

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

**ESTUDIO DE LA REMOCIÓN DE TENSOACTIVOS COLECTORES
EN EFLUENTES DE FLOTACIÓN DE MINERALES SULFURADOS
CON CARBÓN ACTIVADO**

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN METALURGIA

DANIEL RICARDO MALDONADO CEDEÑO
daniel.maldonado@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVÍN, PhD.
ernesto.delatorre@epn.edu.ec

Quito, julio 2024

© Escuela Politécnica Nacional (2024)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Daniel Ricardo Maldonado Cedeño, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

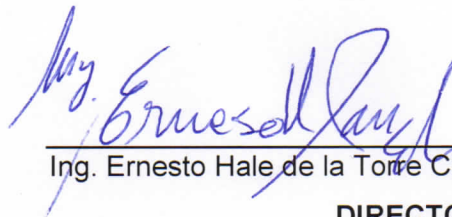
La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 114 del Código Orgánico de la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



Daniel Ricardo Maldonado Cedeño

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Daniel Ricardo Maldonado Cedeño, bajo mi supervisión.



Ing. Ernesto Hale de la Torre Chauvín, Ph.D.

DIRECTOR DE TESIS

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto PVIF-20-01 que se ejecuta en el Departamento de Metalurgia Extractiva.

AGRADECIMIENTOS

A la vida, que me ha permitido conquistar otro peldaño de esta gran travesía.
¡Muchas Gracias!

DEDICATORIA

Para aquellas personas que de una u otra forma siempre han creído
en mí.

Estudio de la remoción de tensoactivos colectores en efluentes de flotación de minerales sulfurados con carbón activado

Maldonado Cedeño, Daniel Ricardo¹

¹Departamento de Metalurgia Extractiva, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

Resumen: Se estudia la remoción de tensoactivos colectores (amil xantato de potasio y dietil ditiofosfato de sodio), reactivos empleados en el proceso de flotación de minerales sulfurados, mediante su adsorción en carbón activado. Estos colectores reducen la tensión superficial del agua causando daños graves a los ecosistemas acuáticos, en Ecuador se descartan a los cuerpos hídricos, más de 40 000 m³.día⁻¹ de efluentes de flotación con elevadas concentraciones de tensoactivos. Para los ensayos de remoción de los colectores se utilizó carbón activado microporoso con 1 200 m².g⁻¹ con soluciones sintéticas y efluentes acuosos del proceso de flotación a nivel laboratorio de un mineral polisulfurado (0,5% Cu, calcopirita, pirita, clorita). Se trabajó con una dosificación de 0,25; 0,5; 0,75 y 1 g tanto para el carbón activado y el carbón activado modificado por oxidación superficial con HNO₃, en un lecho agitado por 24 horas con valores de pH de 3, 7 y 10 y en un filtro de columna empacada. Se desarrolló una metodología de análisis para los colectores en solución acuosa mediante espectrofotometría UV-visible. Los valores de recuperación del amil xantato de potasio y el dietil ditiofosfato de sodio a valores de pH 3, 7 y 10 en un efluente acuoso fueron de 66, 40, 100 % y 55, 99 y 76 % respectivamente. La filtración en columna alcanzó remociones del 97 y 56% con unas constantes cinéticas de filtración de 1221,4 día⁻¹ y 323 día⁻¹. El carbón modificado en el efluente acuoso logró remociones de 100 y 76 % para el amil xantato de potasio y el dietil ditiofosfato de sodio con concentraciones iniciales de 20 y 60 mg.L⁻¹ respectivamente.

Palabras clave: Carbón activado, tratamiento de efluentes, colectores, flotación de minerales, adsorción, columna empacada.

Study of the removal of collecting surfactants in flotation effluents of sulfide minerals with activated carbon

Abstract: The removal of collecting surfactants (potassium amyl xanthate and sodium diethyl dithiophosphate) reagents used in the flotation process of sulfide minerals, through their adsorption on activated carbon, is studied. These collectors reduce the surface tension of the water, causing serious damage to aquatic ecosystems. In Ecuador, more than 40 000 m³.day⁻¹ of flotation effluents with high concentrations of surfactants are discarded into water bodies. For the collector removal tests, microporous activated carbon was used with 1 200 m².g⁻¹ with synthetic solutions and aqueous effluents from the laboratory flotation process of a polysulfurized mineral (0.5% Cu, chalcopyrite, pyrite, chlorite). We worked with a dosage of 0,25; 0,5; 0,75 and 1 g for both activated carbon and activated carbon modified by surface oxidation with HNO₃, in a stirred bed for 24 hours with pH values of 3, 7 and 10 and in a packed column filter. An analysis methodology was developed for collectors in aqueous solution using UV-visible spectrophotometry. The recovery values of potassium amyl xanthate and sodium diethyl dithiophosphate at pH values 3, 7 and 10 in an aqueous effluent were 66, 40, 100% and 55, 99 and 76% respectively. Column filtration achieved removals of 97 and 56% with filtration kinetic constants of 1221,4 day⁻¹ and 323 day⁻¹. The modified carbon in the aqueous effluent achieved removals of 100 and 76% for potassium amyl xanthate and sodium diethyl dithiophosphate with initial concentrations of 20 and 60 mg.L⁻¹ respectively.

Keywords: Activated carbon, effluent treatment, collectors, mineral flotation, adsorption, packed column.

1. INTRODUCCIÓN

Conforme avanza el tiempo también avanza la industria y los desechos que se producen por los numerosos procesos. Cerca de 2 millones de toneladas de efluentes líquidos se descargan todos los años en cuerpos de agua limpios de contaminantes (*WELCOME TO THE NORMAN NETWORK | NORMAN*, n.d.). Los efluentes líquidos contienen desde sólidos coloidales hasta iones disueltos que incluyen aniones y cationes algunos de los cuales podrían ser muy tóxicos (Yan et al., 2016).

El desarrollo industrial de una nación se puede medir en base a los desechos que genera. Los efluentes industriales requieren ser tratados para poder disminuir los contaminantes a un grado

en el que sea posible poder recuperar el elemento agua y que siga como parte de la naturaleza sin que afecte a los ecosistemas presentes. De manera económica, el tratamiento de efluentes tiene efectos significativos en la recuperación del agua y en la prevención de escasez de esta. El desarrollo industrial tiene un papel crucial para el incremento de la productividad, ciencia y tecnología, por lo tanto, también es imperativo que haya avances en el tratamiento de los efluentes que emite la misma industria (Sathya et al., 2022).

La flotación es un proceso de concentración de minerales mediante el cual se logra una separación selectiva de ciertos materiales los cuales poseen propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas, todo esto mediante el uso de ciertos reactivos como el amil xantato de potasio y el dietil ditiofosfato de sodio que pueden alterar de manera selectiva la hidrofobicidad de la

superficie de estos materiales y lograr una gran variedad de separaciones (Zhang et al., 2021).

En Ecuador aproximadamente se emplean 166 540 m³ de agua diarios para procesar 60 000 toneladas de material por parte de ECSA y 16 800 m³ se desechan al día en el proyecto Fruta del Norte donde se encuentra la minera Lundin gold (Informe Sobre Los Impactos Ambientales y Sociales Del Proyecto Minero Mirador, 2019; Sustainability Report 2020 BUILDING A LEADING GOLD COMPANY THROUGH RESPONSIBLE MINING 2020 Sustainability Performance Data Tables, 2020). La emisión de efluentes industriales sin restricciones es una de las principales causas de la liberación espontánea de sustancias peligrosas en el agua. Se ha podido identificar que muchos de estos efluentes generan consecuencias a largo plazo como cáncer, desordenes inmunológicos, enfermedades pulmonares y respiratorias (*Big Data-Its Relevance and Impact on Industrial Statistics*, 2017).

El amil xantato de potasio es realmente tóxico, afecta en gran cantidad a la fauna acuática cuando se filtra en el agua. Además, cuando se sobreexpone a humedad y temperaturas elevadas se descompone en bisulfito de carbono el cual es tóxico e inflamable (*Canadian Centre for Occupational Health and Safety*, 2004). Mientras que el dietil ditiofosfato de sodio afecta al sistema nervioso central de los seres vivos que lo ingieren, sean acuáticos o terrestres. De la misma forma, este colector se descompone con el tiempo y provoca un desequilibrio fósforo-nitrógeno en el ecosistema al liberar grandes cantidades de fósforo en el agua (Yan et al., 2016).

Numerosos trabajos enfocados en el tratamiento de efluentes se han realizado en la última década. Algunos de estos como separación con membrana, osmosis inversa, degradación foto-fenton, degradación sonoquímica, degradación electroquímica y coagulación/floculación, etc. Todos estos métodos se han aplicado, pero la adsorción los supera en el tratamiento de efluentes industriales debido a su alta eficiencia (Garba et al., 2019).

El tratamiento ultravioleta es caro, y pierde efectividad con la turbidez del agua. La osmosis inversa necesita un gran aporte de energía, en rango de flujo bajo vuelve al agua ácida y no puede remover ciertos compuestos orgánicos. La nanofiltración involucra un gasto muy alto de energía y requiere un pretratamiento; se encuentra limitado en la retención de ciertas sales y de iones monovalentes, de igual forma presenta un costo elevado (Lin et al., 2016).

La ultrafiltración requiere altos costos energéticos, presenta dificultad de limpieza y no puede remover inorgánicos disueltos. La coagulación y la floculación es un método que presenta una eficiencia menor y es más complejo, requiere aditivos alcalinos para alcanzar valores óptimos de pH. La oxidación es un método que desde el punto de vista técnico funciona ya que logra la degradación del contaminante de interés, pero es un proceso con altos costos de operación y en numerosas ocasiones genera contaminación secundaria; ya que, los componentes intermediarios que se generan durante la oxidación son más tóxicos y complicados de remover que el reactivo principal. En el tratamiento de fosfatos el proceso de

oxidación genera al menos 5 compuestos intermediarios que dependen directamente de la cadena de carbonos que posea. En la oxidación de la anilina aerofloat con hipoclorito de sodio se generan 14 compuestos intermediarios (Lin et al., 2016).

El tratamiento biológico es complicado de controlar y requiere de períodos de tiempo altos, es de igual forma susceptible a microorganismos externos y factores medioambientales (Fu et al., 2018; Garba et al., 2019). En algunas situaciones para tratamiento se ha estudiado el empleo de biorreactores de membrana, el cual es un método alternativo de tratamiento para efluentes industriales debido a su costo de operación, pero que tiene como carencia el depender de colonias microbianas dinámicas que se inhiben en algunos casos en presencia de reactivos de flotación orgánicos concentrados (Erkan et al., 2017; Lin et al., 2017). Los procesos de oxidación avanzada que incluyen el uso de ozono, reactivos fenton, procesos de foto catálisis y foto electro oxidación han tenido buenos resultados con altos porcentajes de descomposición de compuestos colectores de flotación y sus intermediarios que oscilan alrededor del 90 %; sin embargo, los procesos deben realizarse de forma individual para cada contaminante y adicionalmente son costosos (Fu et al., 2018). Sin embargo, en algunos procesos de oxidación avanzada, por diversas causas pueden ir desde la ineficiente recolección de luz visible, diseño del foto-reactor, recuperación, reutilización hasta el poder extrapolar el método a otra escala (Bora & Mewada, 2017).

La adsorción en carbón activado presenta un manejo sencillo, altos valores de eficiencia, bajos costos y no presenta subproductos tóxicos como otros métodos. Al comparar la adsorción en Bach con adsorción en columna de lecho fijo presenta ciertas ventajas por la facilidad de manejo. La adsorción en columnas de lecho fijo puede tratar grandes volúmenes de efluentes y alcanzar valores de remoción superiores al 90 %. Además, esta forma de remoción se puede escalar fácilmente a una aplicación industrial (Lemus et al., 2017). Es esencial describir de manera precisa la cinética de la adsorción, de esta manera se compara la adsorción predicha mediante modelos de adsorción con el comportamiento real del experimento en diferentes sistemas y en diferentes condiciones (Gerçel & Gerçel, 2007; Largette & Pasquier, 2016). Incluso, en su investigación Maldonado & De la Torre, 2020; demuestran la efectividad del carbón activado frente a estos colectores. En las figuras 1 y 2 se observan valores de eficiencia de remoción de estos colectores con diferentes tipos de carbón activado, y se denota que uno de los mejores carbones a la hora de la remoción activado fue un carbón de superficie específica media macroporoso, seguido por un carbón de superficie específica alta (1 200 m².g⁻¹) que alcanzo casi el 100 % de remoción para el amil xantato de potasio y valores superiores al 80 % para el dietil ditiofosfato de sodio, esto corrobora que el carbón activado es un potencial aliado a la hora de remover colectores de las soluciones (Maldonado & De la Torre, 2020).

La determinación de los parámetros en los modelos de adsorción permite la optimización del proceso, y explica la relación que posee las características de la superficie del carbón activado junto con el adsorbato, y esto da como lugar

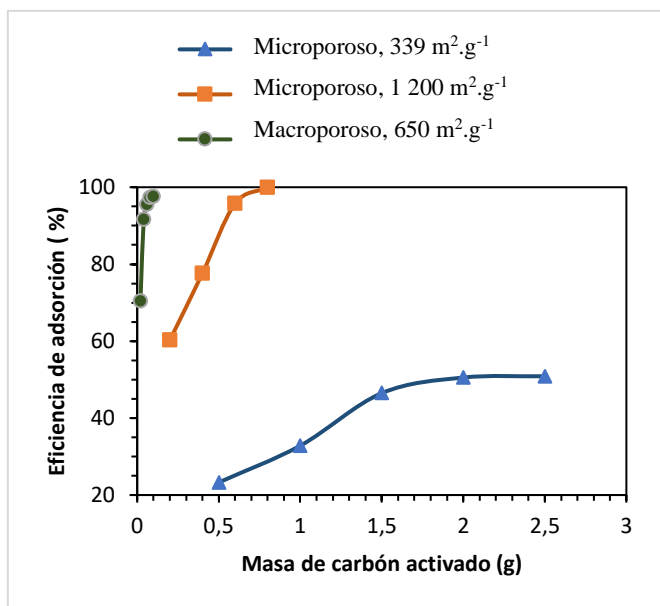


Figura 1. Eficiencias del proceso de adsorción del amil xantato de potasio en carbón activado con concentración inicial de 50 mg.L⁻¹ (Maldonado & De la Torre, 2020)

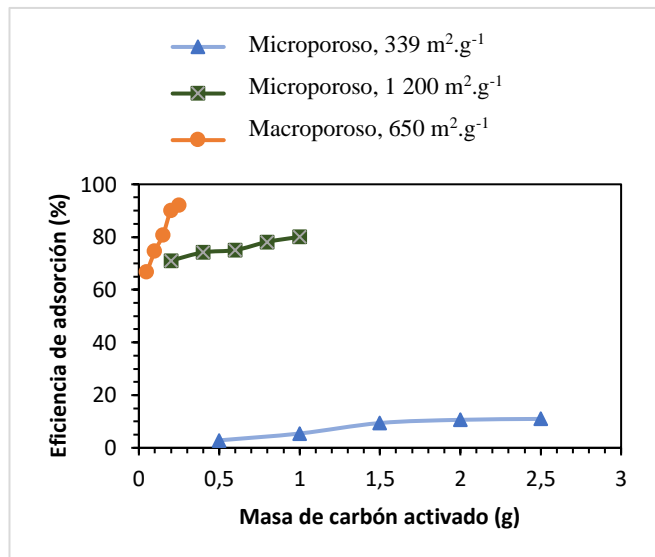


Figura 2. Eficiencias del proceso de adsorción del dietil ditioposfato de sodio en carbón activado con concentración inicial de 75 mg.L⁻¹ (Maldonado & De la Torre, 2020)

a los resultados obtenidos de la adsorción (Gerçel & Gerçel, 2007; Largitte & Pasquier, 2016).

El carbón activado mediante tratamiento químico puede obtener una mayor porosidad y capacidad de adsorción, esto dependerá del tipo de agente oxidante que se vaya a emplear, algunos de estos agentes pueden ser: el ácido sulfhídrico, ácido nítrico o el ácido sulfúrico. El carbón puede obtener ciertos grupos funcionales por el tipo de agente empleado en el tratamiento químico, estos grupos funcionales influyen en la capacidad de adsorción del carbón activado (Kim & Bai, 2022). Una aplicación de esto es el carbón activado modificado químicamente que se emplea en chimeneas para conversión de NO en N₂, debido a los grupos funcionales que posee después de ser tratado permite recuperaciones de hasta el 80% de este compuesto (Ye et al., 2022).

El presente trabajo tiene como objetivo la remoción de tensoactivos colectores como el amil xantato de potasio y el dietil ditioposfato de sodio que se emplean en la flotación de minerales mediante pruebas en lecho fijo y agitado, para comparar entre pruebas, de esta manera determinar la mejor forma de mejorar la calidad de los efluentes y reducir el impacto negativo que se genera en el medio ambiente. Esta investigación se ha enfocado en la remoción de estos agentes que son los colectores más usados en la flotación de sulfuros.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales y reactivos

Los reactivos empleados para las soluciones a tratarse fueron amil xantato de potasio (50 mg.L⁻¹), dietil ditioposfato de sodio (75 mg.L⁻¹), silicato de sodio (50 mg.L⁻¹) y aceite de pino (50 mg.L⁻¹) de grado técnico, los agentes para controlar el pH fueron una solución de sosa cáustica al 10 % y una solución de ácido sulfúrico 1 N de grado técnico. Para separar el carbón activado de las soluciones tratadas se emplearon tierras de diatomeas tipo hyflo y papel filtro cuantitativo.

Para el tratamiento químico del carbón activado (1 200 m².g⁻¹) se empleó ácido nítrico de grado analítico y urea de grado agrícola. Se empleó carbón activado de alta superficie específica. Para la digestión del dietil ditioposfato de sodio se usaron el persulfato de potasio, ácido ascórbico, tartrato de antimonio y potasio y molibdato de amonio.

2.2 Determinación de la concentración de amil xantato de potasio y dietil ditioposfato de sodio mediante espectrofotometría uv-visible.

Los colectores se analizaron por espectrofotometría uv-visible el cual es un método que tiene la capacidad de relacionar concentraciones con intensidad de coloración.

2.2.1 Curva de calibración del amil xantato de potasio

Se elaboró una curva de calibración para la medición de la concentración de amil xantato de potasio en función de la absorbancia medida en un espectrofotómetro UV-visible marca Perkin Elmer, a una longitud de onda de máxima absorbancia de 300 nm que fue determinada previamente por un barrido espectral en un rango de 200-900 nm.

La curva de calibración se obtuvo a partir del análisis de soluciones de amil xantato de potasio con diferentes concentraciones: 0,05; 2,50; 5,00; 10,00 y 25,00 mg.L⁻¹.

2.2.2 Curva de calibración dietil ditioposfato de sodio

Se elaboró una curva de calibración para la medición de la concentración de dietil ditioposfato de sodio en función de la absorbancia medida en un espectrofotómetro UV-visible marca Perkin Elmer. Se realizó un barrido espectral en un rango de 200-900 nm y se determinó que el dietil ditioposfato de sodio 208 no presenta picos de absorbancia en el rango UV-visible. Mediante una reacción de derivatización se logró obtener una coloración llamada azul de molibdeno; la cual

presenta una longitud de onda de máxima absorbancia a 890 nm.

Se prepararon soluciones de dietil ditioposfato de sodio con diferentes concentraciones: 5, 10, 20, 50, 80 y 100 mg.L⁻¹. En un ensayo típico de reacción de derivatización, se tomaron 100 mL de cada solución de dietil ditioposfato de sodio que fueron vertidos en un reactor autoclave. Para realizar la digestión del dietil ditioposfato de sodio y de esta manera formar ortofosfatos se añadió 1 g de persulfato de potasio a cada reactor y se calentó por 1 h aproximadamente (80 °C). Una vez se encontraban las soluciones a temperatura ambiente, se añadieron 8 mL de un complejo de antimonio-fosfomolibato y se agitó de manera manual con fuerza constantemente por 1 min.

Para la preparación de 100 mL del complejo de antimonio-fosfomolibato se emplearon 50 mL de ácido sulfúrico 5 N, 5 mL de tartrato de antimonio y potasio de grado analítico, 15 mL de molibdato de amonio de grado analítico y 30 mL de solución de ácido ascórbico 0,01 M; estos reactivos previamente mencionados estuvieron a temperatura ambiente previo a su mezcla (Ferreira et al., 1993). El producto de la reacción de los ortofosfatos con el complejo de antimonio-fosfomolibato presentó una coloración azul típica de este producto. Se esperaron 10 min para que el complejo de antimonio-fosfomolibato reaccione y la solución alcance la coloración azul más intensa. La intensidad del color azul fue proporcional a la concentración de dietil ditioposfato de sodio.

Se determinó la absorbancia del producto obtenido de la reacción de derivatización a una longitud de onda de 890 nm y con la concentración de dietil ditioposfato de sodio construyó la curva de calibración.

2.3 Ensayos de adsorción de colectores

2.3.1 Ensayos con solución sintética en lecho agitado

Se preparó una solución con concentración de 50,00 mg.L⁻¹ de amil xantato de potasio, 75,00 mg.L⁻¹ de dietil ditioposfato de sodio, 50,00 mg.L⁻¹ de silicato de sodio y 50,00 mg.L⁻¹ de aceite de pino, todo en base al 33 % de sólidos usado en pulpas en industrias mineras.

El carbón de alta superficie específica se lavó previamente con agua destilada para evitar cualquier contaminante. En 4 reactores se colocaron 200 mL de solución sintética de colectores y se añadieron 0,25; 0,5; 0,75 y 1,0 g de carbón activado de alta superficie específica y se sometió a agitación en un agitador rotatorio (60 rpm) por aproximadamente 24 h.

Una vez finalizada la agitación se filtraron las muestras, para esto se añadieron 1,0 g de tierra de diatomeas por cada reactor. En las muestras filtradas, para el análisis de fósforo residual se realizó la digestión del fósforo mencionado en el acápite 2.3, se determinaron las concentraciones de xantato y fósforo residual por espectrofotometría UV-VIS a una longitud de onda de 300 nm y 880 nm, con ayuda de las curvas de calibración realizada.

Con estos valores se obtendrán las isotermas de adsorción que permitirán determinar la remoción de estos contaminantes en el carbón y como interactúan.

2.3.2 Ensayo de adsorción con efluente acuoso en lecho agitado

2.3.2.1 Preparación del efluente

Para la obtención del efluente acuoso, se realizó un proceso de molienda con 1 kg de mineral proveniente de ECSA en 600 mL de agua durante 30 min. Se preparó una solución de amil xantato de potasio, dietil ditioposfato de sodio, aceite de pino y de silicato de sodio, todas al 1 (% w/w). La pulpa obtenida en la molienda se procesó en una celda de flotación DENVER, para dar inicio se añadieron 1400 mL de agua. En agitación constante se añadieron 5 mL de la solución de silicato de sodio y se dejó acondicionar 5 min. Luego, se añadieron 10 mL de amil xantato de potasio al 1(% w/w), se dejó acondicionar 1 min. A continuación, se añadieron 10 mL de dietil ditioposfato de sodio al 1(% w/w) y se dejó acondicionar durante 1 min. Se adicionaron 5 mL de aceite de pino al 1(% w/w) y se dejó acondicionar durante 1 min, se abrió el paso del aire y se recogió el concentrado de desbaste por aproximadamente 5 min. Se adicionaron 800 mL de agua en la celda y se repitió el proceso ya mencionado en la adición de los reactivos y obtención del concentrado, este segundo paso tuvo el nombre de concentrado de colección. Se decantó las mezclas sólido-líquido de la celda y los dos concentrados obtenidos, y con sifonado se obtuvo la solución de efluente acuoso.

2.3.2.2 Ensayo de adsorción

Una vez terminada la flotación se repitió el procedimiento de remoción con el carbón activado que se menciona en el acápite 2.3.1.

2.4 Ensayos con efluente acuoso en lecho fijo

Se repitió el procedimiento de la flotación mencionado en el acápite 2.3.2.1 Una vez terminada la flotación se procedió a armar una columna empacada con carbón activado de alta superficie específica. La columna empacada se armó con tubo de pvc de 0,18 m con un diámetro interno de 0,045m. Para iniciar un flujo completo por toda la columna se añadió una capa de gravilla en la parte superior y en la parte inferior con 0,015 m de espesor. La solución empleada para el experimento se bombeó con ayuda de una bomba peristáltica. Se puede observar en la figura 3 el esquema de la columna empacada empleada en el experimento. Se determinó la porosidad intergranular (θ) mediante inmersión con agua. El material de la columna se humedeció con agua hasta llegar a la saturación, una vez hecho esto se procedió a retirar el exceso de agua y se obtuvo el peso P_o . El material húmedo se llevó a una probeta y se aforó con agua por lo cual se obtuvo el valor P. La porosidad intergranular se determinó con la ecuación 1 (Casame, 2017).

$$\theta = (P - P_o) / (\delta_{H_2O} V_{mf}) \quad [1]$$

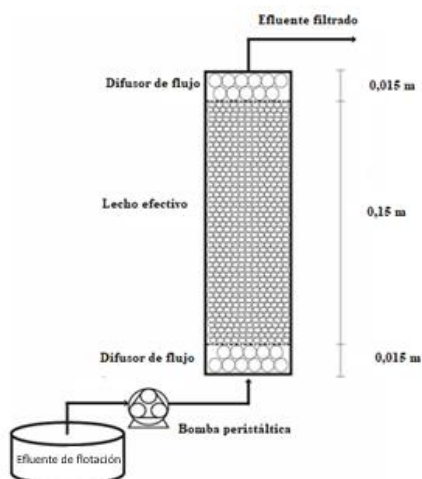


Figura 3. Esquema del sistema de filtración en lecho fijo

En donde P es el peso del medio filtrante llevado a saturación con agua, Po es el peso del material adsorbente humedecido, δ_{H_2O} es la densidad del agua, V_{mf} es el volumen que ocupa el material adsorbente en la columna. En las columnas empacadas el suministro del flujo debe ser siempre continuo para que de esta manera se pueda determinar la velocidad intersticial promedio v , mediante la ecuación 2 (Casame, 2017).

$$v = \frac{Q}{A\theta} \quad [2]$$

En donde, Q es el flujo que entra en la columna, A es el área transversal de la columna y θ es la porosidad intergranular del medio filtrante. Posteriormente, se tomó una solución blanco de colectores para poder acondicionar el material adsorbente de la columna al pH de trabajo. Se ingresó un aproximado de 3 volúmenes de poro intergranular (VPI) de la solución blanco a la columna empacada. Se puede conocer que el VPI es el volumen que se encuentra contenido entre todo el agente adsorbente y se rige por la ecuación 3 (Casame, 2017).

$$VPI = A_o \times L \times \theta \quad [3]$$

Donde A_o es el área transversal de la columna, L es la longitud del lecho fijo y θ la porosidad intergranular

2.4.1 Evaluación de remoción de colectores en filtro de columna empacada.

Una vez alimentado el efluente acuoso a la columna empacada de forma ascendente hasta alcanzar los 21,70 cm³ (1 VPI) se tomaron alícuotas cada 15 VPI de la solución obtenida para poder analizar la capacidad de remoción de la columna empacada mediante espectrofotometría uv-visible. El pH se controló a lo largo de todo el proceso. Se obtuvo el valor de la constante cinética de filtración (k_f) que se puede observar en la ecuación 4.

$$\ln \frac{C}{C_o} = -\frac{k_f}{v} x \quad [4]$$

Dónde C es la concentración a la salida de la columna para cada VPI, C_o es la concentración que ingresa en la columna empacada, k_f es la constante cinética de filtración de la

columna para cada colector, v es la velocidad promedio intersticial y x es la longitud de la columna empacada (Suárez, 2020).

2.5 Activación termoquímica del carbón

Se preparó una solución de HNO₃ 3M y se pesaron 30 g de carbón de alta superficie específica. En un sistema compuesto por un balón con agua como refrigerante se dispuso el carbón y el HNO₃ 3M. El balón se encontró en un baño maría a 60°C durante 6 h. Pasado el tiempo se enfriará por 15 min. Una vez frío se lavó durante 2 h con agua destilada.

Se pesó 50 g de urea (grado agrícola) y se realizó un aforo con agua destilada a 500 mL, se agitó magnéticamente esta solución durante aproximadamente 30 min. El carbón lavado se mezcló con la solución de urea y esta mezcla se agitó magnéticamente durante 1 h. Se realizó la separación del carbón y el sobrenadante que se forma, el carbón húmedo se colocó en cajas Petri y se secó a temperatura ambiente durante toda la noche por aproximadamente 16 h. El carbón seco se colocó en un horno tubular Nabertherm a 450 °C en atmósfera de Nitrógeno por aproximadamente 4 h. Este carbón activado con urea se analizó mediante FTIR y de esta manera se determinaron los grupos funcionales que se añadieron mediante el tratamiento con ácido y urea.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Propiedades del carbón activado de alta superficie específica y dimensiones de los colectores empleados.

En la tabla 1 se presentan las propiedades del carbón activado de alta superficie específica empleado en el presente experimento. La Tabla 2 presenta las dimensiones del Amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato de sodio. Además, se presentó los valores máximos y mínimos del diámetro tanto del Amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato de sodio. Los valores máximos y mínimos hacen referencia a la esteroisomería presente en ambas moléculas (Iriondo & Martínez, 2013). En la figura 4 se presentan las estructuras moleculares de ambos colectores.

Tabla 1. Características físicas del carbón activado empleado

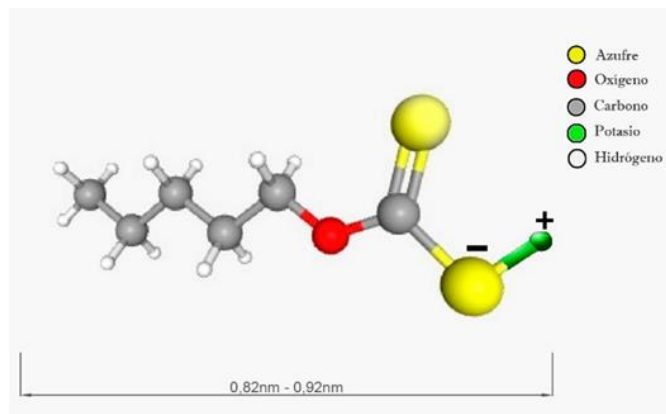
Propiedades	Carbón de alta superficie específica
Materia prima	Cuesco de coco
Activación	Vapor de agua a alta temperatura
Superficie específica m ² .g ⁻¹	1025
Superficie de microporo m ² .g ⁻¹	844
Diámetro medio de los poros (nm)	2,9
Diámetro medio de los microporos (nm)	0,65
Volumen de microporo máximo (cm ³ .g ⁻¹)	0,47
Índice de yodo (mg I ₂ .g ⁻¹)	1070
Índice de azul de metileno (g.100g ⁻¹)	0,9
Índice de decoloración de azúcar (UBR)	181

Fuente: De la Torre, 2015

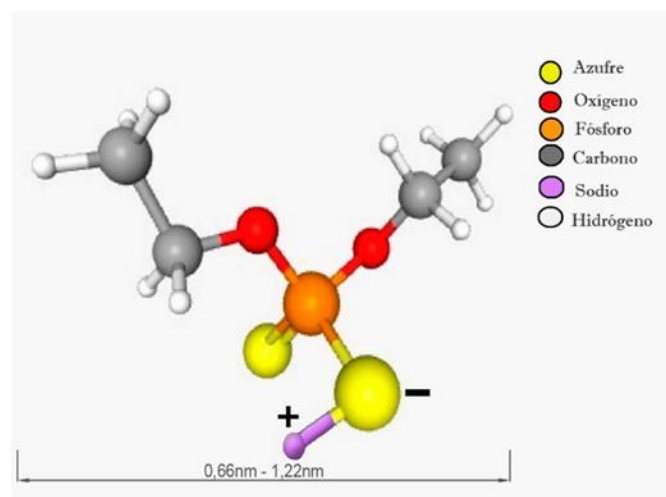
Tabla 2. Dimensiones del diámetro del amil xantato de potasio y del dietil ditioposfato de sodio

Geometría	Amil xantato de potasio	Dietil ditioposfato de sodio
Diámetro mínimo de proyección (nm)	0,66	0,82
Diámetro máximo de proyección (nm)	1,22	0,92

Fuente: Chemicalize, 2020



(a)



(b)

Figura 4. Estructura molecular a. amil xantato de potasio, b. dietil ditioposfato de sodio

(NIH, 2020)

3.2. Ensayos de adsorción de colectores en carbón activado de alta superficie específica en lecho agitado

3.2.1. Isoterma de Freundlich para remoción de colectores de un efluente sintético con carbón activado de alta superficie específica

La figura 5 presenta las isotermas de adsorción del amil xantato de potasio a pH 7 y pH 10 proveniente de una solución sintética de flotación y en la figura 6 se pueden observar las isotermas de adsorción pertenecientes al dietil ditioposfato de sodio de la misma forma proveniente de una solución sintética.

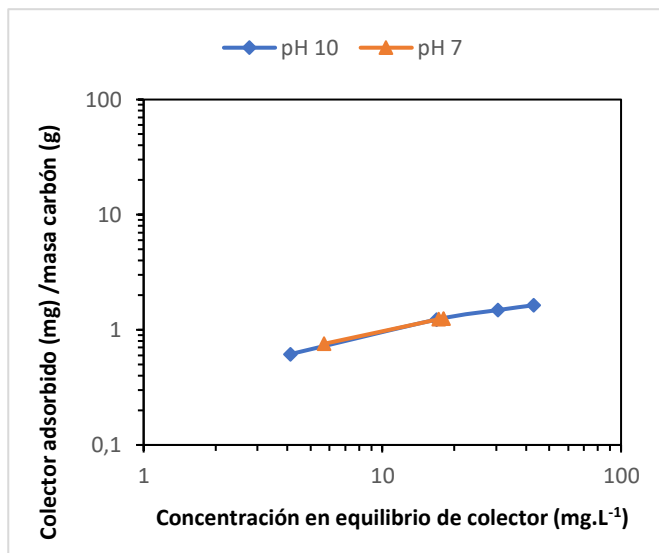


Figura 5. Isotermas de adsorción amil xantato de potasio en carbón activado de alta superficie específica-

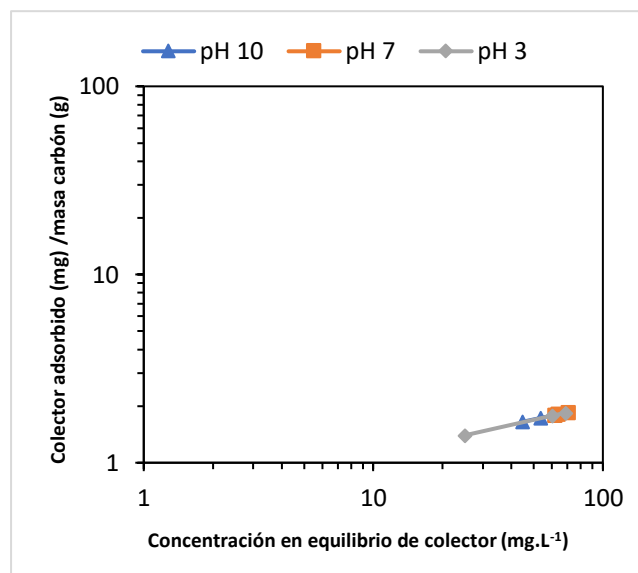
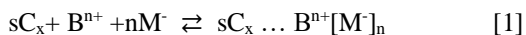


Figura 6. Isotermas de adsorción del dietil ditioposfato de sodio en carbón activado de alta superficie específica

Se observó que el carbón de alta superficie específica presentó una capacidad de adsorción superior del amil xantato de potasio a pH 10 y pH 7, en este caso en particular a pH 3 no se tiene una isoterma porque el amil xantato de potasio a pH ácidos por debajo de 5 tiene a degradarse por sí mismo. Se observó que el dietil ditioposfato de la misma manera presentó una adsorción aceptable a todos los valores de pH, pero se aprecia que a pH 3 se da la adsorción de una manera más marcada con respecto a los otros valores de pH, a diferencia del amil xantato de potasio que se degrada en gran parte por el pH ácido, el dietil ditioposfato es más resistente a la degradación. En su investigación, De la Torre, 2015; establece que las moléculas que se adsorben sobre el carbón activado lo hacen como moléculas neutras ya que previamente se han asociado a cationes presentes en la solución. Esto se puede representar mediante la ecuación 1 y se obtiene del modelo de adsorción del complejo cianurado en carbón activado.



Donde:

sC_x : Superficie del carbón activado

B^{n+} : Cation alcalino, alcalino terreo o hidronio (H^+ , Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} o Mg^{2+})

$sC_x \dots B^{n+}[M^-]_n$: Especie adsorbida en carbón activado

La reacción de adsorción es reversible mediante un aumento ya sea en la concentración de los colectores o de la temperatura (De la Torre, 2015).

3.2.2. Isoterma de Freundlich para remoción de colectores de un efluente acuoso con carbón activado de alta superficie específica.

En la figura 7 se presentan las isotermas para el amil xantato de potasio a los distintos valores de pH y en la figura 8 se presentan las isotermas para el dietil ditioposfato de sodio, ambas figuras presentan una adsorción en un efluente acuoso de flotación.

En la tabla 3, se observa el valor de la concentración final a pH 3 para el amil xantato de potasio, que a pH ácido se degrada, entonces la remoción se debió más que todo a una degradación del colector.

La adsorción del dietil ditioposfato de sodio la adsorción más baja se presenta a valores de pH 3, a este valor de pH se observa que conforme aumenta el valor de colector también decrece la cantidad que se adsorbe en el carbón activado, esto puede darse debido a un cambio de carga en el dietil ditioposfato como consecuencia del pH al que se trabaja. Mientras que a valores de pH neutro y básico la adsorción del colector en el carbón activado se mantiene constante de manera independiente con la concentración del colector en el equilibrio.

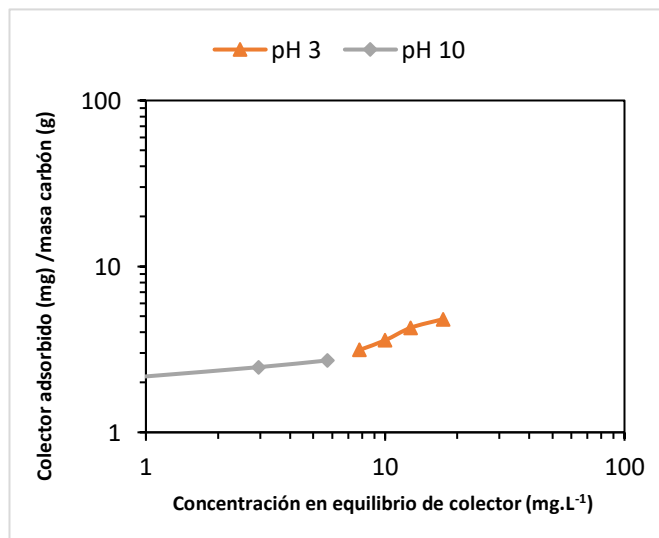


Figura 7. Isotermas de adsorción del amil xantato de potasio en carbón activado de alta superficie específica

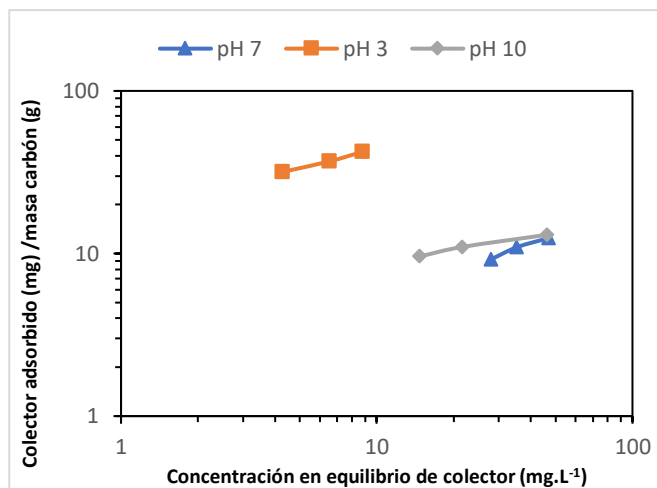


Figura 8. Isotermas de adsorción del dietil ditioposfato de sodio en carbón activado de alta superficie específica

Tabla 3. Valor de concentración final de amil xantato de potasio con su respectivo pH

pH	Concentración final (mg.L ⁻¹)	Recuperación (%)
3	< 0,5	> 99,9

De la misma forma se sabe que el diámetro mínimo del dietil ditioposfato de sodio es 0,82 nm, y el diámetro del tamaño medio de los microporos es de 0,65 nm, por lo cual la adsorción de este colector se limita a los mesoporos que se ubican en la estructura del carbón activado, pero en estos mesoporos la fuerza de adsorción es menor, al no existir tantos puntos de contacto entre el adsorbato y el adsorbente (De la Torre, 2015; NIH, 2020). En la adsorción con carbón activado uno de los aspectos que se debe tomar en cuenta la relación existente entre la distribución de tamaño del poro y las dimensiones del adsorbato, debido a que compuestos con ciertas dimensiones se adsorberán en poros con dimensiones similares, se puede concluir que existen más puntos de contacto entre el adsorbente y el adsorbato; como consecuencia, más energía favorable de adsorción (Newcombe et al., 1997).

La exclusión de tamaño limita la adsorción por factores como el tamaño y la forma, en sistemas acuosos esto se puede denotar cuando el diámetro del poro es menor a 1.7 veces la segunda dimensión más larga del adsorbato (Li et al., 2002).

En las isotermas del amil xantato de potasio se puede observar que a pH 7 al aumentar la concentración del colector también aumenta el colector adsorbido en el carbón activado de manera pronunciada, de la misma forma para los valores de neutro y básico, se puede diferenciar que se mantienen constantes a con la cantidad del colector adsorbido con respecto a la concentración del colector.

3.3. Modificación termoquímica del carbón activado

En la figura 9 que se observa a continuación, se aprecian los espectros de los carbones activados empleados en esta sección. En la tabla 4 se pueden observar los grupos funcionales identificados en los espectros empleados.

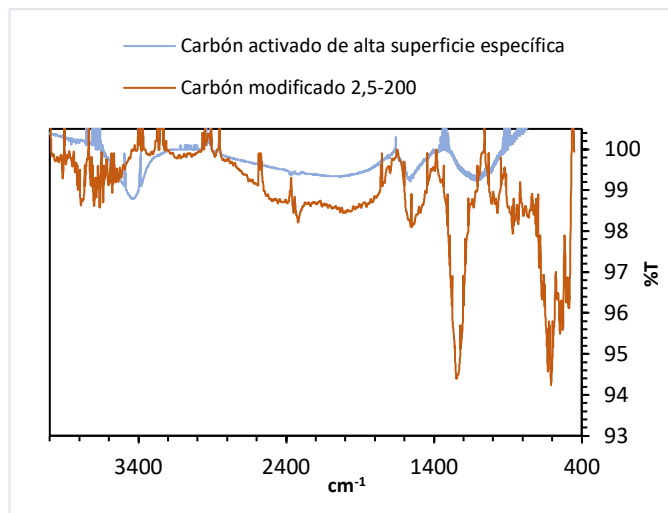


Figura 9. Espectro infrarrojo del carbón activado normal y el carbón activado químicamente modificado.

Tabla 4. Grupos funcionales de los espectros

Tipo de carbón	Grupo funcional	Rango (cm ⁻¹)
Carbón activado microporoso de alta superficie específica	O-H t	~3400
	C-O t	1260-1000
	N-H d	1640-1550
Carbón activado microporoso modificado	C,N t (triple enlace)	~2250
	N-H d	1640-1550
	C-N t (alquil)	1200-1025
	C-H d	~970
	N-H d	~800
	C-Br t	650-510
	C-Cl t	785-540

Fuente: Quiored, 2003

Se pueden apreciar los picos del carbón activado microporoso de alta superficie específica que se presentan por naturaleza junto con el espectro que posee el carbón activado una vez ha sufrido el tratamiento térmico y químico. En este caso se puede observar un cambio notorio en el espectro de ambos carbones, estos grupos funcionales nuevos como el N-H d a ~800 cm⁻¹, C-N t (alquil) a 1200-1025 cm⁻¹, C,N t (triple enlace) a ~2250 cm⁻¹ que forman parte de la estructura del carbón modificado afectaron su capacidad de adsorber los colectores.

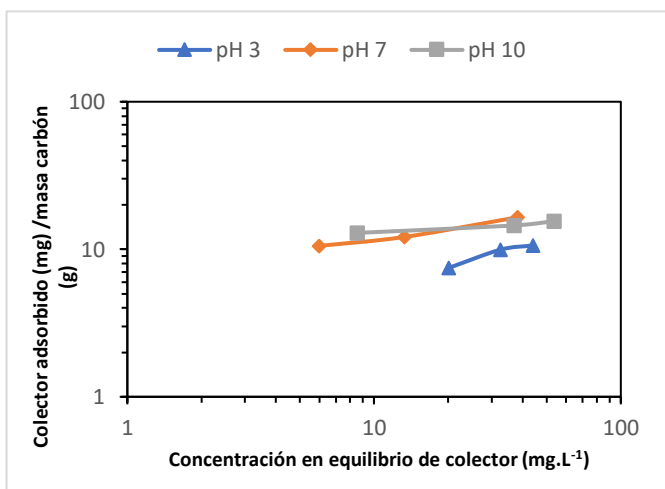


Figura 10. Isothermas de adsorción del dietil ditioposfato de sodio en carbón activado microporoso de alta superficie específica modificado.

Tabla 5. Valores de concentración final de amil xantato de potasio con su respectivo pH

pH	Concentración final (mg.L ⁻¹)	Recuperación (%)
3	< 0,5	> 99,9
7	< 0,5	> 99,9
10	< 0,5	> 99,9

3.3.1. Isotherma de Freundlich para remoción de colectores de un efluente acuoso con carbón activado de alta superficie específica químicamente modificado

En la figura 10 se observan las isothermas de adsorción del dietil ditioposfato proveniente de un efluente acuoso, en este caso la adsorción se realizó con un carbón modificado. En la tabla 5 se pueden observar los valores de remoción para el amil xantato de potasio con el carbón activado modificado. En este caso el carbón a tener un pH ácido, se atribuye la remoción es su mayoría a la degradación del colector. En la figura 10 se puede apreciar que para el caso del dietil ditioposfato de sodio los valores más bajos de adsorción se dan a un pH de 7 aunque si bien se adsorbe menor cantidad a mayores concentraciones del colector en equilibrio, el aumento que tiene del colector adsorbido en el carbón activado con respecto a la concentración en equilibrio. En pH 10 se puede observar que presenta valores aceptables de adsorción y se denota que a mayor concentración del colector en equilibrio se da una mejor adsorción del colector en equilibrio. Los valores más alto de adsorción se dan a pH 3 con un aumento de la cantidad de colector adsorbido con respecto a la concentración de equilibrio del colector presente en la solución. Para el caso del amil xantato de potasio, la adsorción fue excelente por lo cual, como consecuencia con cualquier dosificación de carbón activado se lograba remover por completo el xantato.

3.3.2. Isotherma de Freundlich para remoción de colectores de un efluente sintético con carbón activado de alta superficie específica químicamente modificado.

A continuación, se presentan en las figuras 11 y 12 las isothermas de adsorción para el amil xantato de potasio y para el dietil ditioposfato de sodio con carbón activado de alta superficie específica químicamente modificado. En la tabla 6

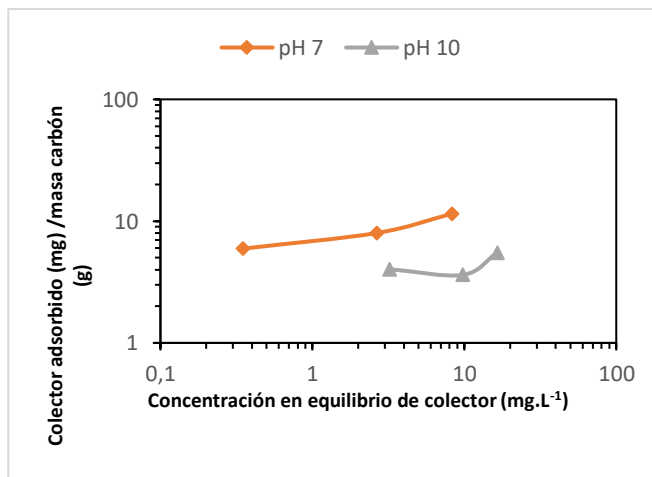


Figura 11. Isothermas de adsorción del amil xantato de potasio en carbón activado microporoso de alta superficie específica modificado.

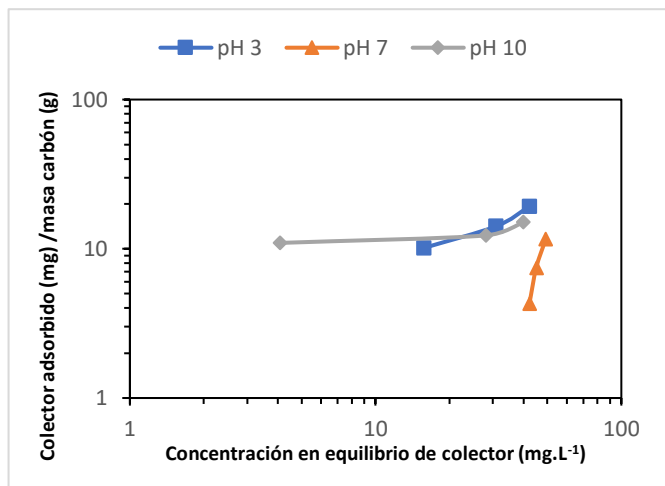


Figura 12. Isotermas de adsorción del dietil ditioposfato de sodio en carbón activado microporoso de alta superficie específica modificado.

Tabla 6. Valor de concentración final de amil xantato de potasio con su respectivo pH

pH	Concentración final (mg.L ⁻¹)	Recuperación (%)
3	< 0,5	> 99,9

se observa el valor de concentración final del amil xantato de potasio a pH 3 el cual al ser un pH ácido sufrió degradación. En la figura 11 se puede apreciar que para el dietil ditioposfato de sodio se da una adsorción aceptable para un pH de 10, mientras que para un pH de 3 se vuelve más marcada la adsorción para una concentración de equilibrio más alta y a partir de cierta concentración la concentración del colector se mantiene constante, esto se puede dar principalmente porque a mayor cantidad de concentración del colector, hay una mayor probabilidad de impacto entre el adsorbato y el adsorbente, y como consecuencia se tiene una mayor adsorción de moléculas de dietil ditioposfato de sodio en la superficie del carbón activado. De la misma forma los grupos funcionales que presentó el carbón activado modificado influyeron en la adsorción, los grupos funcionales producto de oxidación aumentaron un poco la capacidad de adsorción de estos colectores en la superficie del carbón, de la misma forma el colector debido al proceso oxidativo que tuvo tiende a una estructura con una mayor cantidad de microporos producto de la oxidación.

Además, los potenciales de adsorción se superponen cuando el diámetro del ancho del poro llega a ser menor al doble del diámetro de la molécula que se va a adsorber, la fuerza generada por aquella superposición, tienen como consecuencia la adsorción del adsorbato y evita que este salga de la estructura del microporo (Li et al., 2002).

En la figura 12 se puede observar que para el pH 7 se puede denotar que la adsorción que se da es aceptable, dado que con valores positivos mínimos de concentración del amil xantato de potasio en la solución este se empieza a adsorber en la superficie del carbón activado modificado, de la misma forma hay que recalcar que el tamaño de la molécula del amil xantato de potasio tiene similitud con el diámetro medio de los poros presentes en el carbón activado microporoso. Y a pH 10 la adsorción se empieza a dar, pero llegado un punto esta se

detiene y se mantiene constante con la concentración en equilibrio del colector, pudo darse ya que el pH del carbón activado modificado es ácido por el tratamiento que tuvo, y hay ciertos grupos funcionales a determinados pH cambian su carga eléctrica y la carga eléctrica presente en la superficie del carbón activado, lo que pudo tener la consecuencia directa que la adsorción se mantenga constante

3.4. Ensayos de adsorción de colectores en carbón activado de alta superficie específica en lecho fijo

A continuación, se presenta en las figuras 13 y 14 se aprecian las curvas de saturación de la columna de carbón activado para ambos compuestos colectores.

En la tabla 7 se observa los parámetros para la curva de filtración en lecho fijo.

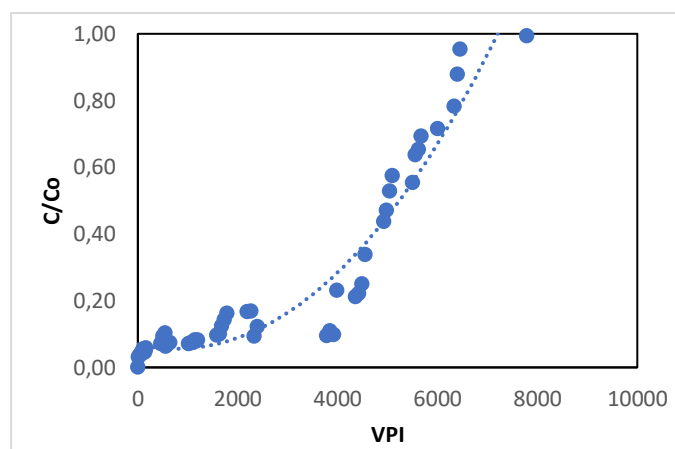


Figura 13. Curva de saturación para el amil xantato de potasio en lecho fijo.

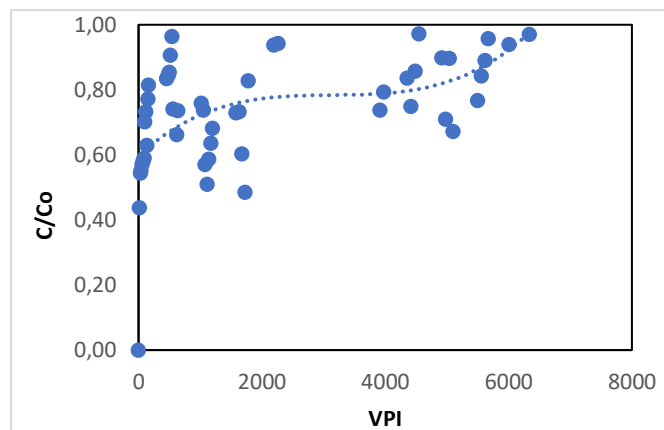


Figura 14. Curva de saturación para el dietil ditioposfato de sodio en lecho fijo.

Tabla 7. Parámetros de la curva de filtración para ambos colectores en columna empacada

Parámetro	Amil xantato de potasio	Dietil ditioposfato de sodio
Velocidad intersticial (m/día)	74,5	74,5
Flujo (m ³ /s)	3,6 *10 ⁻⁴	3,6 *10 ⁻⁴
Porosidad	0,3	0,3
Ln(C/Co)	-3,13	-0,83
x(m)	0,15	0,15
k _f (día ⁻¹)	1221,4	323

Se puede observar que la curva para en amil xantato de potasio presenta una adsorción inicial superior al 95 % y el dietil ditiofosfato de sodio con una adsorción superior al 50 %, esto sucede en ambos casos dado que el carbón al inicio se encontraba limpio. En el caso del dietil ditiofosfato hay una diferencia de aproximadamente el 40% en la adsorción, esto puede ser consecuencia directa del tamaño de la molécula de dietil ditiofosfato de sodio, está en comparación con el tamaño del amil xantato de potasio es de mayores dimensiones y por tal motivo, no logra ingresar del todo en los microporos del adsorbente. Hay que recalcar que el carbón activado presenta facilidad para adsorber moléculas polares, ambos colectores empleados en el experimento presentan polaridad, pero el dietil ditiofosfato de sodio al ser una molécula con mayores dimensiones no puede ser adsorbida en la estructura de los microporos que se encuentran en la estructura del carbón activado. La adsorción del dietil ditiofosfato de sodio se limita a los mesoporos del carbón activado que poseen un diámetro medio de 2,9 nm, mientras que la molécula de dietil ditiofosfato de sodio posee un diámetro mínimo de 0,82 nm. Al contrario de lo que ocurre en el caso del amil xantato de sodio que posee un diámetro mínimo de 0,66 nm, mientras que el de los microporos es de 0,65 nm, pero la molécula de amil xantato de potasio al ser una molécula con estructura elongada si logra ingresar en la estructura porosa del carbón, por este motivo tiene una alta adsorción de este colector. En este caso también influye el hecho que en el efluente a limpiar no solo se encuentra contaminado con colectores, también hay depresores como el silicato de sodio, espumantes como el aceite de pino y residuos de la flotación que pueden contener estructuras minerales que no se lograron separar en la flotación y que pueden afectar la capacidad de la adsorción de los colectores ya que el resto de las componentes presentes en la solución también se adsorben en el carbón que se encuentra en la columna. Se denota en la tabla 7 que algunos de los parámetros son iguales para ambos colectores, esto debido a que compartieron la columna empacada en la misma solución, se denota que para el amil xantato de potasio es más notoria la adsorción por el valor del logaritmo de la concentración con respecto a la concentración inicial si se la compara con el valor del dietil ditiofosfato, menor valor del logaritmo indica una mayor adsorción del adsorbato. Mientras que para el valor de la constante k_f se observa que es más alta para el amil xantato de potasio con un valor de 1221.4 día^{-1} con respecto al valor de 323 día^{-1} del dietil ditiofosfato de sodio, esta constante con valores elevados refleja que el adsorbato logra un ingreso exitoso en los microporos del carbón activado y ocupar su estructura, caso contrario pasa con el dietil ditiofosfato que no logra ocupar los microporos del carbón, y pasa a ocupar los mesoporos presentes en su estructura (Chen, 2015; Rivas et al., 2014).

3.5. Eficiencia de la remoción

A continuación, en la tabla 8 se pueden observar los valores de remoción para cada tipo de carbón en todos los valores de pH que se realizó el experimento para ambos colectores. Según el acuerdo ministerial MAE 097-A el valor normado para tensoactivos colectores es de $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ (Ministerio del ambiente, 2015). Se debe recalcar que se tomó como referencia el límite máximo para descarga de efluentes de tensoactivos

Tabla 8. Porcentajes de remoción de colectores en los diferentes experimentos

Tipo de lecho	pH	Efluente sintético		Efluente acuoso	
		Xantato (%)	Fósforo (%)	Xantato (%)	Fósforo (%)
Lecho agitado (carbón activado)	3	100,0	66,7	66,8	40,3
	7	99,8	17,7	100,0	55,2
	10	91,8	40,4	99,0	76,5
Lecho fijo (carbón activado)	7	-	-	97,2	56,3
Lecho agitado (carbón modificado)	3	100,0	76,3	100,0	48,4
	7	100,0	33,7	100,0	89,8
	10	86,2	93,1	100,0	88,3

afines al azul de metileno; dado que no existe un límite de descarga para colectores tensoactivos.

Se observa que los valores más altos de remoción se obtuvieron para el amil xantato de potasio, en la mayoría de los casos se logró obtener remociones del 100 % y en otros casos remociones superiores al 50 %. Mientras que en el caso del dietil ditiofosfato los valores de remoción más alto se alcanzaron con el carbón activado microporoso que se modificó con un tratamiento termoquímico.

A un valor de pH de 3 la remoción presentó el valor más bajo para el dietil ditiofosfato con el carbón modificado, esto pudo darse debido a una saturación del carbón activado, ya que en el efluente acuoso no solo se hallaban colectores, también se podían ver restos de mineral junto con depresores y agentes espumantes del proceso de flotación.

Para el dietil ditiofosfato en efluente sintético y en efluente acuoso los valores más bajos de remoción se pudieron observar a un pH de 7, en este valor de pH el carbón activado no logró remover suficiente dietil ditiofosfato de sodio tanto para el carbón activado microporoso como para el carbón activado modificado.

Los valores de remoción que se obtuvieron para la columna empacada fueron de 97.15 % para el amil xantato de potasio y 56.30 % para el dietil ditiofosfato de sodio, en este caso al ser una remoción que se da en un plazo corto de tiempo se puede denotar que este método de remoción es realmente más eficiente con respecto al método en lecho agitado que se sometió a agitación ininterrumpida por aproximadamente 24 h. En este caso en específico los valores a la descarga de la columna no cumplen los límites para poder ser desechados al ambiente, pero se podrían mejorar ciertos aspectos para alcanzar dicho límite como un aumento del largo en el lecho efectivo o colocar filtros en serie, ambas formas pueden llegar a ser alguna de las alternativas para que se puedan cumplir los parámetros de descarga para los efluentes.

4. CONCLUSIONES

Mediante los ensayos que se realizaron a lo largo del experimento se consiguió disminuir la concentración de los colectores por debajo del límite establecido, 0,5 mg.L⁻¹ de tensoactivos según el acuerdo ministerial MAE 097-A.

El carbón activado microporoso de alta superficie específica normal tuvo valores aceptables de remoción para el dietil ditioposfato de sodio y para el amil xantato de potasio tanto para efluente sintético como acuoso, en este caso al tener un tamaño de microporo de 0.65 nm menor al tamaño del diámetro de la molécula de dietil ditioposfato de 0.82 nm, este último no logró ingresar del todo en la estructura del carbón activado, por lo tanto este carbón es óptimo para adsorber el amil xantato de potasio, pero para el dietil ditioposfato no logró una remoción favorable.

El carbón activado microporoso modificado mediante tratamiento termoquímico presentó los valores más altos de remoción para el dietil ditioposfato de sodio a pH de 7 y 10 con un valor de 89.8 % y 88.3 %, esto en un efluente acuoso, se dio principalmente a que el carbón al estar sometido a un proceso oxidante aumentó su porosidad y agregó nuevos grupos funcionales que influyeron en la adsorción de las moléculas polares presentes en la solución como el dietil ditioposfato de sodio.

La adsorción en lecho fijo presentó valores elevados de remoción, para el amil xantato de potasio fue de 97.2 % y para el dietil ditioposfato de sodio fue de 56.3 %, fue el método más eficiente a la hora de remover los contaminantes debido al poco tiempo que tienen en contacto el adsorbato y el adsorbente en comparación con otros métodos.

Sería recomendable complementar la presente investigación con filtros de carbono en serie para poder determinar la eficiencia del método

REFERENCIAS

Big Data-Its relevance and impact on industrial statistics. (2017). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31044.94083>

Bora, L. V., & Mewada, R. K. (2017). Visible/solar light active photocatalysts for organic effluent treatment: Fundamentals, mechanisms and parametric review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 76, pp. 1393–1421). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.130>

Canadian centre for occupational health and safety. (2004). <https://www.ccohs.ca>

Casame, J. (2017). *Desarrollo de filtros a partir de polisulfuro de azufre-limoneno, para la remoción de mercurio en fuentes de agua impactadas por efluentes mineros* [Escuela Politécnica Nacional]. https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-imageviewer.pl?biblionumber=70369_thumbnail-shelfbrowser

Chemicalize. (2020, October). <https://chemicalize.com/app>

Chen, X. (2015). Modeling of experimental adsorption isotherm data. *Information (Switzerland)*, 6(1), 14–22. <https://doi.org/10.3390/info6010014>

De la Torre, E. (2015). *Préparation de charbon actif à partir de coques de noix de palmier à huile pour la récupération d'or et le traitement d'effluents cyanurés.* Université catholique de Louvain.

Erkan, H. S., Engin, G. O., Kulil, B., & Gunalp, G. (2017). Activated sludge properties in a submerged membrane bioreactor: effect of COD/TKN ratio of wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(5), 933–942. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1201-2>

Ferreira, A., Medina, H., Galindez, O., Roman, A., De La Rosa, M., Carrillo, M., Rodriguez, G., Mujica, Y., Machado, E., Bohorquez, J., Rodriguez, I., Mejias, P., Muñoz, T., Meinhard, H., Duran, E., Villafranca, N., & Sanchez, R. (1993). *Norma Venezolana.* <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/3051-93.pdf>

Fu, P., Lin, X., Li, G., Chen, Z., & Peng, H. (2018). Degradation of Thiol Collectors Using Ozone at a Low Dosage: Kinetics, Mineralization, Ozone Utilization, and Changes of Biodegradability and Water Quality Parameters. *Minerals* 2018, Vol. 8, Page 477, 8(11), 477. <https://doi.org/10.3390/MIN8110477>

Garba, Z. N., Zhou, W., Lawan, I., Xiao, W., Zhang, M., Wang, L., Chen, L., & Yuan, Z. (2019). An overview of chlorophenols as contaminants and their removal from wastewater by adsorption: A review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 241, pp. 59–75). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.004>

Gerçel, Ö., & Gerçel, H. F. (2007). Adsorption of lead(II) ions from aqueous solutions by activated carbon prepared from biomass plant material of Euphorbia rigida. *Chemical Engineering Journal*, 132(1–3), 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.01.010>

Informe sobre los impactos ambientales y sociales del proyecto minero Mirador. (2019).

Iriondo, C., & Martinez, J. (2013). *Conformación en moléculas orgánicas acíclicas. Conformación en moléculas orgánicas cíclicas. Conformación en heterociclos de seis miembros: Efecto anomérico.* . <https://ocw.ehu.eus/>

Kim, M. Il, & Bai, B. C. (2022). Effect of nitric acid treatment on the pitch properties and preparation of activated carbon. *Carbon Letters*, 32(1), 99–107. <https://doi.org/10.1007/s42823-021-00256-z>

Largitte, L., & Pasquier, R. (2016). A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 495–504. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.02.006>

Lemus, J., Moya, C., Gilarranz, M. A., Rodriguez, J. J., & Palomar, J. (2017). Fixed-bed adsorption of ionic liquids onto activated carbon from aqueous phase. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(6), 5347–5351. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2017.10.014>

- Li, L., Quinlivan, P. A., & Knappe, D. R. U. (2002). Effects of activated carbon surface chemistry and pore structure on the adsorption of organic contaminants from aqueous solution. In *Carbon* (Vol. 40).
- Lin, W., Sun, S., Wu, C., Xu, P., Ye, Z., & Zhuang, S. (2017). Effects of toxic organic flotation reagent (aniline aerofloat) on an A/O submerged membrane bioreactor (sMBR): Microbial community dynamics and performance. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 142, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.03.033>
- Lin, W., Tian, J., Ren, J., Xu, P., Dai, Y., Sun, S., & Wu, C. (2016). Oxidation of aniline aerofloat in flotation wastewater by sodium hypochlorite solution. *Environmental Science and Pollution Research International*, 23(1), 785–792. <https://doi.org/10.1007/S11356-015-5319-4>
- Maldonado, D., & De la Torre, E. (2020). *Removal study of collector surfactants used in the flotation of sulphide minerals with activated carbon*.
- Ministerio del ambiente. (2015). *Acuerdo Ministerial 097-A, Anexos de Normativa, reforma libro VI del texto unificado de legislación secundaria del ministerio del ambiente*. <https://www.gob.ec>
- Newcombe, G., Drikas, M., Hayes, R., & Wark, Q. (1997). INFLUENCE OF CHARACTERISED NATURAL ORGANIC MATERIAL ON ACTIVATED CARBON ADSORPTION: II. EFFECT ON PORE VOLUME DISTRIBUTION AND ADSORPTION OF 2-METHYLISOBORNEOL. In *Wat. Res* (Vol. 31, Issue 5).
- NIH. (2020). *PubChem*. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>
- Quiored. (2003). *Espectroscopía infrarroja*. <https://www.ugr.es/~quiored/doc/IR.pdf>
- Rivas, C., Núñez, O., Longoria, F., & Gonzalez, L. (2014). Isoterma de langmuir y freundlich como modelos para la adsorción de componentes de ácido nucleico sobre WO₃. *Revista Multidisciplinaria Del Consejo de Investigación de La Universidad de Oriente*, 26, 43–49. <http://www.researchgate.net/publication/262766792>
- Sathya, K., Nagarajan, K., Carlin Geor Malar, G., Rajalakshmi, S., & Raja Lakshmi, P. (2022). A comprehensive review on comparison among effluent treatment methods and modern methods of treatment of industrial wastewater effluent from different sources. In *Applied Water Science* (Vol. 12, Issue 4). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01594-7>
- Suárez, S. (2020). *RECUPERACIÓN DE ORO DISUELTO EN LIXIVIADOS CIANURADOS UTILIZANDO TAGUA NATURAL Y MODIFICADA*. *Sustainability Report 2020 BUILDING A LEADING GOLD COMPANY THROUGH RESPONSIBLE MINING 2020 Sustainability Performance Data Tables*. (2020). www.lundingold.com
- WELCOME TO THE NORMAN NETWORK | NORMAN. (n.d.). Retrieved May 13, 2022, from <https://www.norman-network.net/>
- Yan, Z., Han, W., Peñuelas, J., Sardans, J., Elser, J. J., Du, E., Reich, P. B., & Fang, J. (2016). Phosphorus accumulates faster than nitrogen globally in freshwater ecosystems under anthropogenic impacts. *Ecology Letters*, 19(10), 1237–1246. <https://doi.org/10.1111/ELE.12658>
- Ye, Y., Xie, J., Fang, D., Wang, X., He, F., & Jin, Q. (2022). Effect of acid treatment on surfaces of activated carbon supported catalysts for NO and SO₂ removal. *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 30(2), 297–305. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2021.1938000>
- Zhang, X., Gu, X., Han, Y., Parra-Álvarez, N., Claremboux, V., & Kawatra, S. K. (2021). Flotation of Iron Ores: A Review. In *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* (Vol. 42, Issue 3, pp. 184–212). Bellwether Publishing, Ltd. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1689494>

Biografía



Daniel Ricardo Maldonado Cedeño, ingeniero químico graduado de la Escuela Politécnica Nacional en el año 2021, con experiencia laboral en procesos metalúrgicos (cianuración, molienda, flotación, refinación y fundición de metales, minerales y concentrados), tratamiento de efluentes, manejo de equipamiento e instrumentación de laboratorio, manejo e implementación de las normas ISO con metrología y estadística aplicada. Actualmente cursa una maestría en metalurgia extractiva en la Escuela Politécnica Nacional y se desempeña como analista encargado de ensayo al fuego perteneciente al área de geoquímica de la división M&M (metals and minerals) de Bureau Veritas Ecuador, empresa certificadora internacional de ensayos de laboratorio.

FICHAS TÉCNICAS

ÍNDICE DE FICHAS TÉCNICAS

FICHA TÉCNICA 1

Representación de la estructura química del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato de sodio..... 2

FICHA TÉCNICA 2

Calibración de la metodología de análisis del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato de sodio.....4

FICHA TÉCNICA 3

Isotermas en lecho agitado.....8

FICHA TÉCNICA 4

Curva de filtración en lecho fijo.....34

FICHA TÉCNICA I

REPRESENTACIÓN DE LA ESTRUCTURA QUÍMICA

Objetivo: Representar gráficamente la estructura química del amil xantato de potasio y del dietil ditioposfato de sodio.

Desarrollo:

Las estructuras químicas de amil xantato de sodio y del dietil ditioposfato de sodio se representaron mediante la base de datos Pubchem.

En las Figuras FT1.1 y FT1.2 se pueden observar la representación tanto 2D como 3D de la molécula amil xantato de potasio.

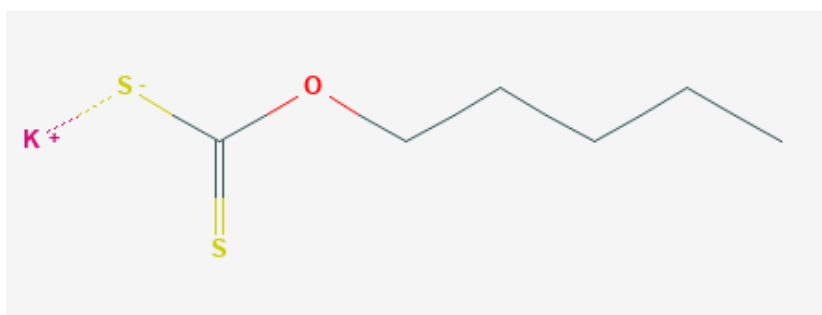


Figura FT1.1. Representación estructural 2D de la molécula amil xantato de potasio (Pubchem, 2020)

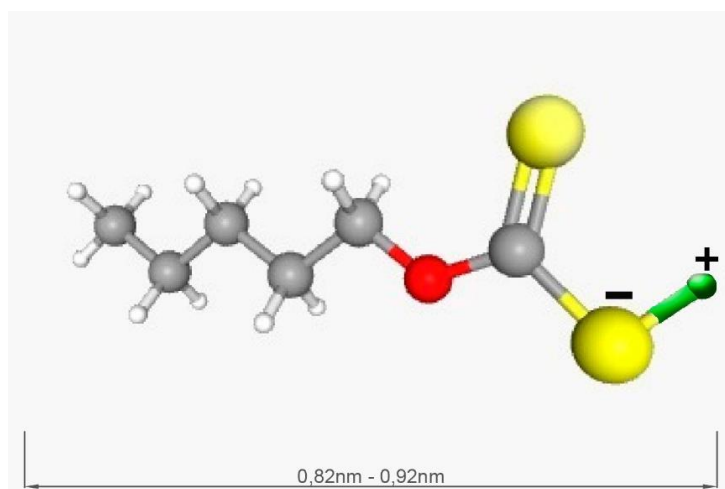


Figura FT1.2. Representación estructural 3D de la molécula amil xantato de potasio (Pubchem, 2020)

En las figuras FT1.3 y FT1.4 se observa la representación tanto 2D como 3D de la molécula dietil ditioposfato de sodio.

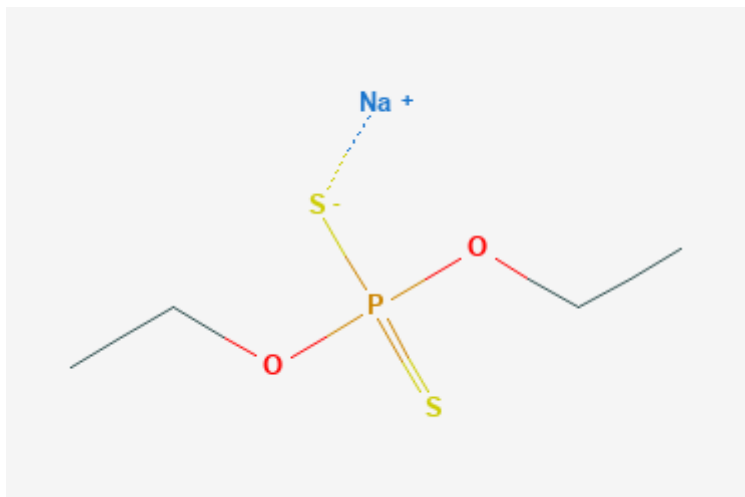


Figura FT1.3. Representación estructural 2D de la molécula dietil ditiofosfato de sodio (Pubchem, 2020)

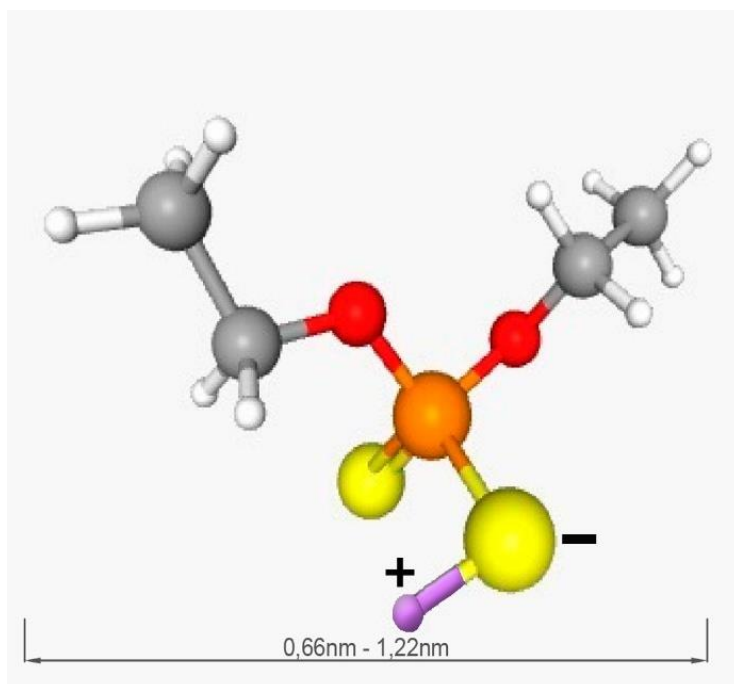


Figura FT1.4. Representación estructural 3D de la molécula dietil ditiofosfato de sodio (Pubchem, 2020)

FICHA TÉCNICA II

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE AMIL XANTATO DE POTASIO Y DIETIL DITIO FOSFATO DE SODIO

CURVA DE CALIBRACIÓN DE KAX

Objetivo: Desarrollar la curva de calibración de KAX.

Desarrollo:

La curva de calibración de KAX se desarrolló con ayuda de un espectrofotómetro UV-visible, mediante el cual se relacionan los valores de concentración con los valores de absorbancia.

Condiciones de trabajo

- Solución de concentración estándar de KAX. Se trabaja con las siguientes concentraciones: 0,05; 5,00; 10,00, 20,00 y 50,00 mg/ L
- Longitud de onda: 300 nm
- Volumen de muestra: 250 mL

Datos experimentales

En la Tabla FTII.1 se presentan los valores de absorbancia para cada concentración de trabajo.

Tabla FTII.1. Variación de la absorbancia del amil xantato de potasio (KAX) con la concentración, 300 nm

Amil xantato de potasio (KAX)	
Concentración (mg.L ⁻¹)	Absorbancia
50.00	2.12
20.00	0.89
10.00	0.49
5.00	0.29
0.05	0.06

En la figura FTII.1 se puede apreciar la curva de calibración realizada para el amil xantato de potasio.

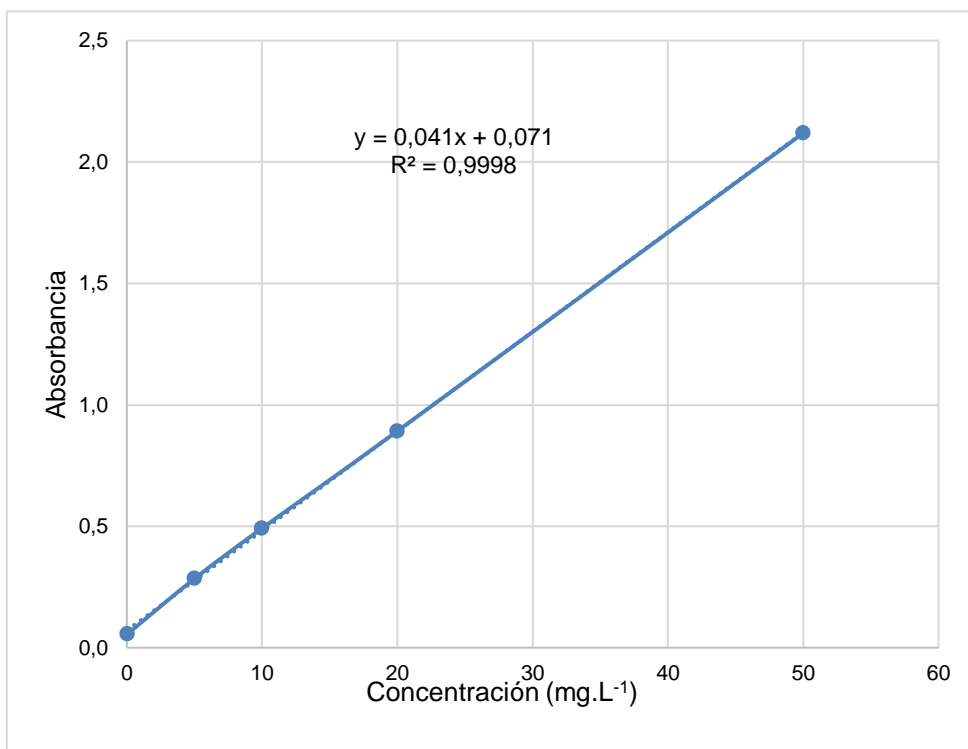


Figura FTII.1 Curva de calibración de KAX

CURVA DE CALIBRACIÓN DEL DIETIL DITIOFOSFATO DE SODIO

Objetivo: Desarrollar la curva de calibración del dietil ditiofosfato de sodio

Desarrollo:

La curva de calibración del dietil ditiofosfato de sodio se desarrolló con ayuda de un espectrofotómetro UV-visible, mediante el cual se relacionan los valores de concentración con los valores de absorbancia.

Condiciones de trabajo

- Solución de concentración estándar de dietil ditiofosfato de sodio. Se trabaja con las siguientes concentraciones: 5,00; 10,00; 20,00; 50,00; 80,00 y 100,00 mg/ L
- Longitud de onda: 890 nm
- Volumen de muestra: 250 mL

Datos experimentales

En la Tabla FTII.2 se presentan los valores de absorbancia para cada concentración de trabajo.

Tabla FTII.2 Variación de la absorbancia del dietil ditiofosfato de sodio (Aerofloat 208) con la concentración, 890 nm

Aerofloat 208	
Concentración (mg/ L)	Absorbancia
100.00	1.11
50.00	0.62
20.00	0.47
10.00	0.21
5.00	0.20

En la figura FTII.2 se puede apreciar la curva de calibración realizada para el dietil ditiofosfato de sodio.

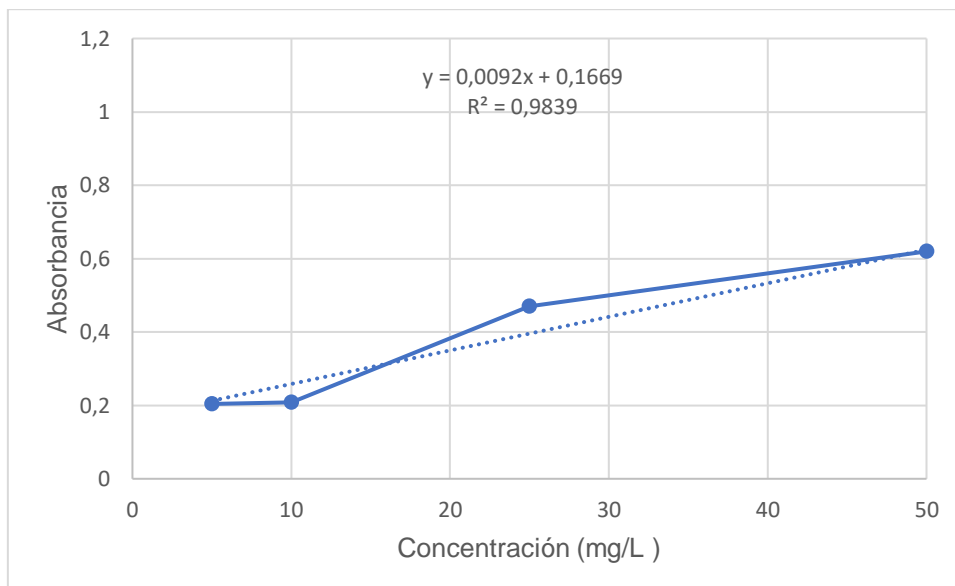


Figura FTII.2 Curva de calibración del dietil ditiofosfato de sodio

FICHA TÉCNICA III

ISOTERMAS DE ADSORCIÓN EN LECHO AGITADO

ISOTERMA DE ADSORCIÓN DEL AMIL XANTATO DE POTASIO Y DEL DIETIL DITIOFOSFATO DE SODIO EN CARBÓN ACTIVADO MICROPOROSO DE CUESCO DE COCO CON ALTA SUPERFICIE ESPECÍFICA Y ACTIVADO CON VAPOR DE AGUA A ALTA TEMPERATURA EN UN EFLUENTE SINTÉTICO A PH 7.

Objetivo: Estimar la eficiencia del proceso de adsorción del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato en carbón activado.

Desarrollo:

Los datos obtenidos se trataron para realizar la isoterma de adsorción mediante el modelo de Freundlich.

Condiciones de trabajo:

- Solución sintética de amil xantato de potasio 50 mg.L^{-1} , dietil ditiofosfato de sodio 75 mg.L^{-1} , silicato de sodio 50 mg.L^{-1} y aceite de pino 50 mg.L^{-1}
- Tiempo de agitación: 24 h
- Agitación: 60 rpm
- Volumen: 0,2 L
- Tamaño de partícula del carbón: 6x12
- pH de la solución: 7
- Temperatura: $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Datos experimentales: en la Tabla FTIII.1 se presenta la variación de la concentración de amil xantato de potasio con respecto a la dosis de carbón empleadas.

Tabla FTIII.1 Variación de la concentración del amil xantato de potasio respecto a la dosis de carbón activado de alta superficie específica. pH de la solución 7. Agitación: 60 rpm

m carbón (g)	absorbancia	Concentración final (mg.L ⁻¹)
0.25	0.81	18.07
0.50	0.78	17.22
0.75	0.31	5.71
1.00	0.08	0.10

Determinación de la capacidad y de la eficiencia del proceso

Cantidad de amil xantato de potasio adsorbido mediante la ecuación FTIII.1

$$X = (C_o - C_f) V \text{ [mg]} \quad \text{[FTIII.1]}$$

$$X = 6.39 \text{ mg}$$

Capacidad de adsorción mediante ecuación FTIII.2

$$\frac{X \text{ [mg]}}{m \text{ [g]}} \quad \text{[FTIII.2]}$$

$$\frac{X}{m} = 25.54 \frac{\text{mg masa adsorbida}}{\text{g de carbón}}$$

Eficiencia del proceso de adsorción mediante ecuación FTIII.3

$$\% \text{adsorción} = \left(\frac{C_o - C_f}{C_o} \right) 100 \quad \text{[FTIII.3]}$$

$$\% \text{adsorción} = 63.85 \%$$

En la Tabla FTIII.2 se presenta la variación de la capacidad y la eficiencia de adsorción respecto a la dosis de carbón activado microporoso de alta superficie específica.

Tabla FTIII.2 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el amil xantato de potasio

m carbón (g)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
0.25	6.39	25.54	63.85
0.50	6.56	13.11	65.56
0.75	8.86	11.81	88.59
1.00	9.98	9.98	99.80

Datos experimentales: en la Tabla FTIII.3 se presenta la variación de la concentración del dietil ditiofosfato de sodio con respecto a la dosis de carbón empleadas.

Tabla FTIII.3 Variación de la concentración del dietil ditiofosfato de sodio respecto a la dosis de carbón activado de alta superficie específica. pH de la solución 7. Agitación: 60 rpm

m carbón (g)	Absorbancia	Concentración final (mg.L ⁻¹)
0.25	0.82	70.76
0.75	0.75	63.80
1.00	0.74	61.74

Determinación de la capacidad y de la eficiencia del proceso

Cantidad de amil xantato de potasio adsorbido mediante la ecuación FTIII.1

$$X = (C_o - C_f) V \text{ [mg]} \quad \text{[FTIII.1]}$$

$$X = 0.85 \text{ mg}$$

Capacidad de adsorción mediante ecuación FTIII.2

$$\frac{X}{m} \left[\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right] \quad \text{[FTIII.2]}$$

$$\frac{X}{m} = 3.39 \frac{\text{mg masa adsorbida}}{\text{g de carbón}}$$

Eficiencia del proceso de adsorción mediante ecuación FTIII.3

$$\% \text{adsorción} = \left(\frac{C_o - C_f}{C_o} \right) 100 \quad [\text{FTIII.3}]$$

$$\% \text{adsorción} = 5.65 \%$$

En la Tabla FTIII.4 se presenta la variación de la capacidad y la eficiencia de adsorción respecto a la dosis de carbón activado macroporoso.

Tabla FTIII.4 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
0.25	0.85	3.39	5.65
0.75	2.24	2.99	14.93
1.00	2.65	2.65	17.68

**ISOTERMA DE ADSORCIÓN DEL AMIL XANTATO DE POTASIO Y DEL
DIETIL DITIOFOSFATO DE SODIO EN CARBÓN ACTIVADO
MICROPOROSO DE CUESCO DE COCO CON ALTA SUPERFICIE
ESPECÍFICA Y ACTIVADO CON VAPOR DE AGUA A ALTA TEMPERATURA
EN UN EFLUENTE SINTÉTICO A PH 3.**

Objetivo: Estimar la eficiencia del proceso de adsorción del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato en carbón activado.

Desarrollo:

Los datos obtenidos se trataron para realizar la isoterma de adsorción mediante el modelo de Freundlich.

Condiciones de trabajo:

- Solución sintética de amil xantato de potasio 50 mg.L^{-1} , dietil ditiofosfato de sodio 75 mg.L^{-1} , silicato de sodio 50 mg.L^{-1} y aceite de pino 50 mg.L^{-1}
- Tiempo de agitación: 24 h
- Agitación: 60 rpm
- Volumen: 0,2 L
- Tamaño de partícula del carbón: 6x12
- pH de la solución: 3
- Temperatura: $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Para el caso del amil xantato de potasio la remoción que se obtuvo fue del 100 %, por el mismo motivo no tuvo isoterma.

En la Tabla FTIII.5 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción.

Tabla FTIII.5 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
0.25	68.80	1.24	4.96	8.26
0.50	60.11	2.98	5.96	19.86
0.75	25.00	10.00	13.33	66.67

**ISOTERMA DE ADSORCIÓN DEL AMIL XANTATO DE POTASIO Y DEL
DIETIL DITIOFOSFATO DE SODIO EN CARBÓN ACTIVADO
MICROPOROSO DE CUESCO DE COCO CON ALTA SUPERFICIE
ESPECÍFICA Y ACTIVADO CON VAPOR DE AGUA A ALTA TEMPERATURA
EN UN EFLUENTE SINTÉTICO A PH 10.**

Objetivo: Estimar la eficiencia del proceso de adsorción del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato en carbón activado.

Desarrollo:

Los datos obtenidos se trataron para realizar la isoterma de adsorción mediante el modelo de Freundlich.

Condiciones de trabajo:

- Solución sintética de amil xantato de potasio 50 mg.L^{-1} , dietil ditiofosfato de sodio 75 mg.L^{-1} , silicato de sodio 50 mg.L^{-1} y aceite de pino 50 mg.L^{-1}
- Tiempo de agitación: 24 h
- Agitación: 60 rpm
- Volumen: 0,2 L
- Tamaño de partícula del carbón: 6x12
- pH de la solución: 10
- Temperatura: 22 °C

En la Tabla FTIII.6 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el amil xantato de potasio.

Tabla FTIII.6 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L ⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
0.25	42.98	1.40	5.62	14.05
0.50	30.46	3.91	7.81	39.07
0.75	16.90	6.62	8.83	66.20
1.00	4.12	9.18	9.18	91.76

En la Tabla FTIII.7 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el dietil ditiofosfato de sodio.

Tabla FTIII.7 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L ⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
0.25	61.41	2.72	10.87	18.12
0.75	53.59	4.28	5.71	28.55
1.00	44.67	6.07	6.07	40.43

**ISOTERMA DE ADSORCIÓN DEL AMIL XANTATO DE POTASIO Y DEL
DIETIL DITIOFOSFATO DE SODIO EN CARBÓN ACTIVADO
MICROPOROSO DE CUESCO DE COCO CON ALTA SUPERFICIE
ESPECÍFICA Y ACTIVADO CON VAPOR DE AGUA A ALTA TEMPERATURA
EN UN EFLUENTE ACUOSO A PH 7.**

Objetivo: Estimar la eficiencia del proceso de adsorción del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato en carbón activado.

Desarrollo:

Los datos obtenidos se trataron para realizar la isoterma de adsorción mediante el modelo de Freundlich.

Condiciones de trabajo:

- Solución acuosa de flotación.
- Tiempo de agitación: 24 h
- Agitación: 60 rpm
- Volumen: 0,2 L
- Tamaño de partícula del carbón: 6 x12
- pH de la solución: 7
- Temperatura: 22 °C

Para el caso del amil xantato de potasio la remoción que se obtuvo fue del 100 %, por el mismo motivo no tuvo isoterma.

En la Tabla FTIII.8 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el dietil ditiofosfato de sodio.

Tabla FTIII.8 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
0.75	28.09	5.62	9.24	55.22
0.50	42.37	8.47	8.14	32.46
0.25	47.15	9.43	12.46	24.84

**ISOTERMA DE ADSORCIÓN DEL AMIL XANTATO DE POTASIO Y DEL
DIETIL DITIOFOSFATO DE SODIO EN CARBÓN ACTIVADO
MICROPOROSO DE CUESCO DE COCO CON ALTA SUPERFICIE
ESPECÍFICA Y ACTIVADO CON VAPOR DE AGUA A ALTA TEMPERATURA
EN UN EFLUENTE ACUOSO A PH 3.**

Objetivo: Estimar la eficiencia del proceso de adsorción del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato en carbón activado.

Desarrollo:

Los datos obtenidos se trataron para realizar la isoterma de adsorción mediante el modelo de Freundlich.

Condiciones de trabajo:

- Solución acuosa de flotación
- Tiempo de agitación: 24 h
- Agitación: 60 rpm
- Volumen: 0,2 L
- Tamaño de partícula del carbón: 6x12
- pH de la solución: 3
- Temperatura: 22 °C

En la Tabla FTIII.9 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el amil xantato de potasio.

Tabla FTIII.9 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
1.00	7.81	3.14	3.14	66.77
0.75	10.02	2.69	3.59	57.36
0.50	12.81	2.14	4.27	45.48
0.25	17.47	1.20	4.81	25.61

En la Tabla FTIII.10 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el dietil ditiofosfato de sodio.

Tabla FTIII.10 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
0.75	24.76	5.70	7.59	53.50
0.50	36.90	3.27	6.54	30.70
0.25	47.62	1.12	4.49	10.55

**ISOTERMA DE ADSORCIÓN DEL AMIL XANTATO DE POTASIO Y DEL
DIETIL DITIOFOSFATO DE SODIO EN CARBÓN ACTIVADO
MICROPOROSO DE CUESCO DE COCO CON ALTA SUPERFICIE
ESPECÍFICA Y ACTIVADO CON VAPOR DE AGUA A ALTA TEMPERATURA
EN UN EFLUENTE ACUOSO A PH 10.**

Objetivo: Estimar la eficiencia del proceso de adsorción del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato en carbón activado.

Desarrollo:

Los datos obtenidos se trataron para realizar la isoterma de adsorción mediante el modelo de Freundlich.

Condiciones de trabajo:

- Solución acuosa de flotación
- Tiempo de agitación: 24 h
- Agitación: 60 rpm
- Volumen: 0,2 L
- Tamaño de partícula del carbón: 6x12
- pH de la solución: 10
- Temperatura: 22 °C

En la Tabla FTIII.11 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el amil xantato de potasio.

Tabla FTIII.11 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el amil xantato de potasio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L ⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
0.75	0.09	1.81	2.41	99.02
0.50	3.56	1.12	2.23	61.03
0.25	7.02	0.42	1.70	23.22

En la Tabla FTIII.12 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el dietil ditiofosfato de sodio.

Tabla FTIII.12 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L ⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
1.00	14.76	9.60	9.60	76.49
0.75	21.61	8.23	10.98	65.58
0.50	44.98	3.56	7.12	28.34
0.25	54.03	1.75	6.98	13.91

**ISOTERMA DE ADSORCIÓN DEL AMIL XANTATO DE POTASIO Y DEL
DIETIL DITIOFOSFATO DE SODIO EN CARBÓN ACTIVADO
MICROPOROSO DE CUESCO DE COCO CON ALTA SUPERFICIE
ESPECÍFICA TERMOQUÍMICAMENTE MODIFICADO EN UN EFLUENTE
SINTÉTICO A PH 7.**

Objetivo: Estimar la eficiencia del proceso de adsorción del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato en carbón activado modificado.

Desarrollo:

Los datos obtenidos se trataron para realizar la isoterma de adsorción mediante el modelo de Freundlich.

Condiciones de trabajo:

- Solución sintética de amil xantato de potasio 50 mg.L^{-1} , dietil ditiofosfato de sodio 75 mg.L^{-1} , silicato de sodio 50 mg.L^{-1} y aceite de pino 50 mg.L^{-1}
- Tiempo de agitación: 24 h
- Agitación: 60 rpm
- Volumen: 0,2 L
- Tamaño de partícula del carbón: 6x12
- pH de la solución: 7
- Temperatura: 22 °C

En la Tabla FTIII.13 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el amil xantato de potasio.

Tabla FTIII.13 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el amil xantato de potasio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
1.00	0.01	4.53	4.53	99.96
0.75	0.35	4.46	5.95	98.45
0.50	2.66	4.00	8.00	88.26
0.25	8.29	2.87	11.49	63.42

En la Tabla FTIII.14 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el dietil ditiofosfato de sodio.

Tabla FTIII.14 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
1.00	42.26	4.29	4.29	33.67
0.75	44.40	3.86	5.15	30.31
0.50	45.05	3.73	7.46	29.29
0.25	49.21	2.90	11.59	22.75

**ISOTERMA DE ADSORCIÓN DEL AMIL XANTATO DE POTASIO Y DEL
DIETIL DITIOFOSFATO DE SODIO EN CARBÓN ACTIVADO
MICROPOROSO DE CUESCO DE COCO CON ALTA SUPERFICIE
ESPECÍFICA TERMOQUÍMICAMENTE MODIFICADO EN UN EFLUENTE
SINTÉTICO A PH 3.**

Objetivo: Estimar la eficiencia del proceso de adsorción del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato en carbón activado modificado.

Desarrollo:

Los datos obtenidos se trataron para realizar la isoterma de adsorción mediante el modelo de Freundlich.

Condiciones de trabajo:

- Solución sintética de amil xantato de potasio 50 mg.L^{-1} , dietil ditiofosfato de sodio 75 mg.L^{-1} , silicato de sodio 50 mg.L^{-1} y aceite de pino 50 mg.L^{-1}
- Tiempo de agitación: 24 h
- Agitación: 60 rpm
- Volumen: 0,2 L
- Tamaño de partícula del carbón: 6x12
- pH de la solución: 3
- Temperatura: $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Para el caso del amil xantato de potasio la remoción que se obtuvo fue del 100 %, por el mismo motivo no tuvo isoterma.

En la Tabla FTIII.15 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el dietil ditiofosfato de sodio.

Tabla FTIII.15 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
1.00	15.70	10.12	10.12	76.33
0.75	29.58	7.35	9.80	55.40
0.50	30.92	7.08	14.16	53.38
0.25	42.29	4.80	19.22	36.22

**ISOTERMA DE ADSORCIÓN DEL AMIL XANTATO DE POTASIO Y DEL
DIETIL DITIOFOSFATO DE SODIO EN CARBÓN ACTIVADO
MICROPOROSO DE CUESCO DE COCO CON ALTA SUPERFICIE
ESPECÍFICA TERMOQUÍMICAMENTE MODIFICADO EN UN EFLUENTE
SINTÉTICO A PH 10.**

Objetivo: Estimar la eficiencia del proceso de adsorción del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato en carbón activado modificado.

Desarrollo:

Los datos obtenidos se trataron para realizar la isoterma de adsorción mediante el modelo de Freundlich.

Condiciones de trabajo:

- Solución sintética de amil xantato de potasio 50 mg.L^{-1} , dietil ditiofosfato de sodio 75 mg.L^{-1} , silicato de sodio 50 mg.L^{-1} y aceite de pino 50 mg.L^{-1}
- Tiempo de agitación: 24 h
- Agitación: 60 rpm
- Volumen: 0,2 L
- Tamaño de partícula del carbón: 6x12
- pH de la solución: 10
- Temperatura: 22 °C

En la Tabla FTIII.16 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el amil xantato de potasio.

Tabla FTIII.16 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el amil xantato de potasio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
1.00	4.07	10.94	10.94	93.08
0.75	22.58	7.24	9.65	61.59
0.50	28.05	6.15	12.29	52.28
0.25	39.95	3.77	15.06	32.03

En la Tabla FTIII.17 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el dietil ditiofosfato de sodio.

Tabla FTIII.17 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
1.00	3.23	4.03	4.03	86.19
0.75	9.80	2.71	3.62	58.07
0.50	7.57	3.16	6.32	67.61
0.25	16.46	1.38	5.52	29.54

**ISOTERMA DE ADSORCIÓN DEL AMIL XANTATO DE POTASIO Y DEL
DIETIL DITIOFOSFATO DE SODIO EN CARBÓN ACTIVADO
MICROPOROSO DE CUESCO DE COCO CON ALTA SUPERFICIE
ESPECÍFICA TERMOQUÍMICAMENTE MODIFICADO EN UN EFLUENTE
ACUOSO A PH 7.**

Objetivo: Estimar la eficiencia del proceso de adsorción del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato en carbón activado modificado.

Desarrollo:

Los datos obtenidos se trataron para realizar la isoterma de adsorción mediante el modelo de Freundlich.

Condiciones de trabajo:

- Efluente acuoso de flotación
- Tiempo de agitación: 24 h
- Agitación: 60 rpm
- Volumen: 0,2 L
- Tamaño de partícula del carbón: 6x12
- pH de la solución: 7
- Temperatura: 22 °C

Para el caso del amil xantato de potasio la remoción que se obtuvo fue del 100 %, por el mismo motivo no tuvo isoterma.

En la Tabla FTIII.18 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el dietil ditiofosfato de sodio.

Tabla FTIII.18 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
1.00	5.99	10.54	10.54	89.79
0.75	9.29	9.88	13.17	84.17
0.50	41.13	3.51	7.01	29.89

**ISOTERMA DE ADSORCIÓN DEL AMIL XANTATO DE POTASIO Y DEL
DIETIL DITIOFOSFATO DE SODIO EN CARBÓN ACTIVADO
MICROPOROSO DE CUESCO DE COCO CON ALTA SUPERFICIE
ESPECÍFICA TERMOQUÍMICAMENTE MODIFICADO EN UN EFLUENTE
ACUOSO A PH 3.**

Objetivo: Estimar la eficiencia del proceso de adsorción del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato en carbón activado modificado.

Desarrollo:

Los datos obtenidos se trataron para realizar la isoterma de adsorción mediante el modelo de Freundlich.

Condiciones de trabajo:

- Efluente acuoso de flotación
- Tiempo de agitación: 24 h
- Agitación: 60 rpm
- Volumen: 0,2 L
- Tamaño de partícula del carbón: 6x12
- pH de la solución: 3
- Temperatura: 22 °C

Para el caso del amil xantato de potasio la remoción que se obtuvo fue del 100 %, por el mismo motivo no tuvo isoterma.

En la Tabla FTIII.19 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el dietil ditiofosfato de sodio.

Tabla FTIII.19 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
0.75	29.58	5.55	7.40	48.42
0.50	29.00	5.67	11.34	49.43
0.25	44.07	2.65	10.62	23.14

**ISOTERMA DE ADSORCIÓN DEL AMIL XANTATO DE POTASIO Y DEL
DIETIL DITIOFOSFATO DE SODIO EN CARBÓN ACTIVADO
MICROPOROSO DE CUESCO DE COCO CON ALTA SUPERFICIE
ESPECÍFICA TERMOQUÍMICAMENTE MODIFICADO EN UN EFLUENTE
ACUOSO A PH 10.**

Objetivo: Estimar la eficiencia del proceso de adsorción del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato en carbón activado modificado.

Desarrollo:

Los datos obtenidos se trataron para realizar la isoterma de adsorción mediante el modelo de Freundlich.

Condiciones de trabajo:

- Efluente acuoso de flotación
- Tiempo de agitación: 24 h
- Agitación: 60 rpm
- Volumen: 0,2 L
- Tamaño de partícula del carbón: 6x12
- pH de la solución: 10
- Temperatura: 22 °C

Para el caso del amil xantato de potasio la remoción que se obtuvo fue del 100 %, por el mismo motivo no tuvo isoterma.

En la Tabla FTIII.20 se presenta los resultados obtenidos en el tratamiento de los datos para la obtención de la isoterma de adsorción para el dietil ditiofosfato de sodio.

Tabla FTIII.20 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

m carbón (g)	Concentración final (mg.L⁻¹)	masa adsorbida (mg)	X/m (mg masa adsorbida/ g de carbón)	Eficiencia del proceso de adsorción (%)
1.00	8.56	12.91	12.91	88.29
0.75	30.05	8.62	11.49	58.91
0.50	36.90	7.25	14.49	49.55
0.25	53.74	3.88	15.51	26.51

FICHA TÉCNICA IV

CURVA DE FILTRACIÓN EN LECHO FIJO

Objetivo: Estimar la eficiencia del proceso de adsorción del amil xantato de potasio y del dietil ditiofosfato de sodio en una columna empacada de carbón activado

Desarrollo:

Los datos obtenidos se trataron para realizar la curva de filtración para la columna empacada de carbón activado.

Parámetros:

- Diámetro interno (cm): 2.33
- Longitud columna con carbón activado (cm): 14.7
- Flujo (cm³/s): 0.1
- P :Peso del agente adsorbente saturado con agua (g): 70.64
- PoPeso del material húmedo (g) : 54.52
- pH de la solución: 7
- Volumen de agua a saturación (cm³): 16.12
- Volumen que ocupa el carbón activado (cm³): 46.56

Datos experimentales: En la tabla FTIV.1 se observan la variación de la concentración de amil xantato de potasio con respecto al volumen de poro intergranular para cinco valores.

Tabla FTIII.20 Valores de capacidad de adsorción y eficiencia respecto a la masa de carbón activado empleada para el dietil ditiofosfato de sodio

VPI	Concentración final
0.00	11.35
15.00	0.50
30.00	0.61
45.00	0.64
60.00	0.66

Área transversal mediante la ecuación FTIV.1

$$A = \pi * r^2 [cm^2] \quad [FTIV.1]$$

$$X = 4.26 \text{ cm}^2$$

Determinación volumen interior de la columna mediante la ecuación FTIV.2

$$V_{ic} = L * A [cm^3] \quad [FTIV.2]$$

$$V_{ic} = 62.68 \text{ cm}^3$$

Determinación Porosidad integranular mediante la ecuación FTIV.3

$$\theta = \frac{P - P_o}{V_{CA} * \rho_{agua}} \quad [FTIV.3]$$

$$\theta = 0.35$$

Determinación Velocidad intersticial mediante la ecuación FTIV.4

$$\vartheta = \frac{\dot{Q}}{\theta * A} \left[\frac{cm}{s} \right] \quad [FTIV.4]$$

$$\vartheta = 0.07 \frac{cm}{s}$$

Determinación Volumen de poro interno mediante la ecuación FTIV.5

$$VPI = A * L * \theta [cm^3] \quad [FTIV.5]$$

$$VPI = 21.70 \text{ cm}^3$$

Determinación de la constante cinética de filtración mediante la ecuación FTIV.6

$$k_f = - \frac{\ln\left(\frac{c}{c_o}\right) * \vartheta}{L} \quad [FTIV.6]$$

Para el caso del amil xantato de potasio se tiene

$$k_f = - \frac{\ln\left(\frac{0,5}{11,35}\right) * 0,07 \frac{cm}{s}}{0,15 \text{ m}}$$

$$k_f = 1221,4 \text{ día}^{-1}$$



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

MAESTRÍA DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA

ORDEN DE EMPASTADO

De acuerdo con lo estipulado en el Art. 101 del Reglamento de Régimen Académico de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), aprobado por el Consejo Politécnico el 19 de octubre del 2017, y una vez comprobado el cumplimiento del formato de presentación establecido para la tesis escrita presentada por el Señor:

ING. DANIEL RICARDO MALDONADO CEDEÑO

Se emite la presente orden de empastado con fecha: 11 julio 2024



Firmado electrónicamente por:
DIANA ENDARA
DRANICHNIKOVA

Dra. Diana Endara Dranichnikova
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE
METALURGIA EXTRACTIVA