

USO DE UNA ARCILLA ORGÁNICA COMO MATERIAL DE EMPAQUE DE UN FILTRO PARA DEPURAR AIRE CONTAMINADO CON TOLUENO

Ma. del Socorro López Cortez, Guillermo Osorio Revilla, Tzayhrí Gallardo Velázquez
y Sofía Arellano Cárdenas

RESUMEN

La capacidad de las arcillas orgánicas de adsorber compuestos orgánicos volátiles (VOCs) es debida al carácter hidrofóbico generado cuando la arcilla natural es modificada con moléculas orgánicas. En el presente trabajo se empleó una arcilla natural mexicana a la cual se le intercaló cloruro de cetil piridina (CPC) obteniendo la organoarcilla OC-CPC, la cual se caracterizó por análisis infrarrojo, termogravimétrico y difracción de rayos X. La OC-CPC obtenida se empleó para adsorber tolueno y posteriormente se trató a 120, 150 y 200°C

durante tres intervalos de tiempo (4, 8 y 12h) para lograr su regeneración. Las condiciones mínimas de regeneración obtenidas fueron 120°C durante 4h con un 90% de recuperación de su capacidad de adsorción. Se empleó la OC-CPC como material de empaque de un filtro para depurar ambientes contaminados con tolueno y se logró disminuir la concentración de tolueno a la salida del filtro a concentraciones menores del límite máximo permisible (LMP) de 50mg·t⁻¹.

Introducción

Los compuestos orgánicos volátiles (VOCs, por sus siglas en inglés) son un grupo importante de contaminantes del medio ambiente y de lugares cerrados como ambientes laborales, tal es el caso en la industria química, donde las concentraciones en el aire son elevadas y, más aún, donde se fabrican a gran escala disolventes como el tolueno, benceno, xileno, etc., que son compuestos tóxicos y cuya presencia en el ambiente afecta la salud del ser humano (Alley, 2000). A finales del siglo XX se produjeron en el mundo millones de toneladas de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) que producen contaminación en el ambiente y causan graves daños biológicos al humano. La creciente produc-

ción de los principales hidrocarburos aromáticos en México, a pesar de la recesión económica nacional y mundial, pone de manifiesto la importancia industrial de los disolventes orgánicos.

El tolueno es el principal hidrocarburo aromático en México desde el punto de vista de su producción industrial y no menos importante por su carácter toxicológico, ya que afecta la salud a nivel del sistema nervioso central. Su absorción se realiza principalmente a través de la vía respiratoria. La Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH) considera al tolueno como un agente químico que representa un riesgo tanto por ser tóxico al ser inhalado como por su capacidad de absorción por vía cutánea (Mercado, 2004).

En un estudio realizado en fábricas de zapatos de la Ciudad de León, Guanajuato, México (Tovar y Valdivia, 1999) se reportaron concentraciones de 215, 637 y hasta 2037ppm de tolueno en el interior de la fábrica. Caro Hidalgo *et al.* (2009) exponen la evaluación de riesgos originados por COVs en ambientes laborales (pintores de edificios, barnizadores de muebles, pintores de coches, trabajadores de estaciones de servicio y gasolineras), donde se reportan concentraciones superiores a las 3000ppm de tolueno, presentes en el ambiente donde los trabajadores laboran durante 8h de jornada. Esto da evidencia del peligro al que están expuestos en general los trabajadores de ambientes laborales cerrados que se someten a jornadas de 8 a 12h diarias, ya

que la norma oficial (NOM-010-STPS-1999), establece la concentración máxima permisible (CMP) de tolueno en el ambiente que debe ser <50ppm.

Es por tanto de interés buscar alternativas para reducir los riesgos de intoxicación y contacto con tolueno, sobre todo en ambientes laborales donde se produce o usa este tipo de compuestos y donde el personal está expuesto durante su jornada laboral (NOM-047-SSA1-1993).

Entre las medidas adoptadas para controlar la emisión de VOCs en ambientes laborales se encuentran los sistemas de extracción de aire, áreas bien ventiladas y mascarillas especiales, así como lechos de adsorbentes como el carbón activado y las zeolitas para controlar y disminuir las concen-

PALABRAS CLAVE / Adsorción / COVs / Filtros / OC-CPC / Organoarcilla / Tolueno /

Recibido: 30/09/2011. Modificado: 26/07/2012. Aceptado: 27/07/2012.

Ma. del Socorro López Cortez. Ingeniera Bioquímica, M.C. en Biofísica y Dr. en Ciencias Químico Biológicas, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas (ENCB) – Instituto Politécnico Nacional (IPN), México. Profesora-Investigadora, ENCB-IPN, México. Direc-

ción: Departamento de Biofísica, ENCB-IPN. Prol. de Carpio y Plan de Ayala, Col. Casco de Sto. Tomás, C.P. 11340, México D.F. e-mail: socolc@prodigy.net.mx

Guillermo Osorio Revilla. Ingeniero Bioquímico, ENCB-IPN, México. M.Sc. en Ingeniería

de Procesamiento de Alimentos y Ph.D. en Ingeniería de Alimentos, University of Reading, RU. Profesor-Investigador, ENCB-IPN, México.

Tzayhrí Gallardo Velázquez. Ingeniera Bioquímica, ENCB-IPN, México. M.Sc. en Química Analítica y PhD. Química y

Química Aplicada, University of Salford, RU. Profesora-Investigadora, ENCB-IPN, México.

Sofía Arellano Cárdenas. Ingeniera Bioquímica, M.C. en Biofísica y Dr. en Ciencias Químico Biológicas, ENCB-IPN, México. Profesora-Investigadora ENCB-IPN, México.

USE OF AN ORGANIC CLAY AS PACKING MATERIAL FOR A TOLUENE-CONTAMINATED AIR FILTER

Ma. del Socorro López Cortez, Guillermo Osorio Revilla, Tzayhrí Gallardo Velázquez and Sofia Arellano Cárdenas

SUMMARY

The adsorption capacity of organoclays for organic compounds (VOCs) is due to the hydrophobic properties generated when the natural clay is modified with organic molecules. In the present work, an organoclay (OC-CPC) was prepared using a Mexican natural clay by intercalating a cetyl pyridine chloride (CPC). It was characterized by infrared, thermogravimetric, and X-ray diffraction analysis. The OC-CPC was used to adsorb toluene and then treated at 120, 150, and 200°C

during 4, 8, and 12h in order to regenerate its adsorption capacity. The minimum requirements for recovery obtained were 120°C during 4h, with a 90% recovery of its adsorption capacity. The OC-CPC was used as packing material of a filter to purify contaminated environments with toluene. The results showed that organoclay can reduce toluene content at concentrations below the permissible limit (MPL) of 50mg·l⁻¹.

USO DE UMA ARGILA ORGÂNICA COMO MATERIAL DA CARÇA DE UM FILTRO PARA DEPURAR AR CONTAMINADO COM TOLUENO

Ma. del Socorro López Cortez, Guillermo Osorio Revilla, Tzayhrí Gallardo Velázquez e Sofia Arellano Cárdenas

RESUMO

A capacidade das argilas orgânicas de absorver compostos orgânicos voláteis (VOCs) é devida ao caráter hidrofóbico gerado quando a argila natural é modificada com moléculas orgânicas. No presente trabalho foi empregada uma argila natural mexicana à qual foi acrescentado cloreto de cetil piridina (CPC) obtendo a organoargila OC-CPC, a qual se caracterizou por análise termogravimétrica, infravermelho e difração de raios X. A OC-CPC obtida se empregou como adsorvente de tolueno e posteriormente se tratou a 120, 150 e 200°C du-

rante três intervalos de tempo (4, 8 e 12h) para conseguir sua regeneração. As condições mínimas de regeneração obtidas foram 120°C durante 4h com um 90% de recuperação de sua capacidade de adsorção. Empregou-se a OC-CPC como material de empaque de um filtro para depurar ambientes contaminados com tolueno e se conseguiu diminuir a concentração de tolueno na saída do filtro em concentrações menores do limite máximo permissível (LMP) de 50mg·l⁻¹.

traciones de los VOCs entre otros (Glynn y Heinke, 1999). El carbón activado es un adsorbente universal que ha sido empleado para adsorber diferentes tipos de compuestos, pero debido a que puede también adsorber la humedad del ambiente, éste se satura cuando la humedad relativa es alta y ya no puede adsorber mayor cantidad de algún otro compuesto (Tovar y Valdivia, 1999; NOM-050-STPS-1993).

En los últimos años se han desarrollado nuevos tipos de adsorbentes a través del uso de arcillas naturales con propiedades específicas para un tipo de compuestos y, que representan una alternativa a los adsorbentes ya existentes (Nemecz 1981, Tichit 1988, Keeran *et al.*, 1990, Yun-Hwei 2001, Koh *et al.*, 2005).

Las arcillas son hidrosilicatos con estructuras laminares con átomos ordenados en grupos de planos paralelos y unidos entre sí en forma de láminas, las cuales han sido modifi-

cadas por intercambio iónico, intercalando polímeros inorgánicos (arcillas pilareadas; Arellano *et al.*, 2002) o introduciendo un material tensoactivo dentro del espacio interlaminar (organoarcillas; Sirinvasan y Fogler, 1990). También se han preparado inorgano-organo arcillas a las que se les ha intercalado tanto moléculas orgánicas como inorgánicas (Sirinvasan y Fogler, 1990). De esta forma se han obtenido arcillas modificadas con diferentes propiedades de superficie, que pueden ser empleadas para adsorber diferentes tipos de compuestos dependiendo de su afinidad química.

Las organoarcillas, dado su carácter hidrofóbico, han sido utilizadas para la adsorción de compuestos orgánicos tóxicos presentes en medio acuoso (Ko, *et al.*, 2007, Yıldız y Gür, 2007; Arellano *et al.*, 2008, Masooleh *et al.*, 2008, Senturk *et al.*, 2009), mientras que se han reportado pocos trabajos acerca de la adsorción de compuestos

en aire o fase vapor, entre los que destacan: adsorción de hidrocarburos de gasolina (BTEXs) en arcillas minerales (Yucong y Gian, 1994), adsorción de vapor de benceno por organobentonitas en ambiente de aire (Lizhong y Yuhong, 2002), adsorción de compuestos orgánicos volátiles en arcillas naturales (Hernández *et al.*, 2003), y adsorción de moléculas como benceno y tolueno en fase vapor (López *et al.*, 2008).

Debido a la importancia económica del uso de adsorbentes, se debe considerar la regeneración de su capacidad de adsorción cuando éstos se emplean para separar VOC's (McNair y Bonilla, 1969). Por ejemplo, el carbón activado se puede reactivar en un horno a temperatura de 900°C (Roque-rol *et al.*, 1999), mientras que la zeolita 13X se reactiva a 250°C (Alley, 1999). Sin embargo, la regeneración de organoarcillas que han sido empleadas en la adsorción de VOCs no ha sido reportada.

En el presente trabajo se preparó y caracterizó un lote de organoarcilla (OC) empleando cloruro de cetil piridina (CPC) para su modificación, obteniendo de esta forma la OC-CPC que se empleó en los experimentos de adsorción. Tomando en cuenta la afinidad de la OC-CPC por el tolueno, el objetivo fue establecer las condiciones para regenerar la capacidad de adsorción de la OC-CPC preparada, la cual fue empleada previamente en la adsorción de tolueno, así como utilizar ésta organoarcilla como material de empaque de un filtro depurador de ambientes contaminados con tolueno.

Métodos

Preparación y caracterización de la OC-CPC

La arcilla natural empleada fue la bentonita Perfobent obtenida en la compañía Arcillas

Industriales de Durango S.A la cual no fue purificada. Únicamente fue molida y tamizada con malla N° 65 obteniendo un tamaño promedio de partícula de 0,210mm. Se preparó un lote de organoarcilla (OC-CPC) siguiendo el método reportado por Srinivasan y Fogler (1990). La arcilla natural se suspendió en agua desionizada y se adicionó el agente tensoactivo catiónico, cloruro de cetil piridina (CPC), en una cantidad equivalente al 100% de su capacidad de intercambio catiónico (CIC= 74meq·g⁻¹). Se agitó durante 15h y después se filtró y lavó hasta reacción negativa de cloruros. Posteriormente se eliminó la mayor parte de agua y se secó en estufa de vacío a 60°C durante 6h. Se realizó una ligera molienda de la OC-CPC, en un mortero con pistilo y se tamizó con malla 65.

La caracterización de la OC-CPC obtenida en el presente trabajo se llevó a cabo para evidenciar la presencia del compuesto intercalado en arcilla natural, lo cual se realizó con el análisis por espectroscopia infrarroja y por termogravimetría diferencial de barrido, mientras que por difracción de rayos X se obtuvo la distancia interlamilar.

Se empleó un espectrofotómetro FTIR Perkin Elmer 1600, cuatro barridos por el método de pastillas de KBr (Farmer, 1975). El análisis termogravimétrico se realizó con un termoanalizador AT modelo 1090, velocidad de carta 10°C/min, intervalo de temperatura de 25-900°C y de acuerdo a Malla y Komarneni (1990) se determinó el porcentaje de pérdida de peso en tres intervalos de temperatura (30-230, 230-530, 530-900°C). La difracción de rayos X se efectuó con un difractómetro Siemens D-500, filtro de Ni, radiación de Cu K α λ = 1,5406Å operando a 30kv y 20mA, con un ángulo de barrido del ángulo 2 θ de 2 a 64°. La distancia basal d(001) se calculó e identificó para las muestras mediante el software del difractómetro. Se evaluó la distancia interlamilar em-

pleando la ecuación de Bragg (Brindley, 1980).

Obtención de las isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción de tolueno en OC-CPC se obtuvieron empleando el método de la cámara estática (López, 2005). Se preparó una serie de frascos viales de vidrio de 20ml con soluciones de aceite mineral-tolueno en diferentes concentraciones en cuya tapa se colocó una charola de aluminio suspendida que contiene el adsorbente (100mg de OC-CPC ó zeolita 13X) expuesto a la atmósfera de tolueno. Se empleó una balanza analítica Mettler con sensibilidad de 1×10⁻⁴g. Se colocaron en estufa de temperatura controlada a 23°C para que alcanzaran el equilibrio. El contenido de tolueno en la atmósfera se cuantificó empleando un cromatógrafo de gases marca Perkin Elmer modelo sigma 3B, columna empacada Carabowax 20M, gas de acarreo nitrógeno, detector FID. Transcurrido el tiempo al equilibrio, se pesaron las charolas de aluminio para determinar la ganancia de peso por el método gravimétrico. El experimento se realizó por triplicado.

Regeneración de la OC-CPC

La OC-CPC de las charolas empleada en la adsorción de tolueno se recolectó en una cápsula de porcelana y se sometió a un proceso de regeneración térmica empleando una mufla Thermolyne 1400 Furnace a las temperaturas de 120, 150 y 200°C durante 15h. Terminado el periodo de regeneración térmica, se obtuvieron nuevamente las isotermas de adsorción de tolueno para cuantificar la adsorción de OC-CPC regenerada a las tres temperaturas. Se eligió la temperatura de 120°C como míni-

ma para la regeneración, ya que el punto de ebullición del tolueno es de 110,8°C. La temperatura de regeneración máxima propuesta fue de 200°C, ya que según el resultado de termogravimetría (TG) a temperaturas mayores se observa la pérdida del CPC intercalado en la arcilla. De estos experimentos y como se reporta en la sección de resultados, se obtuvo una temperatura mínima de regeneración de 120°C. A esta temperatura se realizó un tratamiento térmico a la OC-CPC utilizada en la adsorción, pero empleando diferen-

comercial fue del tipo 13X PG (Molsiv Adsorbents) sometida a calentamiento a 250°C durante 24h. Posteriormente se enfrió en un desecador para asegurar la ausencia de humedad y se empacó el depurador.

Método para depurar el ambiente de la cámara

El filtro se conectó a una cámara de prueba como se muestra en la Figura 1. Se colocó dentro de la cámara una charola con tolueno de concentración conocida para formar la atmósfera contaminada (se emplearon 2000mg·l⁻¹ en función de los valores reportados como presentes en ambientes laborales). Se cerró herméticamente la cámara y se esperó hasta que el ambiente fuera homogéneo, para lo cual se introdujo dentro de la cámara un magneto agitador al cual se le añaden

dos pequeñas aspas. La cámara se colocó sobre una parrilla con agitación magnética. Se cuantificó la concentración inicial de tolueno, tomando una muestra del interior de la cámara con jeringa para gases Hamilton y se inyectó al cromatógrafo. Se llevó a cabo la calibración del rotámetro para medir flujo. Con ayuda de una bomba se hizo circular aire contaminado con tolueno a través del depurador empacado, a un flujo constante de 200ml/min. Se registró la concentración de entrada y salida de tolueno del depurador a los 0, 1, 15, 30, 80, 120, 150, 180, 240 y 300min. Se realizó el mismo procedimiento seis veces empleando tanto la OC-CPC, como la zeolita como empaque del depurador. Los resultados obtenidos con cada adsorbente se promediaron y se realizó un análisis comparativo.

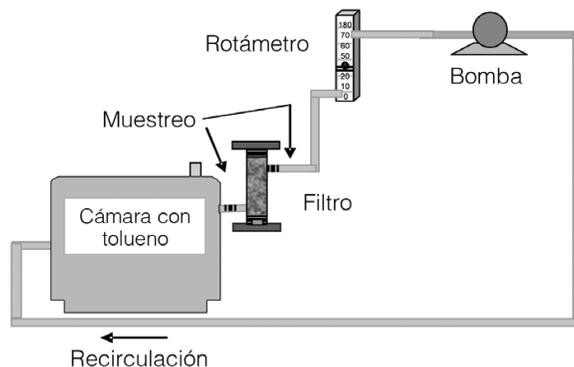


Figura 1. Sistema de prueba del filtro para depurar aire contaminado con tolueno.

tes intervalos de tiempo para obtener el tiempo mínimo de regeneración. Los tiempos empleados fueron 4, 8 y 12h. Se realizaron nuevamente las isotermas de adsorción de tolueno en la OC-CPC regenerada en los tres tiempos mencionados.

Diseño del filtro de lecho empacado con OC-CPC

Se diseñó un depurador de lecho empacado, el cual consiste en una columna de 5cm de diámetro y 20cm de altura, que se empacó con la OC-CPC con un tamaño de partícula de malla 5-8 (4,18-2,36mm), la cual es similar a la utilizada en desecadores (Hammond Drierite) empacados con sulfato de calcio para reducir la caída de presión. Con fines comparativos, se empleó una zeolita comercial como empaque del depurador con la misma granulometría. La zeolita

TABLA I
PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE PESO DE
LA ARCILLA NATURAL (NC) Y DE LA ARCILLA
ORGÁNICA (OC-CPC)

Muestra	Etapa I 30-230°C	Etapa II 230-530°C	Etapa III 530-900°C
NC	8,24	0,9	3,12
OC-CPC	1,99	21,36	2,13

Resultados y Discusión

Caracterización de la OC-CPC

El espectro infrarrojo obtenido para la OC-CPC, presenta las mismas bandas que el de la arcilla natural (NC, por sus siglas en inglés) además de otras en 2930, 2848 y a 1484 cm^{-1} correspondientes a vibraciones de estiramiento asimétrico, simétrico y doblamiento asimétrico respectivamente, de los grupos CH_2 de la cadena hidrocarbonada de cetil piridina incorporado en el espacio interlaminar de la arcilla original (Clifford *et al.*, 1998). Estas bandas no aparecen en el espectro IR de la arcilla natural, por lo que se comprueba la presencia del CPC en la arcilla modificada.

Con el análisis de difracción de rayos X se obtuvo una distancia interlaminar de 11,9Å para la OC-CPC, mientras que para la arcilla natural fue de 2,9Å. El aumento observado se debió a la intercalación del CPC en la arcilla natural, dato que concuerda con los valores reportados por López *et al.* (2008).

En el análisis termogravimétrico se obtuvo el porcentaje de pérdida de peso en función de la temperatura para la arcilla natural y para la OC-CPC, en tres intervalos de temperatura, como se muestra en la Tabla I y Figura 2. En el intervalo 30-230°C (etapa I), la pérdida de peso corresponde a la eliminación de agua adsorbida entre las láminas de silicato. Entre 230 y 530°C (etapa II) la pequeña pérdida de peso se relaciona con la remoción de los grupos hidroxilo asociados en la orilla de las láminas de la estructura arcillosa, mientras que en el intervalo de

530-900°C (etapa III), la pérdida de peso corresponde a la deshidroxilación total de la estructura arcillosa (Dodd y Kenneth, 1987). Para el caso de la OC-CPC, la pérdida de peso en la etapa I corresponde también a la eliminación de agua adsorbida en la estructura de la OC-CPC, pero debido a que ésta desarrolló un carácter organofílico, la pérdida de peso en esta etapa es mucho menor que la obtenida en la arcilla natural, ya que en esta última están presentes los cationes interlaminares que le confieren a la arcilla natural su carácter hidrofílico. La gran diferencia en la pérdida de peso en la etapa II entre la arcilla natural y la OC-CPC es debida a la cantidad de CPC intercalado en la OC-CPC, lo que es una evidencia que demuestra que la OC-CPC obtenida es estable a temperaturas <200°C.

Isotermas de adsorción de zeolita y OC-CPC

En la Figura 3 se muestran las isotermas obtenidas de la adsorción de tolueno en zeolita 13X y en OC-CPC, donde se observa

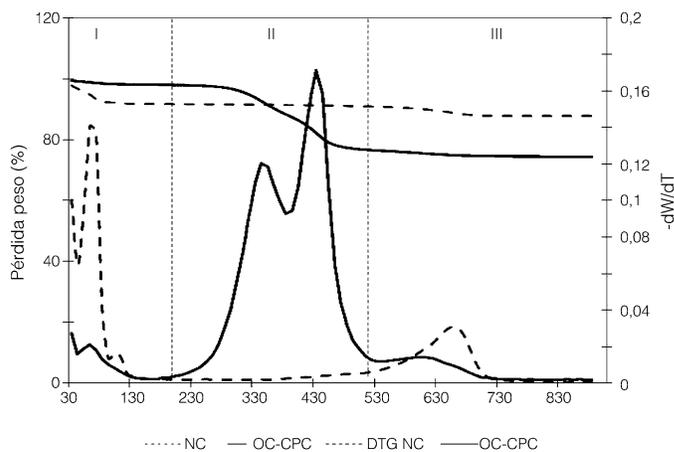


Figura 2. Termograma (TG) y termograma diferencial (DTG) de la arcilla natural (NC) y de la OC-CPC.

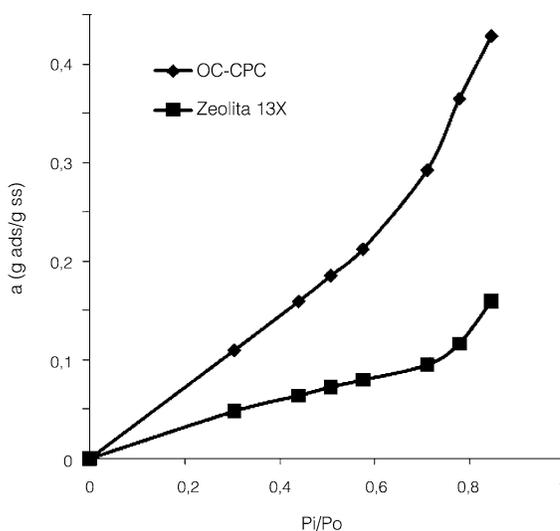


Figura 3. Isotermas de adsorción de tolueno en OC-CPC y Zeolita 13X. T= 23°C, P_i/P_o : presión relativa, a: adsorción expresada en g tolueno / g de sólidos secos.

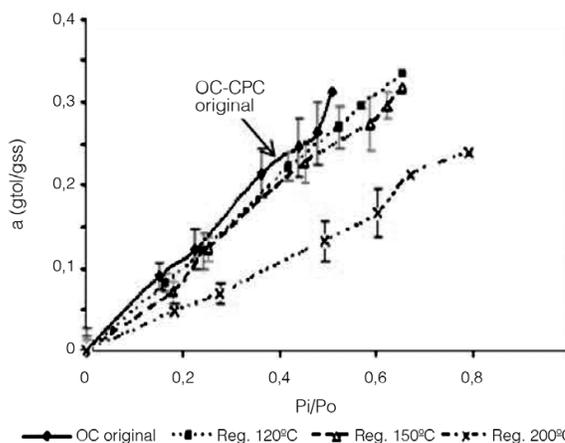


Figura 4. Isotermas de adsorción de la OC-CPC original y de las muestras de OC-CPC regeneradas a 120, 150 y 200°C, en un tiempo constante de 15h. Isotermas obtenidas a T= 23°C P_i/P_o : presión relativa, a: adsorción expresada en g tolueno / g de sólidos secos.

que la OC-CPC adsorbe en mayor proporción al tolueno. Evaluando la relación adsorción de OC-CPC/zeolita 13X, se obtienen valores >2, es decir la muestra de OC-CPC adsorbe más del doble al tolueno que la zeolita 13X. Por ejemplo, a una presión relativa de 0,5 la zeolita presenta una adsorción de 0,072g de tolueno/g de adsorbente, mientras que la OC-CPC adsorbe 0,185g de tolueno/g de adsorbente. Esto se puede explicar debido al carácter fuertemente organofílico que posee la OC-CPC (López *et al.*, 2008), por lo que presentó una gran afinidad por las moléculas de tolueno.

Efecto de la temperatura de regeneración en la capacidad de adsorción de la OC-CPC

Las isotermas de adsorción (obtenidas a 23°C) de la OC-CPC original y de las muestras de OC-CPC regeneradas a 120, 150 y 200°C durante un tiempo constante de 15h, se presentan en la

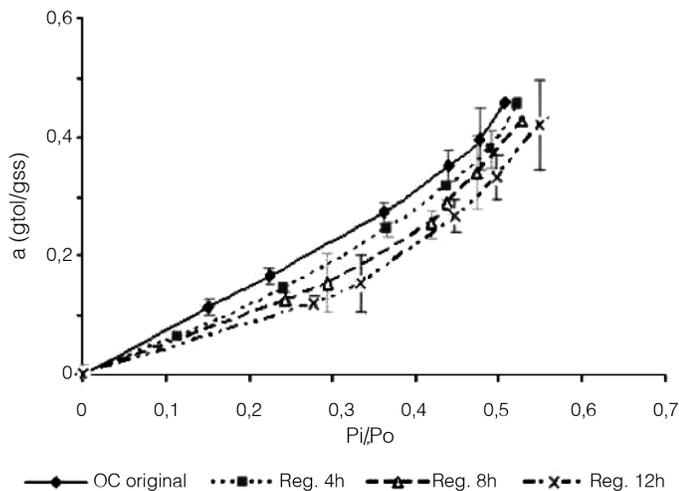


Figura 5. Isotermas de adsorción de la OC-CPC original y de las muestras de OC-CPC regeneradas a 120°C y tiempos de 4, 8 y 12 hrs. Temperatura de las isotermas: 23°C. P_i/P_o : presión relativa, a : adsorción expresada en g tolueno/g de sólidos secos.

Figura 4. La capacidad de regeneración de la OC-CPC a 120 y 150°C fue muy similar, sin embargo, a 200°C la adsorción de tolueno disminuyó en gran medida. Esto se explica debido a que, como se mostró en el análisis termogravimétrico, a partir de 200°C, el CPC intercalado se pierde y es el que le confiere propiedades organofílicas a la arcilla, y por lo tanto disminuye la adsorción del tolueno. Debido a estos resultados, para establecer las condiciones de regeneración mínimas, se eligió la temperatura de 120°C para regenerar la OC-CPC en los experimentos subsiguientes.

Efecto del tiempo en la regeneración de la capacidad de adsorción de la OC-CPC

En la Figura 5, se muestran las isotermas de adsorción de tolueno de la OC-CPC original y de la OC-CPC regenerada a 120°C durante 4, 8 y 12 h. En la gráfica se observa que la capacidad de adsorción de la OC-CPC regenerada disminuye a medida que se incrementa el tiempo de regeneración, lo cual puede deberse a que al aumentar el tiempo de tratamiento, es posible que parte del CPC se pierda y, este compuesto es el que le confiere a la arcilla la afinidad por el tolueno. Esta pér-

dida de peso se observa en la Figura 6, donde se presenta una ampliación del termograma de la OC-CPC (Figura 2) en la zona de temperaturas de 100 a 200°C y se observa que dicha pérdida de peso, aunque es muy pequeña, probablemente se deba no solamente a pérdida de la pequeña cantidad de moléculas de agua adsorbidas en la OC-CPC (como se mencionó anteriormente) sino también, a parte del CPC que no se intercaló en la estructura laminar de la arcilla y quedó en la superficie (Jarraya *et al.*, 2010) y se pierde en esta zona de temperatura, conforme aumenta el tiempo de tratamiento térmico.

Con estos resultados se concluye que las condiciones mínimas de regeneración de la OC-CPC empleada en la adsorción de tolueno son de 120°C durante 4h. Comparan-

TABLA II
CONCENTRACIÓN DE TOLUENO EN LA CÁMARA AL INICIO Y AL FINAL DE LA EXPERIENCIA

Adsorbente	Concentración (ppm) inicial (t_0 min)	Concentración (ppm) final (t_{300} min)
Zeolita	1981,7	262
OC-CPC	1990,5	218

do las isotermas de la OC-CPC original y de la arcilla regenerada a 120°C durante 4h se observa que se logró regenerar la capacidad de adsorción de la arcilla en un 90%. Esto se debe a que a 120°C se elimina todo el tolueno presente en la OC-CPC que fue adsorbido, lo que representa una ventaja si se compara con el proceso tér-

litas hidrofóbicas tienen que ser sintetizadas por un proceso complicado ya que no se encuentran en la naturaleza (EPA, 1999) mientras que la OC-CPC se prepara por un proceso sencillo, como se mencionó en la metodología del presente trabajo, y México cuenta con abundantes yacimientos para obtener la arcilla en su forma natural.

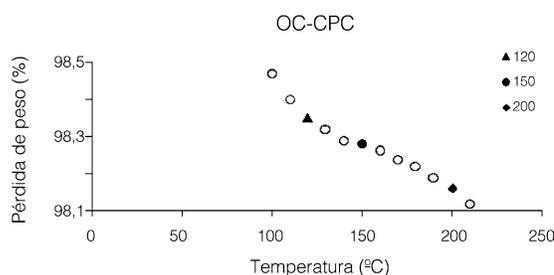


Figura 6. Pérdida de peso en función de la temperatura de la OC-CPC (datos tomados del termograma de la OC-CPC, Figura 2).

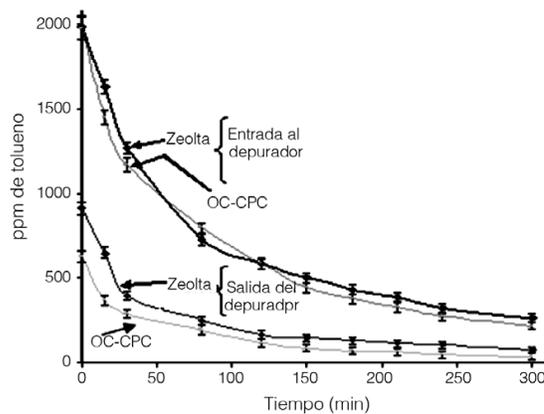


Figura 7. Gráfica del monitoreo de la concentración de tolueno en la entrada y en la salida del depurador para cada adsorbente: zeolita 13X y OC-CPC, en función del tiempo, con barras de desviación estándar para cada punto.

mico para regenerar la zeolita 13X (250°C) y el del carbón activado, que requiere temperaturas muy elevadas (900°C) para lograrlo, o incluso tratamientos químicos (Rouquerol, 1999). Por otro lado, las zeo-

Experimentos con el depurador de aire empacado con la OC-CPC

En la Figura 7 se presenta la variación de la concentración de tolueno ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) cuantificada en la cámara de prueba (entrada al depurador) en función del tiempo, con un flujo de 200ml/min, cuando se emplearon OC-CPC o zeolita 13X. Los resultados de concentración inicial y final en la cámara se muestran en la Tabla II. En esta figura se observa que conforme transcurre el tiempo de flujo cuando se usó el depurador con OC-CPC, la concentración de tolueno en la cámara disminuye desde un valor inicial de $1990,5\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ hasta valores de $218\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (89%), mientras que cuando se usó el filtro de zeolita 13X la concentración de tolueno disminuyó de $1981,7\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ a valores de $262\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (87%). Estos resultados se resumen en la

Tabla II.

La Figura 7 también muestra la concentración de tolueno cuantificado a la salida del filtro cuando este funcionó durante 5h a un flujo de 200ml/min. Los resultados

TABLA III
CONCENTRACIÓN DE TOLUENO A LA ENTRADA Y SALIDA DEL FILTRO

Adsorbente	ppm de tolueno a la entrada del depurador (t_0 min)	ppm de tolueno a la salida del depurador (t_0 min)	ppm de tolueno a la salida del depurador (t_{300} min)
Zeolita 13 X	1981,7	950	76,6
OC-CPC	1990,5	629	37,5

finales (inicial y después de 5h) se presentan en la Tabla III. La concentración evaluada a la salida del depurador del filtro con OC-CPC fue de 37,5mg·l⁻¹ mientras que con el de zeolita 13X fue de 76,6mg·l⁻¹. Esta diferencia se puede explicar por la gran afinidad de la OC-CPC por el tolueno que se observó en las isotermas mostradas en la Figura 3. Estos experimentos se realizaron con aire del ambiente de la cámara de prueba, el cual posee la humedad relativa del ambiente (30-40%). La zeolita 13X, a pesar de tener una gran superficie específica, presenta también afinidad por el agua y se ha reportado que retiene hasta un 30% de humedad (Huiying, 2010), por lo que adsorbe tanto agua como moléculas orgánicas presentes en el ambiente (EPA, 1999). Esta adsorción de humedad puede impedir una mayor adsorción del tolueno (Chih-yu y Shian-chee, 1998). La OC-CPC tiene un fuerte carácter organofílico (Lizhong y Yuhong, 2002, Jarraya *et al.*, 2010) por lo que presenta gran afinidad al tolueno y es mínima la interferencia de la humedad relativa del ambiente presente en la cámara de prueba. Además el tolueno solo se desorberá a la temperatura de regeneración ya mencionada.

Dado que las curvas de los dos adsorbentes son similares, se realizó un análisis estadístico: estudio de paralelismo y comparación de los parámetros de regresión, empleando la t de Student con un 95% de confianza (Daniel, 1980). Se encontró que no hay diferencia significativa entre ambos adsorbentes, por lo que, a pesar de que la OC-CPC tiene una mayor capacidad de adsorción que

la Zeolita 13X, disminuyen de manera semejante la cantidad de tolueno en la cámara durante el tiempo de funcionamiento del filtro y antes de llegar a saturarse (Figura 7). Sin embargo, se requiere realizar estudios para determinar el tiempo en que se satura cada adsorbente del filtro para poder establecer diferencias entre ambos. Este experimento se realizó seis veces y en la gráfica se representa la desviación estándar de cada experimento.

Los resultados obtenidos demuestran que se logró disminuir la concentración de tolueno a límites máximos permisibles <50ppm (NOM-010-STPS-1999), al hacerlo circular a través del depurador de OC-CPC para su liberación segura al medio ambiente.

El filtro desarrollado en el presente trabajo utilizando OC-CPC es una propuesta para depurar ambientes cerrados. Se requiere realizar estudios para un posible escalamiento, ya que los experimentos realizados fueron a nivel laboratorio para probar su efectividad, siendo el volumen de la cámara de prueba de 23400cm³. A nivel comercial existen filtros depuradores de ambientes de diferentes dimensiones, por ejemplo un purificador de aire para gases o vapores que emplea filtros de carbón activado o zeolita, tiene una altura de 66,5cm y 25cm de ancho y se reporta que se puede emplear en áreas de 25m² (Bionaire, 2011).

Los resultados confirman el hecho de que la OC-CPC retiene al tolueno y representa una alternativa a los depuradores de carbón activado ya existentes con las siguientes ventajas: la humedad relativa presente no afecta su capacidad de adsorción (NOM-010-STPS-1999), lo que se atribuye

a su fuerte carácter hidrofóbico; la temperatura de regeneración fue mucho menor a la empleada para regenerar la zeolita 13X; el método de preparación de la OC-CPC es sencillo, comparado con la síntesis de una zeolita hidrofóbica, ya que ésta no existe como tal en la naturaleza. Todo esto representaría ventajas económicas con respecto a otros adsorbentes.

Conclusiones

La OC-CPC empleada en el presente estudio adsorbió más del doble de la concentración del tolueno que la zeolita 13X en un sistema por lotes. La regeneración de la capacidad de adsorción de la OC-CPC se logró a una temperatura mínima de 120°C y durante un tiempo de 4h. Bajo estas condiciones, la estructura de la arcilla modificada con CPC se mantiene estable, lo cual se demostró por el análisis termogravimétrico de la muestra.

En las condiciones establecidas en el sistema de prueba de este estudio, el depurador empacado con la OC-CPC logró disminuir la concentración de tolueno a un valor inferior al límite máximo permisible dentro de la cámara cuando el aire fluye a través del depurador. No hubo diferencias significativas en la remoción de tolueno al usar el depurador empacado con zeolita o con OC-CPC, por lo que podrían utilizarse de manera indistinta.

La arcilla orgánica preparada en el presente trabajo representa una alternativa promisoría como material de empaque en depuradores de lecho fijo para el control de compuestos orgánicos volátiles en ambientes laborales, con la ventaja que su capacidad de adsorción se puede regenerar a tempera-

turas mucho menores a las que se emplean en la reactivación de la zeolita y del carbón activado, además de ser selectiva a compuestos orgánicos volátiles, lo que podría disminuir costos en su preparación y regeneración.

REFERENCIAS

- Alley ER and Associates, Inc. (2000) *Manual de Control de la Calidad del Aire*. Tomo II. McGraw-Hill. México. pp. 21.1-21.9.
- Arellano S, Gallardo T, López S, Osorio G (2002) aplicación de los modelos de Gouy Chapman y Stern al intercambio iónico dependiente de pH de arcillas pilareadas de aluminio. *Rev. Soc. Quím. Méx.* 46: 120-124.
- Arellano CS, Gallardo VT, López CS, Osorio RG (2008) Preparation of porous clay heterostructure (PCH) and study of its adsorption capacity of phenol and chlorinated phenol from aqueous solutions. *Water Env. Res.* 80: 60-67.
- Bionaire (2011) Purificadores de Aire. www.purificadoresdeaire.com.mx
- Brindley GW, Chin Chun Kao (1980) Formation, compositions, and properties of hydroxy-Al- and hydroxy-Mg-montmorillonite. *Clays and Clay Min.* 28: 435-443.
- Caro Hidalgo J, Gallego Fernández M, Monero Simo R (2009) Diferentes metodologías para la evaluación de riesgos originados por compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en ambientes laborales. *Seguridad y Medio Ambiente* N°113. pp 20-36.
- Chih-yu Ch, Shian-chee W (1998) The influence of relative humidity on the adsorption of toluene by soils. Interpretation with the adsorption energy distribution functions. *Chemosphere* 37: 1437-1444.
- Clifford J, Olaf A, Malcom M (1998) *Spectral Analysis of Organic Compounds*. Burgess. Minneapolis, MN, EEUU. pp. 81-90.
- Daniel WW (1980) *Bioestadística, Base para el Análisis de las Ciencias para la Salud*. Limusa. México. 193 pp.
- Dodd WJ, Kenneth HT (1987) *Thermal Methods*. Wiley. Nueva York, EEUU. pp. 110-123.
- EPA (1999) *Zeolita un Adsorbente Versátil de Contaminantes del Aire*. Boletín técnico EPA-456/F-99-003. Clean Air Technology Center. Triangle Park, NC, EEUU. pp. 1-6.

- Farmer, VC, (1975), *Infrared Spectroscopy*. Data Handbook, pp. 285-332.
- Glynn H, Heinke G (1999) *Environmental Science and Engineering*. 2^a ed. Prentice Hall. Nueva York, EEUU. 492 pp.
- Hernández MA, Velasco JA, Rojas F, Campos E, Lara VH, Torres JA, Salgado MA (2003) Adsorción de compuestos orgánicos volátiles en arcillas del estado de Puebla, México, *Contam. Ambient.* 19: 191.
- Huiying (2010) *Tamices Moleculares: Polvo 13X*. Industria Química Xiamen Co. Ltd. www.xmzeolite.com
- Jarraya I, Fourmentin S, Benzina M, Bouaziz S (2010) VOC adsorption on raw and modified clay materials. *Chem. Geol.* 275: 1-8.
- Keeran R, Srinivasan KR, Scott F (1990) Use of inorgano-organo-clays in the removal of priority pollutants from industrial wastewaters: structural aspects. *Clays Clay Min.* 38: 277-286.
- Ko CH, Fan C, Chiange PN, Wang MK, Lin KC (2007) p-nitrophenol, phenol and aniline sorption by organo-clays. *J. Hazmat.* 149: 275-282.
- Koh SM, Song MS, Takagi T (2005) Mineralogy, chemical characteristics and stabilities of Cetylpyridinium-exchanged smectite. *Clay Min.* 40: 213-222.
- Lizhong Z, Yuhong Z (2002) Benzene vapor sorption by organobentonites from ambient air, *Clays Clay Min.* 50: 421-427.
- López S (2005) *Estudio de la Adsorción de Compuestos Orgánicos Volátiles (Benceno y Tolueno) en Fase Vapor en Arcillas Modificadas*. Tesis. ENCB. Instituto Politécnico Nacional. México. 66 pp.
- López S, Osorio G, Gallardo T, Arellano S (2008) Adsorption of vapor-phase VOC's (benzene and toluene) on modified clays and its relation with surface properties, *Can. J. Chem.* 86: 305.
- Malla PB, Komarneni S (1990) Synthesis of highly microporous and hydrophilic alumina-pillared montmorillonite: Water-sorption properties, *Clay Clay Min.* 38: 363.
- Masooleh MS, Bazgir S, Tamizifar M, Nematí A (2010) Adsorption of petroleum hydrocarbons on organoclay. *J. Appl. Chem. Res.* 4: 19-23.
- McNair HM, Bonelli EJ (1969) *Basic Gas Chromatography*. Varian. Berkeley, CA, EEUU. pp. 123-167.
- Mercado F (2004) Nuevos datos sobre la toxicinética del tolueno para el monitoreo biológico de la exposición ocupacional. *Rev. Latinoam. Salud Trab.* 4: 52-55
- Nemecz E (1981) *Clay Minerals*. Akadémia Kiadó. Budapest, Hungría. 25 pp.
- NOM-010-STPS-1999. Norma Oficial Mexicana. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. México. www.stps.gob.mx.
- NOM-047-SSA1-1993. Norma Oficial Mexicana. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. México. www.stps.gob.mx.
- NOM-050-1993. Norma Oficial Mexicana. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. México. www.stps.gob.mx.
- Rouquerol F, Rouquerol J, Sing K (1999) *Adsorption by Powders and Porous Solids*. Academic Press. New York, EEUU. 191 pp.
- Senturk HB, Ozdes D, Gundogdu A, Duran C, Soyak M (2009) Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption onto organo modified Tirebolubentonite: equilibrium, kinetic and thermodynamic study. *J. Hazmat.* 172: 353-362.
- Srinivasan KR, Fogler HS (1990) Use of inorgano-organo-clays in the removal of priority pollutants from industrial wastewaters: adsorption of benzo (a) pyrene and chlorophenols from aqueous solutions. *Clays Clay Min.* 38: 287.
- Tichit D, Fajula F, Figueras F (1988) Sintering of montmorillonites pillared by hydroxy-aluminum species. *Clays Clay Min.* 36: 369-375.
- Tovar LR, Valdivia MA (1999) Tolueno en ambiente intramuros. Sociedad mexicana de Medicina del trabajo, A.C., *Salud Trab.* 4: 21-28.
- Yildiz A, Gür A (2007) Adsorption of phenol and chlorophenols on pure and modified sepiolite, *J. Serb. Chem. Soc.* 72: 467-474.
- Yuncong L, Gian G (1994) Adsorption of hydrocarbons by clay minerals from gasoline. *J. Hazmat.* 38: 105-112.
- Yun-Hwei Sh (2001) Preparations of organobentonite using nonionic surfactants. *Chemosphere* 44: 989-995.