
Caracterización y evaluación del bagazo de caña de azúcar como biosorbente de hidrocarburos

Pastora de la Concepción Martínez Nodal ^a, Iván Rodríguez Rico

^b, Guillermo Esperanza Pérez ^a, Jorge Leiva Mas ^b.

^aCentro de Estudio de Química Aplicada. Universidad Central de Las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½ Santa Clara. CP 54830, Villa Clara, Cuba. ^bDepartamento Ingeniería Química. Facultad de Química – Farmacia Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Cuba. Carretera a Camajuní Km. 5. Santa Clara. Cuba. CP: 54830

Characterization and evaluation of sugarcane bagasse as biosorbent of hydrocarbons

Caracterització i avaluació del bagàs de canya de sucre com biosorbent d'hidrocarburs

Recibido: 13 de febrero de 2013; revisado: 4 de septiembre de 2013; aceptado: 7 de noviembre de 2013

RESUMEN

En la caracterización del biosorbente (bagazo de caña de azúcar natural, BN) se determinaron diferentes parámetros físico-químicos: humedad, densidad aparente, densidad real, porosidad, flotabilidad, capacidad máxima de sorción y microscopia electrónica de barrido. Los resultados obtenidos permitieron definir la fracción de interés (+1 -2 mm), en base al rendimiento en el tamizado (41%), la homogeneidad de dicha fracción y su capacidad de sorción (2g diesel/g BN). Los resultados obtenidos en los estudios de equilibrio de sorción fueron ajustados utilizando los modelos de isothermas de sorción Langmuir y Freundlich. La curva de ruptura se obtuvo mediante un sistema de flujo continuo (1 L/h) de agua oleosa a través de un lecho fijo de 59,997 g de BN. Los estudios realizados demostraron que el BN tiene potencialidades como biosorbente de hidrocarburos a la granulometría estudiada (+1 -2 mm). Para el análisis estadístico, se utilizó el software statgraphics centurión XV.II. El punto de ruptura o quiebra, se observó a las 12 horas de operación, en las condiciones experimentales a escala de laboratorio. Se concluye que el biosorbente evaluado es efectivo en la remoción de los indicadores de la contaminación: grasas, aceites (98,5%) e hidrocarburos totales (94,8%).

Palabras clave: biosorbentes, bagazo de caña de azúcar, remoción de hidrocarburos.

SUMMARY

In the characterization of biosorbent (natural sugar cane bagasse, NB) were determined different physicochemical parameters: moisture, bulk density, particle density, porosity, buoyancy, sorption capacity and scanning electron microscopy. The obtained results allowed define the fraction of interest (+1 -2 mm) given by the sieving yield (41%), the homogeneity of said fraction and its sorption capacity (2g diesel/g BN). The results obtained in the sorption

equilibrium studies were adjusted using the Langmuir and Freundlich sorption isotherms models.

The breakthrough curve was obtained using a continuous flow system (1 L / h) of oleaginous water, through a fixed bed of 59,997 g of BN. Studies showed that the BN has potential as hydrocarbon biosorbent studied the grain size (+1 -2 mm). For statistical analysis, we used the software Statgraphics centurion XV.II. The breaking point or bankruptcy was observed at 12 hours of operation, under the experimental conditions at laboratory scale. We conclude that the tested biosorbent is effective in removing in removing pollution indicators: fats, oils (98,5%) and total hydrocarbons (94,8%).

Keywords: biosorbents, sugar cane bagasse, removal of hydrocarbons

RESUM

En la caracterizació del biosorbent (bagàs de canya de sucre natural, BN) es van determinar diferents paràmetres físicoquímics: humitat, densitat aparent, densitat real, porositat, flotabilitat, capacitat màxima de sorció i microscòpia electrònica de rastreig. Els resultats obtinguts van permetre definir la fracció d'interès (+1 -2 mm), basat en el rendiment en el tamisat (41%), l'homogeneïtat d'aquesta fracció i la seva capacitat de sorció (2g dièsel / g BN). Els resultats obtinguts en els estudis d'equilibri de sorció es van ajustar utilitzant els models d'isotermes de sorció Langmuir i Freundlich.

La corba de trencament es va obtenir mitjançant un sistema de flux continu (1 L/h) d'aigua oliosa a través d'un llit fix de 59,997 g de BN. Els estudis realitzats van demostrar que el BN té potencialitats com biosorbent d'hidrocarburs a la granulometria estudiada (+1 -2 mm). Per a l'anàlisi

*autor para correspondencia: pastoramn@uclv.edu.cu Tel. (53)(42)-281510; Fax:(53)(42)-81608

estadística, es va utilitzar el programari Statgraphics centurió XV.II. El punt de trencament o fallida, es va observar a les 12 hores d'operació, en les condicions experimentals a escala de laboratori. Es conclou que el biosorbent avaluat és efectiu en la remoció dels indicadors de contaminació: greixos, olis (98,5%) i hidrocarburs totals (94,8%) .

Paraules clau: biosorbents, bagàs de canya de sucre, remoció d'hidrocarburs.

INTRODUCCIÓN

La mayor parte de la contaminación por hidrocarburos en cuerpos de agua proviene de fuentes terrestres como: aguas residuales industriales (aguas oleosas con alto contenido de hidrocarburos), a través de la atmósfera, derrames de petróleo y fluviales urbanos que de forma sistemática se incorporan al medio por el arrastre de hidrocarburos a través de los sistemas de alcantarillado y drenaje pluvial de las ciudades. El daño que ocasiona depende del tipo de petróleo y su procedencia. Los productos livianos como la gasolina y el diesel, son más tóxicos que los crudos ya que se evaporan a gran velocidad, y los crudos pueden permanecer por mucho tiempo en la zona donde haya ocurrido el derrame.

Los métodos tradicionales desarrollados para el tratamiento de efluentes han sido estudiados a fondo, definiéndose de forma muy clara las deficiencias que los mismos presentan. Entre las principales desventajas de estos procedimientos se encuentran las bajas eficiencias que se alcanzan, los altos costos de operación, insumos y requerimientos, obligando al hombre a encontrar nuevas soluciones. (Teas, 2002; Brito, 2006; Aloma, 2011; Ortiz, 2006; Martínez 2008)

Investigaciones recientes han demostrado que algunos materiales pueden ser empleados como sorbentes de hidrocarburos. Tal es el caso de fibras de palma, coco, caña de azúcar, buchón de agua, tallos de flores, cabellos humanos, plumas de pollos, entre otros. (Knight, 2000; Ortiz, 2006, Salazar 2012). Estudios realizados por (Beom-Goo, 2000; Reyes 2003) de biomateriales lignocelulósicos han aportado resultados significativos en la remoción de hidrocarburos.

El presente trabajo tiene como objetivo, caracterizar y evaluar el bagazo de caña de azúcar como biomaterial sorbente, en la depuración de aguas oleosas, contaminadas con hidrocarburos

MATERIALES Y MÉTODOS

Los sorbentes deben poseer propiedades adecuadas según la aplicación que se les va a dar. Por ejemplo: si se utilizan en un lecho fijo a través del cual pasará un fluido, no deben ocasionar una alta caída de presión, ni deben ser arrastrados fácilmente por la corriente de fluido, deben poseer una gran superficie por unidad de peso y no solo se debe tener en cuenta su capacidad de sorción, sino también que el mismo tenga una vida útil o una adecuada disposición final (Reyes, 2003)

Preparación del biomaterial sorbente. El bagazo natural fue sometido a las operaciones: secado, molienda y tamizado para obtener una biomasa uniforme (Brito 2006

y Alomá 2011). Para la molienda se utilizó un molino de rotor de 6 paletas modelo SR-2. La muestra del material granular pesada, se colocó en el sistema de tamizado (Serie Tyler: 4 mm, 2 mm, 1 mm y 0,5 mm) y se sometió a un proceso de vibraciones durante un período de 10 minutos. Posteriormente se recogieron las fracciones depositadas en cada tamiz y se determinó el rendimiento de cada una de ellas respecto al total procesado. Al bagazo de caña natural se le realizó una caracterización físico-química: humedad, densidad aparente, flotabilidad y textura de las fibras (Microscopía Electrónica de Barrido), cuyos procedimientos se describen a continuación:

Determinación de humedad: Se realizó en una balanza de humedad Sartorius modelo MC 40, a una temperatura de 105°C, de forma automática a la temperatura programada.

Determinación de la densidad real. (Método Picnométrico): Se empleó un picnómetro de tipo Weld de 50 mL. La técnica consistió en pesar una masa determinada del material la cual se introduce en el picnómetro, luego se le adiciona el solvente (agua destilada), hasta el nivel de enrase.

Determinación de la densidad aparente: Se utilizó una probeta seca y limpia. La técnica consistió en adicionar una masa del material hasta un determinado volumen (40 mL), luego se pesa la probeta con todo su contenido, y por diferencia se obtiene la masa del sólido.

Para realizar la pesada en ambas determinaciones se utilizó una balanza analítica DENVER INSTRUMENT modelo TB-224^a (d= 0,0001g),

Determinación de la porosidad: La porosidad de la partícula de un sólido es una medida de la rugosidad y la capacidad de la superficie, se estimó a partir de su relación con la densidad, según la ecuación:

$$e = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}} = \frac{\rho_{real} - \rho_{ap}}{\rho_{real}} \quad Ec.1$$

Donde: ρ_{ap} = densidad aparente y ρ_{real} = densidad real del BN

Determinación de Flotabilidad: Se colocó aproximadamente un gramo de material sobre agua destilada por espacio de dos horas, después de las cuales, se observó si el material permanecía sobre la superficie de esta. (Ortiz, 2006, Martínez, 2008, Salazar 2012)

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Se efectuó mediante el microscopio electrónico de barrido, Modelo JEOL JSM – 5900 LV. Utilizando el procedimiento descrito por (Aloma, 2011)

Determinación de la capacidad de sorción de la fracción de interés, con el hidrocarburo seleccionado. Para determinar la capacidad de sorción, se adaptó la metodología aplicada en otros estudios realizados por (Ortiz, 2006, Salazar 2012) basada en el protocolo canadiense Oíl Sorbente: Testing Protocol and Certification Listing Program y de la norma (ASTM F 726-99), en la cual se determina la masa de hidrocarburo sorbido por gramo de material sorbente, mediante la ecuación:

$$e = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}} = \frac{\rho_{real} - \rho_{ap}}{\rho_{real}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde: C_a = capacidad de sorción, m_i = masa de material impregnado (peso del biosorbente e hidrocarburo sorbido) y m_0 = masa del material biosorbente seco.

La capacidad de sorción máxima se determinó de forma estática y dinámica. El procedimiento utilizado en los ensayos de sorción se muestra en la figuras 1.

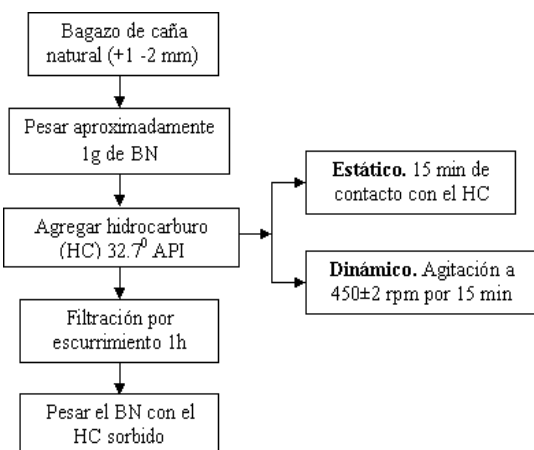


Figura.1. Procedimiento utilizado para determinación de la capacidad de sorción máxima estática y dinámica al BN.

Para los ensayos gravimétricos se utilizó una balanza analítica marca DENVER INSTRUMENT modelo TB-224^a, d° = 0,0001g. Directiva N^o 90/384/CEE para balanza de funcionamiento no automático aplicable en los estados miembros de la comunidad europea. Los ensayos de sorción dinámicos se utilizaron en el equipo EUROSTAR IKA LABORTECHNIK, acoplado a un VICOCLIP IKA LABORTECHNIK con impelente tipo turbina cerrada de paleta. Los cálculos fueron programados y procesados en Excel y para el análisis estadístico se utilizó el software statgraphics centurión XV.II

Experimentos de sorción de hidrocarburo con BN en discontinuo. Como el diesel es insoluble en agua, se procedió de la siguiente forma: en cada vaso de precipitado de 1 litro de capacidad se añadió la cantidad de diesel correspondiente, se tomó su peso (g) y se llevó a volumen final de 1 litro con agua destilada. Los vasos de precipitados fueron sumergidos en un termostato JULABO. Se comenzó la agitación (450 rpm) y luego se le adicionó 1 gramo de bagazo natural, para un tiempo de contacto de 15 minutos. Después de transcurrido ese tiempo, las muestras fueron filtradas por escurrimiento de 1 hora a través de un embudo de malla 0,125 mm (120 Meshes). La cantidad de diesel agregado a cada frasco tenía una concentración inicial de: 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; gramos de diesel por litro de agua respectivamente. Al filtrado residual se le determinó el contenido de hidrocarburos por el método de extracción gravimétrica con n- hexano (APHA, 2005). Se realizaron 3 réplicas a dos temperaturas diferentes (35 °C y 45 °C).

Los modelos utilizados fueron el de Langmuir y Freundlich. El cálculo de las constantes se realizó mediante las ecuaciones linealizadas de ambos modelos:

Expresión linealizada del modelo de Langmuir

$$\frac{1}{q_s} = \frac{1}{q_{max}} + \frac{1}{k_{ads} \cdot q_{max} \cdot C_s} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde: a_m = máxima adsorción que puede ser obtenida y b = constante relacionada con la energía de adsorción.

Expresión linealizada del modelo de Freundlich

$$a = K_f C_s^{1/n} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde: K_f = constante y n = afinidad adsorbente-adsorbato (adimensional)

Para el cálculo de los parámetros termodinámicos, teniendo en cuenta el parámetro b de la ecuación linealizada de Langmuir a las dos temperaturas estudiadas.

Determinación del punto de ruptura o quiebra. Se empleó una columna ($H=0,32m$ y $d=0,052 m$) rellena con bagazo de caña de azúcar natural (aproximadamente 59,997 g), a la cual se le hizo pasar agua oleosa (flujo continuo 1 L/h). A la salida se tomaron muestras cada 30 minutos y se les determinó: grasas, aceites (G y A) e hidrocarburos (HC), como variables respuestas. (Chudoba, 1987, Carrasco, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 2 se muestra el rendimiento de cada una de las fracciones obtenidas con respecto al total de bagazo procesado, en el proceso de tamizado realizado.

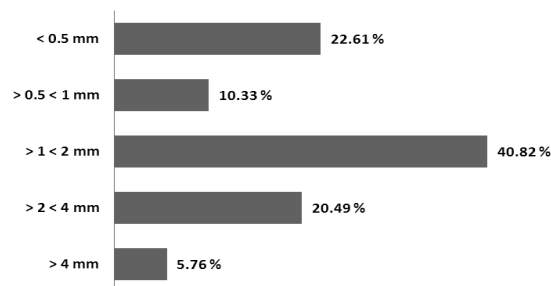


Figura 2. Análisis granulométrico de la operación de tamizado del bagazo natural.

En la práctica las operaciones de adsorción con carbón activado en columnas continuas, se lleva a cabo con material granulado de diámetros de partículas más finas (Danglad 2010). No obstante se decidió realizar el estudio con una granulometría mayor (+1 -2 mm) por: la homogeneidad de dicha fracción, porque proporciona mejores condiciones hidrodinámicas y por la importancia de sus porcentajes máxicos en la muestra (41 %), lo que resultaría operacional y económicamente ventajoso, de ser efectivas para el tratamiento de los residuales líquidos a tratar. Esto se evidencia en estudios realizados por (Belisário et, al 2009) donde corroboró que el proceso de remoción de hidrocarburos está influenciado, por el diámetro de las partículas, altura del empaque, tiempo de contacto entre las fases (sólido-líquido), la concentración inicial del petróleo en el residual a tratar y la velocidad del fluido a través de la columna.

En la tabla 1 se resumen las propiedades físicas del BN (+1 -2 mm) utilizado en los estudios realizados.

Tabla 1. Resultados estimados de algunas propiedades físicas del bagazo natural.

Propiedad física	Valor promedio
Humedad a 105 °C (%)	7,57±1,9E-01
Densidad aparente (g/cm ³)	0,0697±6,9E-06
Densidad real (g/cm ³)	0,1656±9,9E-04
Porosidad	0,60±1,4E-05
Flotabilidad	Sí

Las propiedades físicas de los sorbentes son fundamentales como criterio para la selección de diferentes materiales y la aplicación que se les va a dar a los mismos ya sea en derrames de hidrocarburos en suelos y cuerpos de agua o como rellenos en columnas de lecho fijo, es por ello que los métodos utilizados para su determinación deben ser confiables y reproducibles. Los valores obtenidos en la caracterización realizada a la fracción seleccionada, son similares y estadísticamente superiores a los obtenidos por (Danglad 2010) y corroboran que el BN es un sorbente efectivo en la remoción de hidrocarburos en agua.

Microscopía Electrónica de Barrido. En la Figura 2 se aprecian los haces conductores (pequeños tubos) que pueden ser útiles para el flujo del hidrocarburo por capilaridad, según resultados obtenidos por (Martínez, 2008) y coincidentes con los obtenidos por (Ortiz, 2006).

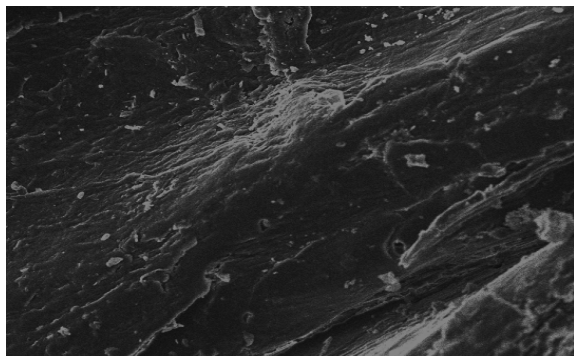


Figura 2. Microscopía electrónica de barrido del bagazo natural.

En la **Tabla 2** se muestran los valores de capacidad de sorción (Ca) obtenidos, de forma estática y dinámica. Teniendo en cuenta lo reportado por (Danglad 2010, Salazar 2012) en su estudio con materiales orgánicos naturales, el bagazo de caña evaluado promete resultados prometedores como un biosorbente de hidrocarburos en agua, con características similares a los ofertados en el mercado internacional como el 3M™ microcordines T4, T8, T12, el PV 15 material vegetal particulado, entre otros (<http://multimedia.3m.com>). Además de su buen desempeño, la abundancia, disponibilidad y bajo costo de este subproducto de la industria azucarera y su biodegradabilidad, lo hacen un excelente material sorbente sostenible. Esto permite reducir considerablemente los costos adicionales de almacenamiento o disposición final que tienen los materiales sorbentes sintéticos fabricados en su mayoría con, polipropileno o poliuretano.

Tabla 2. Resultados obtenidos en la determinación de la capacidad de sorción del BN (+1 -2 mm) con el hidrocarburo seleccionado (32,7 °API)

Ca Dinámica (g HC/g de BN)	Ca Estática (g HC/g de BN)
1,77±3,0E-02	1,81±1,0E-01

Los resultados obtenidos en los experimentos de sorción de hidrocarburo con BN en discontinuo fueron procesados utilizando modelos de isotermas de sorción que describen el equilibrio entre el diesel adsorbido y el que queda en el filtrado residual, a una temperatura constante.

Ecuación linealizada de Langmuir. Los valores de las constantes para ambas temperaturas se presentan en la tabla 3. En la misma se puede observar que a medida que aumenta la temperatura disminuye la capacidad de sorción del sorbente, lo cual coincide por lo planteado por (Treybal 1980) para el caso de procesos exotérmicos. Se puede observar que la capacidad de sorción estática y dinámica reportadas en la tabla 2 son muy similares a las obtenidas por la ecuación linealizada de Langmuir.

Tabla 3. Valores de las constantes de Langmuir a 35 °C y 45 °C.

Langmuir	T (°C)	Ecuación de regresión	R ²	b (L/g)	a _{máx.} (g HC/g BN)
	35	y= 0,7432x + 0,1053	0,99	7,06	1,44
	45	y= 0,6923 + 0,1674	0,98	4,14	1,35

Ecuación linealizada de Freundlich. En la tabla 4 aparecen los valores de estas constantes de la ecuación de Freundlich para el sistema estudiado.

Tabla 4. Constantes de Freundlich a 35 °C y 45 °C.

Freundlich	T (°C)	Ecuación de regresión	R ²	K (L/g)	1/n	n
	35	y= 0,7432x + 0,1053	0,96	1,960	0,341	2,936
	45	y= 0,6923 + 0,1674	0,95	1,995	0,321	3,119

En el modelo de Freundlich a las temperaturas de 35 °C y 45 °C, se observan buenos ajustes de los datos, el valor de n (parámetro empírico que varía con el grado de heterogeneidad y da la medida de la intensidad de la adsorción) es mayor de 1, indicando la ocurrencia fundamentalmente de una sorción física, en las condiciones experimentales dadas. En estudios realizados por (Belisário et al 2009, Brito 2006, Elizalde-González 2008 y 2009, Alomá 2011) se han aplicado ambos modelos para describir los procesos de adsorción en materiales sorbentes naturales, utilizados en la remoción de diferentes contaminantes.

En la tabla 5 se observan los parámetros termodinámicos calculados. Los valores obtenidos evidencia el predominio de una sorción física; justificándose además, que el proceso es exotérmico y espontáneo. Según (Danglad 2012) esto se debe a que existen afinidades naturales entre la superficie (hidrofoba) y el hidrocarburo disperso.

Tabla 5. Parámetros termodinámicos calculados.

Temperatura (K)	ΔG [kJ.mol ⁻¹]	ΔH [kJ.mol ⁻¹]	ΔS [kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹]
308	-5,00	-43,46	-0,12
318	-3,76		

Curva de ruptura o quiebra. En las figura 5 se puede observar un punto crítico denominado punto de ruptura o de quiebra, a las 12 horas de operación, que representa el punto donde, para propósitos prácticos, la columna está en equilibrio con el influente y después del cual ocurre poca remoción adicional de soluto. En este punto se hace necesario remplazar la columna. Estos resultados están en correspondencia con las características físico-química del material utilizado y la concentración inicial del hidrocarburo en el residual líquido, esto se corrobora por los resultados obtenidos por (Danglad 2012), donde el punto de ruptura se obtiene a las 5 horas de operación para concentraciones mayores.

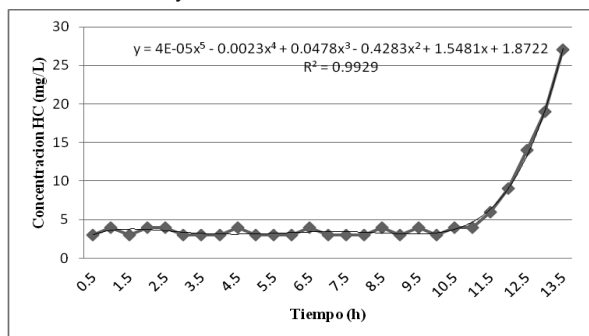


Figura 5. Curva de ruptura o quiebra utilizando una columna de laboratorio (H/D=6,2) rellena con BN, para una concentración inicial de 175 mg/l de hidrocarburo total.

Remoción de los contaminantes. En la tabla 6 se reportan las concentraciones de hidrocarburos y grasas y aceites en el afluente y el efluente de la columna y el porcentaje de remoción que se logra con la utilización del biosorbente evaluado (BN): grasas, aceites (98,5%) e hidrocarburos totales (94,8%). Lo anterior evidencia que el bagazo de caña evaluado tiene potencialidades como sorbente para remoción de hidrocarburos en agua, utilizando columnas de lecho fijo.

Tabla 6. Concentración de hidrocarburos y grasas y aceites en el afluente y efluente de la columna.

Contaminantes	Unidad de medida	Valor medio afluente	Valor medio efluente	% de remoción
Grasas y aceites	(mg/L)	992,00±15,18	14,00±4,68	98,5
Hidrocarburos	(mg/L)	175,00±9,73	9,00±2,46	94,8

CONCLUSIONES

1. La caracterización y evaluación realizada demostraron que el bagazo de caña de azúcar tiene potencialidades como sorbente de hidrocarburos, lográndose una remoción significativa de los indicadores de la contaminación: grasas y aceites (98,5%) e hidrocarburos totales (94,8%), por lo que se recomienda como relleno en columnas de lecho fijo para la remoción de hidrocarburos en aguas residuales.
2. Los parámetros termodinámicos calculados evidencia el predominio de una sorción física; justificándose además, que el proceso es exotérmico y espontáneo.
3. En las condiciones experimentales estudiadas la columna puede operar 12 horas continuamente antes de ser remplazada.

Bibliografía

1. TEAS CH., K. S., ZANIKOS F, STOUMAS S., LOIS EI, ANASTOPOULOS G. (2002). "Investigation of the effectiveness of absorbent materials in oil spill clean up." Spill Science & Technology. Bulletin 8: pp. 259 – 264.
2. ORTIZ, P. G. A., FONSECA; F, RODRÍGUEZ G, MONTENEGRO L. (2006.). "Biomateriales sorbentes para la limpieza de derrames de hidrocarburos en suelos y cuerpos de agua." Ingeniería e Investigación. ISSN 0129-5608, Vol. 26, N°. 2, págs. 20-27
3. BRITO J, RODRIGUEZ. I. (2006). "Propuesta de una tecnología para obtener un biosorbente de Cr³⁺ a partir del bagazo de caña. Escalado a nivel de planta piloto". Tesis de maestría. Tutor: Iván Leandro Rodríguez Rico. Facultad de Química Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba.
4. MARTINEZ, P., RODRÍGUEZ, I, ESPERANZA, G, RODRÍGUEZ, R. MONTEAGUDO, M. (2008). Utilización del bagazo de caña como biomaterial sorbente de hidrocarburos presentes en aguas oleosas. Centro Azúcar No 3. ISSN: 02535777.
5. KNIGHT R., P. J., BORER R., CLARKE J. AND PRIES J. (2000). Constructed wetlands for treatment of hydrocarbons. Ecological Engineering, 15, pp. 41-55.
6. BEOM-GOO, L., HAN, J and ROWELL R. (1999). Oil Sorption by lignocellulosic fibers. Kenaf Properties, Processing and Products; Mississippi State University, Ag & Bioengineering, pp. 423-433. ISBN 0-9670559-0-3. Chapter 35.
7. REYES, J. (2003). "La biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental". Revista Centro azúcar No 2: pp. 14-20. ISSN: 02535777.
8. TREYBAL, R. E. (1979). Operaciones de Transferencia de Masa. New York. Mc Graw-Hill. Sección 4, Capítulo XI, pp 581-595.
9. EATON, A. Clesceri, L. Rice, E. APHA. AWWA. WEF. Standard methods for examination of water & wastewater: Centennia L Edition. NO 21n. American Public Gealth Associaciati, 2005. ISBN: 9780875530475
10. CARRASCO, F., MENÉNDEZ, J. (2010). "Nuevos materiales y tecnologías para el tratamiento del agua." Universidad Internacional de Andalucía. ISBN: 978-84-7993-202-2. www.libreriaaluces.com/.../nuevos-materiales-y-tecnologias-para-el-tratamiento-del-agua/.../978-84-7993-202-2
11. CHUDOBA, J., MENÉNDEZ, C. PÉREZ, J. (1986). Fundamentos teóricos de algunos procesos para la purificación de aguas residuales. La Habana, Editorial ISJAE.
12. ALOMÁ, I, (2011). Tecnología sostenible para la obtención de un biosorbente de metales pesados a partir del bagazo de caña de azúcar. Tesis Doctoral. Tutor: Iván Leandro Rodríguez Rico. Facultad de Química Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba.
13. SALAZAR, E (2012). "Remoción de hidrocarburos mediante biopolímeros naturales: efecto del tamaño de partícula". Tesis para optar por el grado de Master en Ciencias Ambientales Degree Awarded by Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México. Codirectores: Dr. Paola Elizabeth Díaz Flores, Prof. Dr. Michael Sturm. Asesor: Dr. Elsa Cervantes González. Facultades de Ciencias Químicas, Ingeniería y

-
- Medicina. Programas multidisciplinarios de posgrado en Ciencias Ambientales and Cologne University of Applied Sciences Institute for Technology and Resources Management in the Tropics and Subtropics.
14. ASTM International. (2012). ASTM F 726-99 Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents. Recuperado el 4 de Mayo de 2012, de <http://ebook-browse.com/astm-f726-2006-pdf-d220768065>.
 15. DANGLAD, JA (2010). "Uso de partículas hidrofobadas de bagazo de caña en el tratamiento de aguas aceitosas". Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito para optar al título de Ingeniero Químico. Asesor académico: Ing. Químico. Dra. Shirley Marfisi. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui. Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Barcelona. España.
 16. ELIZALDE-GONZÁLEZ, M; HERNÁNDEZ-MONTOYA (2008). "Fruit seeds as adsorbents and precursors of carbon for the removal of anthraquinone dyes". International Journal of Chemical Engineering (IJCE). 1 (2-3). 2008. Serials publications. ISSN: 0954-5793
 17. ELIZALDE-GONZÁLEZ, M; HERNÁNDEZ-MONTOYA (2009). "Guava seed as an adsorbent and as a precursor of carbon for the adsorption of acid dyes". Biore-source Technology. Volume 100, issue 7, April 2009. ISSN: 0960-8524.
 18. BELISÁRIO, M ET, AL. (2009). "Estudio comparativo de la eficiencia de adsorción del bagazo de caña de azúcar, carbón activado y esponja vegetal en la remoción del Paracetamol en el suministro de agua". XVII Congreso chileno de Ingeniería Química Viña del Mar, Valparaíso, Chile del 25 al 28 de Octubre de 2009, en el Hotel Gala de Viña del Mar (Valparaíso, Chile). http://www.eiq.cl/cchiq2009/pags/t_oral.html
 19. Adsorbentes industriales 3M (doc en pdf) referencia del sitio. <http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?6666660Zjcf6IVs6EVs66SylGCOrrrrQ->. Consultado en Julio 2013.