

Artículo Original

**CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE MATERIALES NATURALES
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE PROCESO DE LA
ACTIVIDAD PETROLERA**

**ADSORPTION CAPACITY OF NATURAL MATERIALS FOR PROCESSING
WATERS FROM OIL ACTIVITY TREATMENT**

Yuletsis Díaz Rodríguez ^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-0705-1439>

Leonardo Mendiola Lau ¹ <https://orcid.org/0000-0001-8831-655X>

Aimeé González Suárez ² <https://orcid.org/0000-0002-8117-4891>

Lester Rivas Trasancos ¹ <https://orcid.org/0000-0001-9521-4420>

Roberto Romero Silva ¹ <https://orcid.org/0000-0001-9074-9178>

¹ Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET). Churrucá #481, Cerro, La Habana, Cuba.

² Centro de Estudio de Ingeniería de Procesos, Facultad de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Calle 114 #11901, e/ Rotonda y Ciclovía, Código 19390, Marianao, La Habana, Cuba.

Recibido: Octubre 28, 2020; Revisado: Enero 25, 2021; Aceptado: Febrero 12, 2021

RESUMEN

Introducción:

Las aplicaciones actuales de tratamiento de residuales líquidos se dirigen hacia el estudio de nuevos materiales renovables, con elevada disponibilidad para ser aprovechados como soportes que actúan como filtro natural con muy alta porosidad y propiedades adsorbentes. La compleja composición de las aguas de producción y residuales de la actividad petrolera demanda la adopción de métodos que utilicen materiales adsorbentes más eficientes para facilitar el manejo y disposición final de sus efluentes.

Objetivo:

Determinar la capacidad de adsorción aparente de diferentes materiales naturales para el tratamiento de aguas residuales de la actividad petrolera.

Materiales y Métodos:

Los indicadores de contaminación determinados fueron la Demanda Química de Oxígeno, sulfuros, grasas y aceites, para lo cual se siguieron normas internacionales APHA e ISO, así como las isotermas de adsorción y cinética de materiales como bagazo



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Yuletsis Díaz, Email: yuletsis@ceinpet.cupet.cu



de caña, paja de arroz, agromena, zeolita y lodo activo.

Resultados y Discusión:

Todos los materiales presentaron la mayor capacidad de adsorción a los 20 min de contacto, destacándose bajo condiciones de empaque valores de este parámetro para DQO de 67 y 70 mg/g con el bagazo y la paja de arroz; y remociones superiores al 95% para sulfuros, grasas y aceites con todos los materiales.

Conclusiones:

Se alcanzaron los mayores valores de capacidad de adsorción de DQO (26-63 mg/g) y de sulfuros (10-12 mg/g) a 20 min de contacto con el residual y bajo condiciones de empaque, los mejores resultados corresponden al bagazo de caña, la paja de arroz y el producto mejorador.

Palabras clave: actividad petrolera; adsorción; efluentes; materiales orgánicos.

ABSTRACT

Introduction:

Current applications for liquid waste treatment are directed towards the study of new renewable materials, with high availability to be used as supports that act as a natural filter with very high porosity and adsorbent properties. The wastewaters of the oil activity complex composition demands the adoption of methods that use more efficient adsorbent materials to facilitate the management and final disposal of its effluents.

Objective:

To determine the apparent adsorption capacity of different natural materials for the treatment of oil activity wastewater.

Materials and Methods:

The contamination indicators determined were the Chemical Oxygen Demand, sulfides, fats and oils, for which international APHA and ISO standards were used, as well as the adsorption and kinetic isotherms of materials such as sugarcane bagasse, rice straw, agromena, zeolite and active mud.

Results and Discussion:

All the materials presented the highest adsorption capacity after 20 min of contact, with values of this parameter standing out for COD of 67 and 70 mg/g with bagasse and rice straw; and removals greater than 95% for sulfides, fats and oils with all materials.

Conclusions:

The highest values of COD adsorption capacity (26-63 mg/g) and sulfides (10-12 mg/g) were reached at 20 min of contact with the residual and under packing conditions, the best results correspond to bagasse cane, rice straw and improver product.

Keywords: petroleum activity; adsorption; effluent; organic material.

1. INTRODUCCIÓN

Un lecho orgánico empacado funciona como filtro natural con muy alta porosidad y propiedades adsorbentes. Por una parte, retiene los contaminantes del residual líquido mediante procesos físico-químicos propios del filtro; y por otra, actúa como soporte

microbiano. De este modo, se regenera la capacidad de filtración y depuración del sistema de tratamiento mediante una infiltración lenta sobre un material orgánico adsorbente que establece un equilibrio (Garzón-Zuñiga et al., 2012). En la actualidad esta aplicación se dirige hacia el estudio de nuevos materiales renovables, con elevada disponibilidad para ser aprovechados como soportes en el tratamiento de residuales líquidos. La mayor atención ha sido el proceso de adsorción con empleo de materiales naturales como soportes de acuerdo a Hegazi, (2013) y (Etim et al., 2016), debido a su bajo costo, simplicidad de diseño y propiedades similares a la de los materiales sintéticos.

Una amplia gama de adsorbentes naturales como el bagazo de caña (Ahmad et al., 2018), la paja y cáscara de arroz, el carbón activado (Masoud et al., 2016), la zeolita (Khalid et al., 2004), las cenizas por Prieto et al., (2019), la fibra de coco (Etim et al., 2016) y la cáscara (Prieto et al., 2020), la turba (Kennes et al., 2014), entre otros, han sido estudiados con resultados satisfactorios en la eliminación de color, materia orgánica, metales, fenoles, grasas y aceites. Los residuos agrícolas contienen una variedad de grupos funcionales con una capacidad de adsorción potencial para la eliminación o reducción de diferentes contaminantes (De Gisi et al., 2016), donde se destaca su empleo en la adsorción de tintes (colorantes) a partir de soluciones acuosas sintéticas.

Algunas de estas experiencias refieren el uso de estos materiales modificados, para desarrollar o acentuar propiedades físico-químicas como área superficial específica, distribución del tamaño de poros, volumen de poro y presencia de grupos funcionales, los cuales incrementan la adsorción y mejoran la capacidad de eliminación de los contaminantes. Escasos estudios refieren su uso para el tratamiento de contaminantes en residuales reales, tal es el caso de efluentes de la actividad petrolera y aguas de producción. Entre los parámetros físico-químicos más relevantes en estas aguas residuales se encuentran grasas y aceites (G y A), demanda química de oxígeno (DQO), fenoles, metales pesados, sólidos suspendidos y otras sustancias tóxicas. La mayoría de estos compuestos prevalecen en concentraciones que exceden lo especificado en la normativa cubana (NC 521, 2007). Así mismo, las características del agua producida son diferentes en cada yacimiento de petróleo, y su producción cambia en función del tiempo. Además, existe la posibilidad de un cambio en su composición ya que los pozos se someten a diferentes métodos, con la finalidad de mejorar la producción y estimular el yacimiento, entre ellos la inyección de agua, gas, introducción de productos químicos y actividad bacteriana (Sánchez-Uribe, 2013).

Debido a la compleja composición de estos residuales y las deficiencias de los métodos actuales aplicados, con el fin de alcanzar la disminución de los contaminantes a las concentraciones reguladas para su disposición final, se hace necesario la adopción de nuevos materiales adsorbentes que faciliten el manejo de los efluentes. Entre ellos los de mayor disponibilidad como son los desechos de otras industrias de modo que se obtengan beneficios ambientales además de económicos. De ahí que, el objetivo de esta investigación sea determinar la capacidad de adsorción aparente de diferentes materiales naturales para el tratamiento de aguas residuales de la actividad petrolera.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Agua residual y materiales naturales.

El agua residual utilizada durante la experimentación fue tomada del tanque de recolección del drenaje de los depósitos de almacenamiento de combustibles de una División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas (DTCC Matanzas). El muestreo del agua residual se realizó mediante una muestra puntual en un frasco para este fin y se conservó a 4°C hasta su posterior análisis. Como materiales naturales se utilizaron la agromena, zeolita, paja de arroz, un producto mejorador de suelos, bagazo de caña de azúcar y lodo activo. La agromena es un fertilizante organo-mineral que junto a la zeolita fue suministrado por el Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), de Cuba. La paja de arroz, el producto mejorador y el bagazo provienen de investigaciones anteriores para estimular procesos de biorremediación de suelos. El producto mejorador se conformó y evaluó como fertilizante orgánico por especialistas del CEINPET actualmente en proceso de patentización. El lodo proviene de la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) María del Carmen ubicada en Marianao, provincia La Habana. A continuación, se exponen algunas de las características de los mismos (Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización y composición de los materiales

<i>Material</i>	<i>Caracterización</i>	<i>Composición</i>
Agromena (Agrom) (CIP-14-184, 2015)	Tamaño de grano: 1,6 mm, PV=0,98 g/cm ³ , densidad 2,1 g/cm ³ ; pH=7,01; capacidad intercambio catiónico (CIC)=40-70 meq/100 g	Zeolita 42 %; roca fosfórica 36 %; turba 16 %; urea 2,6 %; (NH ₄) ₂ HPO ₄ 1,2 %; KCl 2%
Zeolita (Z)	Tamaño de grano: 2 mm, PV= 1,0 g/cm ³ , densidad aparente 2,0 g/cm ³ ; CIC=138,7 meq/100 g zeo; pH=7,4	SiO ₂ 63 %; Al ₂ O ₃ 11,57 %; FeO ₃ 1,87 %; Na ₂ O 2,39 %; H ₂ O 3,44 %; TiO ₂ 0,45 %;
Paja de arroz (PA)	Tamaño de partícula: 2 mm; densidad 1,56 g/cm ³ ; densidad aparente 0,017 g/cm ³ ; pH=7,0	Ca 1,1-5,8 %; P 0,3-4,3%; Na 0,1-2,5 %; Mg 1,0-3,6%
Producto mejorador (PM)	Tamaño de grano: 1,5-2 mm, pH=7,88	Paja de arroz, Bagazo, Lodo activo y Urea; N 1 %; P 1,34 %
Bagazo de caña de azúcar (B)	Tamaño de grano: 1,5-2 mm;; densidad aparente 0,052 g/cm ³ ; pH=7,88	Lignina (20%), celulosa (42%) y hemicelulosa (25%)
Lodo activo (L)	Tamaño de grano: 1,6 mm; densidad 0,55 g/cm ³	Ca 12 %; Si 1,5; Mg 0,8 %; Na 0,15 %; P 1 %

2.2. Isotermas de adsorción y estudio cinético de los materiales empleados.

El experimento se realizó según el método descrito por Higuera y col., (2009), modificado a partir de las condiciones de trabajo existentes en el laboratorio. La variación radicó en la utilización de un equipo de agitación múltiple con seis posiciones, donde en cada vaso de precipitado se adicionó 1 L de agua de residual cruda y 20 g de

material natural. Los vasos se agitaron durante un tiempo de 20, 40 y 60 min a una velocidad de agitación de 200 rpm (Etim et al., 2016), con el objetivo de favorecer el contacto entre ambas fases y propiciar la adsorción de los contaminantes en el material. Después de 30 minutos de reposo, se realizó el muestreo de cada variante en correspondencia con los tiempos de residencia especificados. Se evaluó la cinética del proceso de adsorción de cada material natural, teniendo en cuenta el porcentaje de eliminación de la DQO y sulfuros como principales contaminantes del residual líquido. Además, se determinaron de modo preliminar las isothermas de adsorción en términos de la concentración inicial y final de DQO y sulfuros en el residual, según la ecuación 1, descrita por (Etim et al., 2016).

$$q = \frac{V(C_0 - C_f)}{m} \quad (1)$$

Donde:

q: capacidad de adsorción aparente (mg/g); C_0 : concentración inicial del contaminante (mg/L); C_f : concentración final del contaminante (mg/L); m: masa del material (g) y V: volumen de agua residual (L).

2.3. Experimento en columnas empacadas.

A partir de los resultados preliminares obtenidos se evaluó la capacidad de adsorción aparente para cada material filtrante empacado en condiciones similares a un sistema de lecho fijo. Para ello se utilizaron 6 columnas de vidrio de 25 cm de altura y 4 cm de diámetro, empacadas individualmente con cada material filtrante (agromena, zeolita, paja de arroz, producto mejorador, bagazo y lodo), ocupando una altura efectiva en la columna de 20 cm. Se circuló por gravedad 1 L de agua residual, con un tiempo de residencia de 20 min y una relación masa/volumen entre 0,04 y 0,69. En el efluente obtenido de cada columna se determinaron los parámetros: DQO, sulfuros, G y A; según las normas ISO 6060, (1989), APHA 4500-F, (2005) y 5520-D, (2005), respectivamente; y los porcentajes de eliminación respecto al contenido inicial en el residual. De igual forma, se determinó la capacidad de adsorción aparente para cada material de empaque, según la ecuación 1.

2.4. Análisis estadístico.

Con el objetivo de evaluar estadísticamente el efecto de los materiales naturales sobre el contenido de DQO y sulfuros en el residual, se realizó el análisis de varianza (ANOVA). Además, se determinaron las diferencias significativas entre las capacidades de adsorción de los materiales mediante las pruebas de múltiples rangos (método de Tukey), empleando el programa *Statgraphics Centurion XV.II*.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del agua residual y los materiales naturales.

El agua residual presentó una concentración de DQO de 1368,3 mg/L, 222,4 mg/L de sulfuros y 155 mg/L de G y A, los cuales fueron superiores a los establecidos en la regulación ambiental de referencia (NC 521, 2007). Otros indicadores de contaminación como sólidos suspendidos y fenoles se encontraron inferiores al límite establecido para su vertimiento de 150 mg/L y 0,5 mg/L, respectivamente.

3.2. Isotermas de adsorción y estudio cinético de los materiales naturales.

Todos los materiales alcanzan los mayores valores de capacidad de adsorción, en términos de DQO y sulfuros, al menor tiempo de residencia estudiado (20 min), observándose una tendencia a la reducción de estas variables hasta el final del experimento (Figura 1). En el caso de la DQO, para todos los materiales, se acentuó el incremento en su concentración con el aumento del tiempo de residencia, lo que puede estar asociado a: (I) a mayores tiempos de residencia ocurre la saturación de los sitios de adsorción sobre la superficie del adsorbente (Salleh et al., 2013) y/o (II) los materiales empleados, después de un tiempo de servicio, aportan materia orgánica al agua residual, que es cuantificada como DQO, lo que explica el incremento en su concentración.

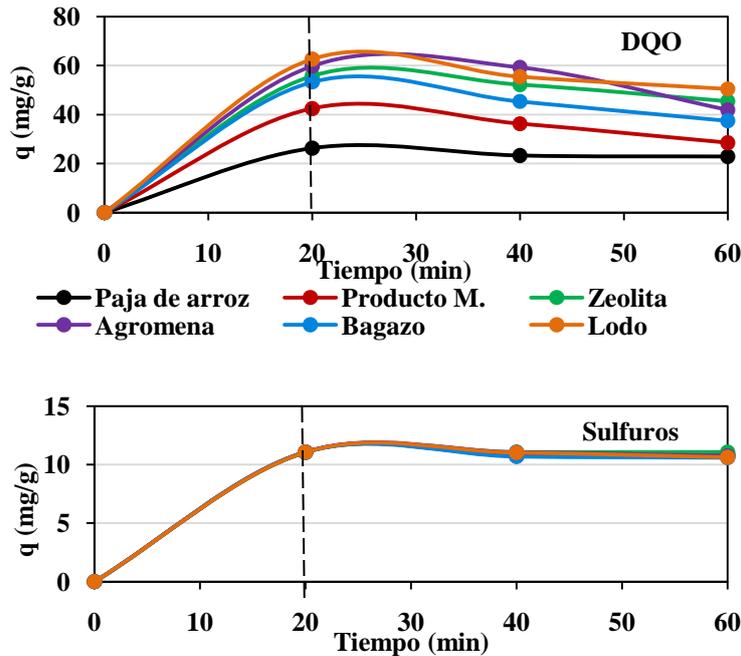


Figura 1. Capacidad de adsorción aparente de los materiales filtrantes en términos de DQO y concentración de sulfuros durante 20, 40 y 60 minutos

Solo con el empleo de la zeolita, agromena, bagazo y lodo como materiales de empaque es posible obtener los mayores valores de capacidad de adsorción, que superan los 50 mg/g a los 20 min de contacto, con diferencias estadísticamente significativas respecto al resto de los materiales, lo que representa una eliminación de DQO superior al 75%.

La zeolita, la agromena y el bagazo, poseen una estructura con cierto grado de porosidad y mayor área superficial, lo cual favorece la adsorción. La mayor capacidad de adsorción corresponde al lodo, con 63 mg/g y un 92% de eliminación de DQO, mientras que la paja de arroz mostró tener la menor capacidad de adsorción, con 26 mg/g y un 38% de eliminación.

Un estudio similar fue reportado por Hegazi (2013), donde emplearon como material adsorbente la cáscara de arroz en la adsorción de metales en aguas residuales industriales. En el estudio en discontinuo con 20 min de tiempo de contacto y 20 g de material se obtuvieron capacidades de adsorción para Pb, Cu, Ni y Fe de 1,3; 6,6; 8,2 y 40 mg/g, con una eliminación de 22, 24, 95 y 68%, respectivamente. Este resultado es coherente con lo obtenido en el presente trabajo para la paja de arroz con otros contaminantes.

Con respecto a los sulfuros, se alcanzan similares capacidades de adsorción con todos

los materiales, en un intervalo de 10-12 mg/g, con remociones superiores al 95%. En todos los casos la máxima adsorción (q) se alcanza en los primeros 20 min de contacto, permaneciendo casi invariable este parámetro a los 40 y 60 min, aunque con valores estadísticamente significativos.

Los resultados obtenidos a partir de las isothermas de adsorción correspondientes a cada material (Figura 2), proveen información importante sobre los mecanismos de adsorción, las propiedades superficiales y de afinidad del material adsorbente (Santhi et al., 2010). La capacidad de adsorción depende generalmente del material adsorbente, cuanto mayor sea la porosidad del material, mayor será el rendimiento esperado de adsorción por unidad de peso de adsorbente (Ures et al., 2015). En este estudio, los materiales con mejores resultados son los que presentan un menor tamaño de partículas, lo que favorece el proceso de adsorción.

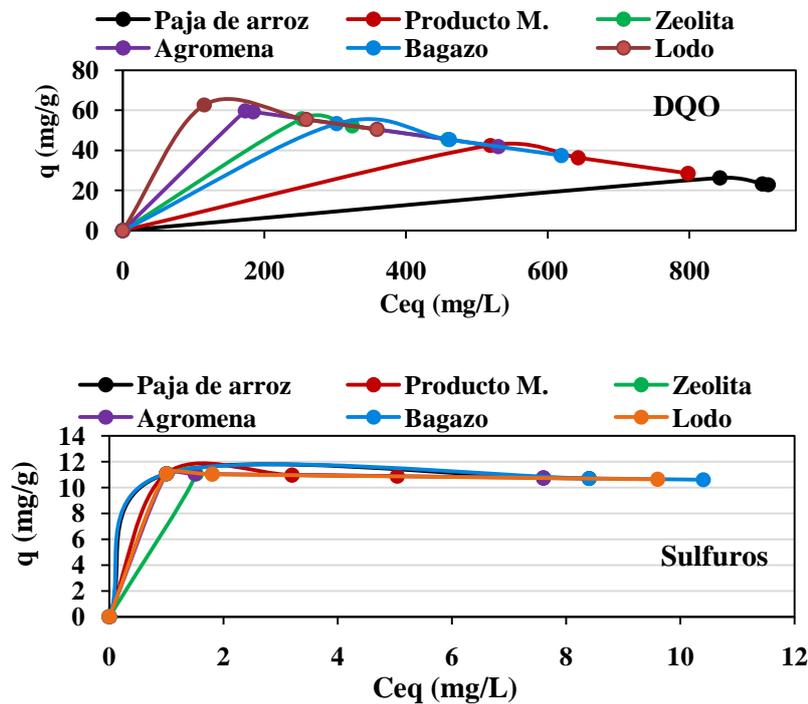


Figura 2. Capacidad de adsorción aparente (q) vs concentración en el equilibrio (Ceq) en términos de DQO y sulfuros

El análisis estadístico corrobora los resultados obtenidos anteriormente. Según el método de Tukey HSD aplicado para DQO se demostró la significancia estadística de cada uno de los factores (material y tiempo), con un 95% de nivel de confianza, dado que el valor-P es menor que 0,05.

Tabla 2. Pruebas de múltiples rangos para q (DQO) con los factores evaluados, método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

<i>Tiempo</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
60	12	36,9167	0,835117	X
40	12	43,6667	0,835117	X
20	12	48,6667	0,835117	X
<i>Material</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>

Paja	6	24,1667	1,18103	X
PM	6	29,5	1,18103	X
B	6	44,6667	1,18103	X
Z	6	50,8333	1,18103	X
Agrom	6	53,8333	1,18103	X
L	6	5,5	1,18103	X

La prueba ANOVA multifactorial para sulfuros mostró mayor significación estadística para el factor material entre los grupos bagazo de caña de azúcar, paja de arroz y lodo activo. Todos los grupos de tiempo se identificaron como homogéneos.

Tabla 3. Pruebas de múltiples rangos para q (sulfuros) con los factores evaluados, método: 95.0 porcentaje Tukey HSD

<i>Tiempo</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
60	12	10,9	0,0539449	X
40	12	10,925	0,0539449	X
20	12	11,0667	0,0539449	X
<i>Material</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
B	6	10,7667	0,0762896	X
Paja	6	10,8333	0,0762896	X
Agrom	6	10,9167	0,0762896	XX
PM	6	10,9833	0,0762896	XX
Z	6	11,05	0,0762896	XX
L	6	11,2333	0,0762896	X

3.3. Estudio en columnas empacadas.

Los resultados obtenidos en las columnas empacadas indican que con todos los materiales adsorbentes estudiados se reducen las concentraciones iniciales de DQO en el residual. Sin embargo, solo con la zeolita es posible alcanzar una remoción del 80%, con valores inferiores (278 mg/L) al Límite Máximo Permisible (LMP) (300 mg/L) para su vertimiento en áreas marinas para la navegación y otros usos (Clase F, NC 521, 2007). Este último material es considerado el soporte más utilizado en el tratamiento de aguas residuales, debido a su elevada capacidad de intercambio iónico e inmovilización microbiana (Milán et al., 2003, Fernández et al., 2007), además de servir como medio filtrante para efluentes con bajo contenido de sólidos y alta concentración de materia suspendida (Milán et al., 1999).

El menor % de eliminación de DQO (42%) fue obtenido con el lodo, con un valor de DQO de 788 mg/L (Figura 3). Esto pudiera deberse a la degradación biológica, e indica que bajo las condiciones experimentales (20 min de contacto) no es posible obtener una mayor degradación de materia orgánica. Con el resto de los materiales, aunque se cumple la norma de referencia, se favorece la eliminación del contenido de materia orgánica en el agua residual por encima del 50%. En el caso de las concentraciones de G y A, se obtienen eliminaciones superiores al 95% con todos los materiales adsorbentes, al cumplir con el límite máximo (< 50 mg/L) referido en la NC 521, (2007), para este parámetro.

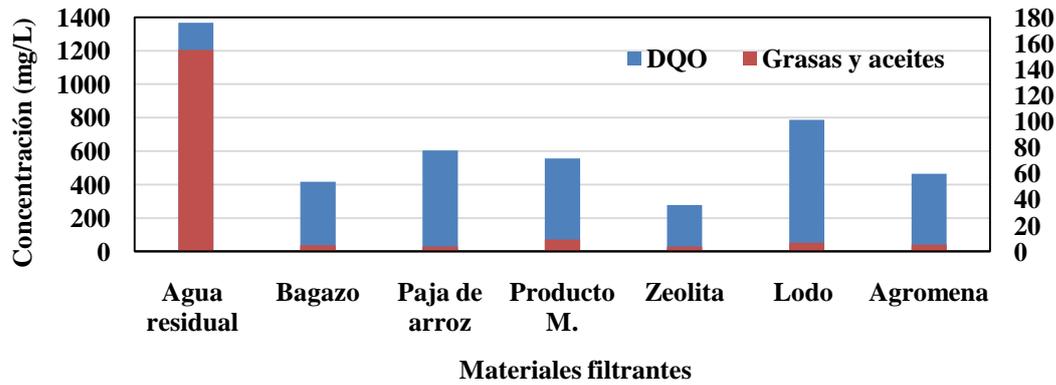


Figura 3. Concentración inicial y final de DQO y G y A en el residual filtrado por los diferentes materiales

El contenido de sulfuros en el residual tratado con todos los materiales filtrantes resultó ser inferior a 1 mg/L, siendo el límite de detección del método aplicado en esta determinación. Este valor se encuentra por debajo del límite permisible (< 2 mg/L) referido en la NC 521, (2007).

La capacidad de adsorción aparente fue determinada para cada material como empaque en las columnas, donde los de mayor capacidad adsorbente son el bagazo y la paja de arroz, con valores en el intervalo de 65-70 mg/g. Estas biomásas se caracterizan por ser residuos lignocelulósicos de estructura fibrosa con un elevado grado de porosidad (Das et al., 2015). Con el producto mejorador se logra una capacidad adsorbente de 43 mg/g, en lo que influye favorablemente la composición del material (un 10% de bagazo y 10% de paja de arroz). Resultados afines con el bagazo de caña natural y modificado con H_3PO_4 , han sido referidos por Cacaret-Carmnaty y colaboradores (Cacaret-Carmnaty et al., 2020). El bagazo natural mostró una remoción de Cu^{2+} de 18,3 % y capacidad de adsorción inferiores a 7,57 mg/g que fue mejorada hasta un 86,5 % a partir del bagazo modificado con H_3PO_4 . Los autores plantean que los grupos carboxílicos en su estructura, fueron los principales responsables de la adsorción del catión metálico, así como la acidez del medio.

En el presente estudio la zeolita se destaca con un bajo valor de capacidad adsorbente como material empacado, con la mayor reducción de DQO en el residual. El resultado es contrastante, y puede explicarse a partir de la elevada masa de zeolita (173 g) utilizada como empaque en la columna, debido a la baja granulometría del material que permite ocupe mayor masa en el mismo volumen de empaque. Esto indica que para lograr una elevada remoción de materia orgánica se requiere una mayor masa de zeolita, con respecto a la masa empleada en el resto de los materiales. Con la agromena, se observa un comportamiento similar ya que presenta una granulometría semejante (con un 42% de zeolita en su composición) con una masa de 161 g, lo que explica su baja capacidad adsorbente como material empacado.

De igual forma, el lodo muestra una baja capacidad de adsorción (6,1 mg/g), que corresponde con la menor remoción de DQO obtenida, por tanto, se infiere que el tiempo de contacto de 20 min no es suficiente para garantizar la degradación parcial o total de la DQO del residual. En estudios donde se evaluó la adsorción de metales (Cu, Cd, Ni, Zn y Cr) sobre lodo activado y lodo seco con tiempos de contacto entre 30 min y 5 h, se alcanzaron valores entre 18-44 mg/g durante los 30 min de contacto con el

lodo activado, siendo el lodo seco el de menor capacidad de adsorción (3-20 mg/g) (Van Hullebusch et al., 2005).

Por lo anterior, es importante profundizar en el estudio de adsorción y características de los materiales evaluados, para la eliminación de los contaminantes de aguas de la industria petrolera, mediante la determinación de los modelos que siguen las isotermas de adsorción, los modelos cinéticos entre otros parámetros de operación. Todo ello con el fin de demostrar la efectividad en la remoción de los contaminantes, la cantidad máxima que puede ser adsorbida o intercambiada por un determinado estudio y para el diseño de columnas de adsorción. De este modo se permitirá seleccionar el adsorbente con mayor potencialidad antes de hacer pruebas más costosas y demostrar que es una solución aceptable para la industria.

4. CONCLUSIONES

1. Los materiales estudiados alcanzaron los mayores valores de capacidad de adsorción de DQO (26-63 mg/g) y de sulfuros (10-12 mg/g) a 20 min de contacto con el residual.
2. Bajo las condiciones de empaque, las mejores capacidades de adsorción de DQO corresponden al bagazo de caña, la paja de arroz y el producto mejorador con 70, 67 y 43 mg/g, respectivamente; mientras que en los sulfuros, grasas y aceites se logró una eliminación superior al 95% con todos los materiales.

REFERENCIAS

- Ahmad, S., Wong, Y.C., & Veloo, K.V., Sugarcane bagasse powder as biosorbent for reactive red 120 removals from aqueous solution., IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, Vol. 140, 012027.
- APHA 4500-F., Sulfide-Iodometric Method., Standard Methods for the examination of water & wastewater., 21st ed. American Public Health Association (APHA), Washington DC, USA, 2005, pp. 4-176.
- APHA 5520-D., Chemical Oxygen Demand-Closed Reflux, Colorimetric Method., Standard Methods for the examination of water & wastewater., 21st ed. American Public Health Association (APHA), Washington DC, USA, 2005, pp. 5-18.
- Cacaret-Carmnaty, D.A., Rodríguez-Matos, J., Ricardo-Lobaina, C.A., Quesada-González, O., & Bahín-Deroncelé, L., Utilización de bagazo de caña de azúcar natural y tratado ecucquímicamente, como material adsorbente para Cu²⁺., Revista Cubana de Química, Vol. 32, No. 2, 2020, pp. 331–344.
- CIP-14-184. Hoja de Seguridad Fertilizante Agromena-G., Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica, 2015, pp. 1-12.
- Das, A., Mondal, C., & Roy, M., Pretreatment Methods of Ligno - Cellulosic Biomass., Journal of Engineering Science and Technology Review, Vol. 8, No. 5, 2015, pp. 141-165.
- De Gisi, S., Lofrano, G., Grassi M., & Notarnicola, M., Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review., Sustainable Materials and Technologies, Vol. 9, Jun., 2016, pp.10–40.
- Etim, U.J., Umoren, S.A., & Eduok, U.M., Coconut coir dust as a low cost adsorbent for

- the removal of cationic dye from aqueous solution., *Journal of Saudi Chemical Society*, Vol. 20, 2016, pp. 67-76.
- Fernández, N., Montalvo, S., Fernandez, S., Guerrero, L., Cortés, I., Borja, R., Sánchez, E., & Travieso L., Real evidence about zeolite as microorganisms immobilizer in anaerobic fluidized bed reactors., *Process Biochemistry*, Vol. 42, Dic., 2007, pp. 721–728.
- Garzón-Zúñiga, M.A., Buelna, G., & Moeller-Chávez, G.E., La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias., *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol. III, No.3, Sep., 2012, pp. 153-161.
- Hegazi, H.A., Removal of heavy metals from wastewater using agricultural and industrial wastes as adsorbents., *Housing and Building National Research Center Journal*, Vol. 9, Mar. 2013, pp. 276–282.
- Higuera, O.F., Arroyave, J.F., & Florez, L.C., Diseño de un biofiltro para reducir el índice de contaminación por cromo generado en las industrias del curtido de cueros., *Dyna*, Universidad Nacional de Colombia, Vol. 76, No. 160, Dic. 2009, pp. 107-119.
- ISO 6060., Water quality-Determination of the chemical oxygen. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization (ISO), 1989, pp. 1-7.
- Kennes, C., López, M.E., Montes, M., & Veiga, M.C., Waste gas treatment in bioreactors: environmental engineering aspects., *Journal of Environmental Engineering and Science*, Vol. 9, No. JS1, Jul. 2014, pp. 20-28.
- Khalid, M, Joly, G., Renaud, A., & Mangnoux, P., Removal of phenol from water by adsorption using zeolites., *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 43, No. 17, Sep. 2004, pp. 5275-5280.
- Masoud, M.S., El-Saraf, W.M., Abdel – Halim, A.M., Ali, A.E., Mohamed, E.A., & Hasan, H.M.I., Rice husk and activated carbon for waste water treatment of El-Mex Bay, Alexandria Coast, Egypt., *Arabian Journal of Chemistry*, Vol. 9, 2016, pp. 1590–1596.
- Milán, Z., Sánchez, E., Borja, R., Ilangovan, K., Pellón, A., Roviroso, N, Weiland, P., & Escobedo, R., Deep bed filtration of anaerobic cattle manure effluents with natural zeolite., *Journal of Environmental Science and Health Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, Vol. 34, No. 2, 1999, pp. 305-332.
- Milán, Z., Villa, P., Sánchez, E., Montalvo, S., Borja, R., Ilangovan, K., & Briones, R., Effect of natural and modified zeolite addition on anaerobic digestion of piggery waste., *Water Science and Technology*, Vol. 48, No. 6, 2003, pp. 263- 269.
- NC 521., Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas. Especificaciones., Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba, Cuban National Bureau Standards, 2007, pp. 1-14.
- Prieto, J.O., Aguilera, D.M., Curbelo, A., Broche, M.H., & Mollineda, A., Estudio cinético y termodinámico de la adsorción de plomo (II) en ceniza de bagazo de caña de azúcar., *Centro Azúcar*, Vol. 46, No. 3, 2019, pp. 1-10.
- Prieto, J.O., Quero, P.C., Enriquez, M., & Ribalta, J.A., Adsorción del colorante Rojo Congo con polvo de cáscara de coco., *Centro Azúcar*, Vol. 48, No. 1, 2020, pp. 81-92.
- Salleh, Z., Yusop, M.Y.M., & Rosdi, M.S., Mechanical properties of activated carbon

- (abdullah, alasady, ariffin, & rahman) coir fibers reinforced with epoxy resin., *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, Vol. 5, Dic. 2013, pp. 631-638.
- Sánchez-Urbe, J., Tratamiento y disposición final del agua producida en yacimientos petroleros., Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Petrolero, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- Santhi, T., Manonmani, S., & Smitha, T., Kinetics and isotherm studies on cationic dyes adsorption onto annona squamosa seed activated carbon., *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2, No. 3, 2010, pp. 287-295.
- Ures, P., Suárez, J., & Jácome, A., Adsorción en carbón activo. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil., *Tratamientos terciarios. FT-TER-002*, La Coruña, España, Universidad de la Coruña, 2015, pp. 2-24.
- Van Hullebusch, E.D., Peerbolte, A.M., Zandvoort, M.H., & Lens, P.N., Sorption of cobalt and nickel on anaerobic granular sludges: isotherms and sequential extraction., *Chemosphere*, Vol. 58, No. 4, 2005, pp. 493–505.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- M.Sc. Yuletsis Díaz Rodríguez. Elaboró, desarrolló y dirigió la investigación. Participó en la realización de los análisis y discusión de los resultados de la investigación. Realizó la escritura del artículo.
- Ing. Leonardo Mendiola Lau. Participó en el desarrollo experimental de la investigación y en la realización de los análisis químicos.
- Dr.C. Aimeé González Suárez. Participó en el desarrollo de la investigación y colaboró con la discusión de resultados y escritura del artículo.
- M.Sc. Lester Rivas Trasancos. Participó en el desarrollo experimental de la investigación y en la realización de los análisis químicos.
- M.Sc. Roberto Romero Silva. Colaboró con el aporte de los materiales estudiados e información de los mismos.