2018 [En Línea]. Disponible en: <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/63ec02b1-df3e-47ae-98fa-814220181b80/content>

[17] L. Fernández, “Síntesis de pellets de carbón activado a partir de carbón mineral del Cerrejón”, Tesis de maestría. Univ. Nacional de Colombia., Bogotá, Colombia, 2015 [En Línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/54724/1032417226.2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[18] F. Arévalo, y K. Reátegui, “Calidad y rendimiento del carbón activado de la cáscara del fruto de calabaza (Cucurbitaficifolia) obtenido por método químico”, *Revista Forestal del Perú*, vol. 35, no. 1, pp. 21-30, 2020 [En Línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.21704/rfp.v35i1.1473>

[19] D. Acevedo, “Pruebas de adsorción y regeneración química de carbón activado granular de madera y de cáscara de coco para el tratamiento de agua residual de la industria del teñido textil”, Tesis de Maestría, Univ. Autónoma Metropolitana., Ciudad de México, México, 2018 [En Línea]. Disponible en: <https://zaloamati.azc.uam.mx/server/api/core/bitstreams/b0dfd2ab-5ace-4d8c-be64-6520f4665d2c/content>

[20] A. Ramírez, S. Giraldo, E. Flórez, y N. Acelas, “Preparación de carbón activado a partir de residuos de palma de aceite y su aplicación para la remoción de colorantes”, *Revista Colombiana de Química*, vol. 46, no. 1, pp. 33-41, 2017 [En Línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/66276/62851-322040-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[21] G. Quintana, J. Velásquez, C. Gómez, y Y. Echavarría, “Adsorción de Ni (II) en carbón activado de cascarilla de café”, *Revista Investigaciones Aplicadas*, no. 3, pp. 01-06, 2008 [En Línea]. Disponible en: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/7188/ADSORCI%c3%93N%20DE%20NI%28II%29%20EN%20CARB%c3%93N%20ACTIVADO%20DE%20CASCARILLA%20DE%20CAF%c3%89.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[22] V. Acuña, “Determinación espectrofotométrica de plomo (II) con ditizona en solución micelaraniónica”, Tesis de fin de grado, Univ. Nacional Mayor de San Marcos., Lima, Perú, 2012 [En Línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/323344309.pdf>

[23] C. Tejada-Tovar, J. Gallo-Mercado, J. Moscote, A. Villabona, y D. Acevedo-Correa, “Adsorción competitiva de plomo y níquel sobre cáscara de ñame y bagazo de palma en sistema continuo”, *Bioteología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 16, no. 1, pp. 52–61, 2018 [En Línea]. Disponible en: <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/bioteologia/article/view/1145>

[24] F. Delgado, “Determinación de isothermas de adsorción, capacidad y la cinética de adsorción de la pepa de aceituna, en la adsorción de As”, Tesis de doctoral, Univ. Nacional Mayor de San Agustín de Arequipa., Arequipa, Perú, 2021 [En Línea]. Disponible en: <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/52b1ba2a-4981-4021-9bb5-091bb1886d8c/content>

[25] M. Chiban, G. Carja, G. Lehtu, y F. Sinan, “Equilibrium and thermodynamic studies for the removal of As (V) ions from aqueous solution using dried plants as adsorbents”. *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 9, supl. 2, pp. 988-999, 2016 [En Línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535211002632>