

Basalt rock filter for wastewater

Echeverría Mata, Manolo Enrique

Manolo Enrique Echeverría Mata
mmanloe@gmail.com
Universidad de El Salvador, El Salvador

Alerta
Ministerio de Salud, El Salvador
ISSN-e: 2617-5274
Periodicidad: Semestral
vol. 2, núm. 2, 2019
ralerta@salud.gob.sv

Recepción: 22 Febrero 2019
Aprobación: 30 Abril 2019
Publicación: 31 Julio 2019

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/419/4191898011/>

DOI: <https://doi.org/10.5377/alerta.v2i2.8032>

Citación recomendada: Echeverría M. Filtro de roca basáltica para agua residual. Alerta. 2019;2(2):163-172. DOI: 10.5377/alerta.v2i2.8032

Resumen: Introducción. Se realiza un análisis fisicoquímico a la roca basáltica (escoria negra) de El Salvador para determinar la cantidad necesaria para la adsorción de químicos presentes en un litro de agua residual ordinaria de Ciudad Real, en San Sebastián Salitrillo, en el departamento de Santa Ana; **Objetivo.** Determinar el modelo cinético de adsorción (isoterma de Langmuir, Freundlich, Temkin y Henry que mejor se ajuste al equilibrio de adsorción entre el azul de metileno y la roca basáltica. Se mide la constante del equilibrio de adsorción-desorción formado entre el azul de metileno y la roca basáltica para determinar el área específica de la roca basáltica y establecer el número de sitios activos de adsorción por nanómetro cuadrado de roca basáltica. **Metodología.** La técnica utilizada para el tratamiento del azul de metileno fue la adsorción, ya que es económico y competitivo frente a otros métodos convencionales. Se estudió el efecto de adsorción con 5, 10, 15, 20, 25, 30, 33 ppm de azul de metileno en presencia de 1 gramo de roca basáltica pulverizada durante 30 minutos, tomando alícuotas cada 5 minutos; la adsorción se midió con un espectrofotómetro UV-VIS Cary50. **Resultados.** Se evidencia una buena adsorción debido a que después de 20 minutos llegó a ser constante y tiene una buena superficie específica. El isoterma que mejor se le aplica es Langmuir, debido que su coeficiente de correlación es el más cercano a uno.

Palabras clave: Adsorción, químicos, roca basáltica, aguas residuales, cinética de adsorción.

Abstract: Introduction. A physicochemical analysis of basaltic rock (black slag) from El Salvador was carried out to determine the amount necessary for the adsorption of chemicals present in one liter of ordinary sewage water from Ciudad Real, in San Sebastián Salitrillo, in the department of Santa Ana. **Objective.** To determine the adsorption kinetic model (Langmuir, Freundlich, Temkin and Henry isotherm) that best fits the adsorption equilibrium between methylene blue and basaltic rock. The adsorption-desorption equilibrium constant formed between methylene blue and basaltic rock is measured to determine the specific area of the basaltic rock and to establish the number of adsorption active sites per square nanometer of basaltic rock. **Methodology.** The technique used for the treatment of methylene blue was adsorption, since it is economical and competitive when compared to other conventional methods. The adsorption effect was studied with 5, 10, 15, 20, 25, 30, 33 ppm of methylene blue in the presence of 1 gram of pulverized basaltic rock for 30 minutes, taking aliquots every

5 minutes; adsorption was measured with a UV-VIS Cary50 spectrophotometer. **Results.** A good adsorption is demonstrated due to the fact that after 20 minutes it became constant and has a good specific surface. The isotherm that best applies to it is Langmuir, because its correlation coefficient is the closest to one.

Keywords: Adsorption, chemicals, basaltic rock, wastewater, absorption kinetics.

INTRODUCCIÓN

Muchos de los contaminantes arrojados a las aguas de los ríos, arroyos, lagunas y mares, como los compuestos orgánicos volátiles, los cuales son nocivos para las aguas, requieren para su eliminación un tratamiento terciario adicional a los ya establecidos en el tratamiento de aguas residuales para solucionar dicho problema¹.

Actualmente, existen diversos métodos para la eliminación de este contaminante, pero la adsorción es el método que más se emplea en los tratamientos, ya sea con carbón activado o con resinas con alta capacidad de intercambio iónico. Sin embargo, debido a su costo relativamente alto, se busca una alternativa mucho más favorable, de origen natural que pueda remover los contaminantes de las aguas residuales².

En los últimos años, ha aumentado el interés en la utilización de rocas basálticas como la eliminación de contaminantes orgánicos presentes en soluciones acuosas³

METODOLOGÍA

Determinación de la ley cinética de reacción

Se midió la cantidad de 50 ml de azul de metileno para las concentraciones 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 33 ppm en un erlenmeyer y se tomó el espectro de adsorción a tiempo cero. Se le adicionó 1 g de la roca basáltica negra y se tomaron alícuotas cada 5 minutos hasta llegar a los 60 minutos, cada alícuota fue tomada por un gotero y puesta en tubo de hemolisis para centrifugarlo por 3 minutos para separar la roca basáltica negra del azul de metileno.

Después de los 3 minutos en centrifugación se puso la solución por medio de un gotero en la celda de cuarzo y esta en el espectrómetro UVVIS CARY50, el cual se ajustó a los modelos matemáticos conocidos haciendo uso de la herramienta de los mínimos cuadrados para poder determinar su ley de velocidad de reacción.

Desde la adición de la roca a las concentraciones deberá estar en agitación constante en un agitador magnético durante 60 minutos. Cada vez que se toma una alícuota se debe lavar el gotero antes y después de su uso, igual que la celda. Esto se repetirá para cada concentración. Es muy importante que las rocas estén muy pulverizadas para poder encontrar el área específica con cero márgenes de error.

RESULTADOS

Cinética del equilibrio de adsorción-desorción entre el azul de metileno y la roca basáltica

Se realizó una serie de ensayos cinéticos para determinar el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio en el proceso de adsorción. Se usaron soluciones con concentraciones iniciales de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 33 ppm del azul de metileno en presencia de 1 gramo de roca basáltica.

Se pulverizó la roca basáltica para saber con exactitud el área específica, ya que el área de adsorción aumenta. El mortero y el pistilo fueron instrumentos necesarios para esta labor.

Se tomó el primer espectro en el espectrómetro UVVIS CARY50 sin la presencia de la roca basáltica ya que esto será nuestro tiempo "0" minutos. Eso nos ayudó para saber la absorción inicial hasta que concrete el tiempo en equilibrio. Se le agregó 1 g de la roca basáltica pulverizada a las concentraciones de las diferentes soluciones.

En ese momento se ubica el erlenmeyer en un agitador magnético, para que las partículas de la roca tengan un contacto uniforme; luego se estuvieron tomando muestras con un gotero para ubicarlo en una centrifugadora con su respectivo tubo de hemolisis cada 5 minutos hasta llegar a 20-30 minutos. La centrifugación ayudó a que se separen las partículas de la roca y el azul de metileno para que no afectara en la lectura en el espectrómetro UVVIS CARY50.

Luego de un minuto de centrifugación, se tomó del tubo de hemolisis una muestra para depositarlo en la celda del espectrómetro UVVIS CARY50 y así se tomó el espectro.

En la Figura 1 se muestra la curva cinética obtenida con la roca basáltica. En todos los casos puede apreciarse que la cantidad de azul de metileno se absorbe conforme avanza el tiempo de contacto; luego su capacidad de adsorción va disminuyendo.

Isoterma de adsorción del azul de metileno

Las relaciones de las concentraciones del azul de metileno con el tiempo de adsorción permitieron determinar el tiempo de equilibrio, es decir, el tiempo a partir del cual la roca basáltica no adsorbe más colorante. En este caso, este tiempo fue de 20 minutos para las diferentes concentraciones de colorantes, como se observa en la Figura 2.

Conociendo el tiempo de equilibrio, sabemos cuál será la adsorción de equilibrio en cada concentración de azul de metileno y así se graficó los respectivos isotermas.

Pruebas de los modelos matemáticos de adsorción entre azul de metileno y roca basáltica

A) Isoterma de adsorción de Langmuir de azul de metileno sobre roca basáltica (escoria negra)

Conociendo la longitud de la onda máxima, la cual es 665,03772, se tomó la absorbancia cada 2 minutos hasta llegar a 20-30 minutos. Cada absorbancia fue restada por la absorbancia inicial (al minuto 0); este resultado fue dividido por el resultado de la multiplicación entre (absorptividad molar) que es $0,153 \text{ l/cm y L}$ (longitud del paso óptico que contiene la muestra), que es 1 cm, obteniendo así la concentración molar. Esta fue multiplicada por el volumen de azul de metileno ocupado que fue de 0,150 L para obtener la molaridad.

Se tomó la molaridad inicial (tiempo cero) de las concentraciones de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 33 ppm, respectivamente, para ser restada por la molaridad final (o molaridad en equilibrio que fue a los 20 minutos), ya que este es el tiempo de equilibrio donde llega a ser constante la adsorción

Para encontrar la cantidad de azul de metileno adsorbido se multiplicó por 0,15 litros y por el peso molecular del azul de metileno, que es de $319,852 \text{ g/mol}$; luego se hizo la conversión a μmoles para encontrar la inversa y obtener $1/n_{\text{ads}}$ (las unidades son $1/\mu\text{mol}$).

La concentración en equilibrio (C_{eq}), es decir al tiempo de 20 minutos, se convertirá las unidades a $\mu\text{mol/L}$ para luego sacar su inversa para obtener $1/C_{\text{eq}}$ (la unidad es $L/\mu\text{mol}$). Se graficó $1/C_{\text{eq}}$ vs $1/n_{\text{ads}}$ para

obtener la ecuación de la recta lineal donde la pendiente es $0,5596 \text{ l/L}$, el punto de corte de la recta con el eje Y es $0,1333 \text{ l}/\mu\text{mol}$, coeficiente de correlación es $0,8687$; lo que se muestra en la Figura 4. Así:

Ecuación 1

$$1/n_{\text{ads}} = 1/n_0 + KC/n_0 KC_{\text{eq}} \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Con el valor del punto de corte de la recta Y se encontró n_0 con la fórmula $n_0 = 1/b$ con un resultado de $7,5 \times 10^{-6} \text{ mol}$ en 1 gramo de roca basáltica. Este dato es de gran importancia para calcular la cantidad de masa de roca basáltica que es necesaria para eliminar cualquier otro elemento químico que esté en el agua.

Basándonos en la Figura 3 se seleccionó la concentración de manganeso y hierro que está presente en una muestra de agua residual ordinaria de Ciudad Real, en el municipio de San Sebastián Salitrillo, en el departamento de Santa Ana, en el año 2014, para saber la cantidad de roca basáltica necesaria para eliminar estos 2 elementos del agua donde:

- La concentración del manganeso en el agua residual es de $0,03 \text{ ppm}$, lo que implica que necesita $71,84$ gramos de roca basáltica para su adsorción total en 1 litro.
La concentración del hierro en el agua residual es de $0,103 \text{ ppm}$ lo que implica que necesita $242,11$ gramos de roca basáltica para su adsorción total en 1 litro¹⁰.

Por medio de la pendiente de la gráfica del Isoterma de Langmuir encontramos el valor de la constante por medio de la fórmula $K = 1/mn_0$ (la unidades es de L/mol), donde el valor es de $238,21 \times 10^{-3} \text{ L/mol}$, este tiene el menor valor de contante entre los demás isotermas utilizados:

Ecuación 2

$$S = n_0 N A^4 \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Conociendo el recubrimiento de una molécula de azul de metileno que es $1,3 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, el número de Avogadro y el número total de sitios de adsorción en ausencia de azul de metileno, se encuentra el área superficial de la roca basáltica, que es de $5,87 \text{ m}^2/\text{mol}$. Lo cual indica que cumple en el rango de $1-11,5 \text{ m}^2/\text{mol}$.

Los números de sitios activos totales es de $3,597 \text{ sitios}/\text{nm}^2$. Este valor se obtiene de una regla de tres partiendo del número total de sitios de adsorción en ausencia de azul de metileno.

Ecuación con los parámetros de adsorción del isoterma de Langmuir es:

Ecuación 3

$$1/n_{\text{ads}} = 133,33 \times 10^3 \text{ l/mol} + 5,597 \times 10^6 \text{ K}^1/\text{L} \quad [\text{Ecuación 3}]$$

B) Isoterma de adsorción de Freundlich de azul de metileno sobre roca basáltica (escoria negra)

Conociendo la longitud de la onda máxima, la cual es $665,03772 \text{ nm}$, se tomó la absorbancia cada 2 minutos hasta llegar a 20-30 minutos. Cada absorbancia fue restada por la absorbancia inicial (al minuto 0); este resultado fue dividido por la multiplicación entre (absorptividad molar), que es $0,153 \text{ l/cm}$ y L (longitud del

paso óptico que contiene la muestra), que es 1 cm, obteniendo así la concentración molar. La concentración fue multiplicada por el volumen de azul de metileno ocupado, que fue de 0,150 L para obtener la molaridad.

Se tomó la molaridad inicial de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 33 ppm, respectivamente, para ser restada por la molaridad final de las concentraciones al tiempo 20 minutos, debido a que este es el tiempo de equilibrio. Para encontrar la cantidad de azul de metileno adsorbido se multiplicó por 0,15 litros y por el peso molecular del azul de metileno, que es de 319,852 g/mol. Por ley de conversión se pasó a μ moles y luego se le sacó logaritmo natural ($\text{Log}(q_e)$). La concentración en equilibrio, es decir al tiempo 20 minutos, se convertirán las unidades a μ moles/L para luego sacar el logaritmo natural ($\text{Log}(C_{eq})$).

En el gráfico $\text{Log}(C_{eq})$ vs $\text{Log}(q_e)$ se puede observar un comportamiento lineal donde la pendiente es 0,5596 L. El punto de corte de la recta con el eje Y es 0,1333, coeficiente de correlación es 0,8687.

Ecuación 4

$$\log(q_e) = \log(K) + 1/n \log(C_e)^7 \quad [\text{Ecuación 4}]$$

Con el valor del punto de corte de la recta Y se encontró k con la formula $k=10^m$, con un resultado de 1,9369 μ moles. Se encontró el valor de la constante n por medio de la formula $n = 1/b$, donde el valor es de 2,3332 l/L; es decir, el valor de $1/n$ es de 0,4286, lo que indica que es una adsorción normal.

Ecuación con los parámetros de adsorción de Freundlich:

Ecuación 5

$$\text{Log}(q_e) = \log(1,9386(\mu\text{mol})) + (0,429L)\text{Log}(C_e) \quad [\text{Ecuación 5}]$$

C) *Isoterma de adsorción de Temkin de azul de metileno sobre roca basáltica (escoria negra)*

Conociendo la longitud de la onda máxima, la cual es 665,03772 nm, se tomó la absorbancia cada 2 minutos hasta llegar a 20-30 minutos. Cada absorbancia fue restada por la absorbancia inicial (al minuto 0); este resultado fue dividido por el de la multiplicación entre (absorptividad molar), que es 0,153 l/cm y L (longitud del paso óptico que contiene la muestra), que es 1 cm, obteniendo así la concentración molar.

La concentración fue multiplicada por el volumen de azul de metileno ocupado que fue de 0,150 L para obtener la molaridad. Se tomó la molaridad inicial de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 33 ppm respectivamente, para ser restada por la molaridad final de las concentraciones al tiempo 20 minutos, debido que este es el tiempo de equilibrio.

Para encontrar la cantidad de azul de metileno adsorbido se multiplicó por 0,15 litros y por el peso molecular del azul de metileno que es de 319,852 g/mol, por ley de conversión se pasó a μ moles (q_e). La concentración en equilibrio, es decir al tiempo de 20 minutos, se convertirán las unidades a μ moles/L para luego sacar el logaritmo natural ($\text{In}(C_{eq})$).

Se graficó $\text{In}(C_{eq})$ VS q_e para obtener la ecuación de la recta lineal, donde la pendiente es 2,0732 L. El punto de corte de la recta con el eje Y es 0,6888 μ moles, coeficiente de correlación es 0,8121.

Ecuación 6

Ecuación 7

Ecuación 8

$$q_e = RT/b_T \text{In}A_t + (RT/b) \text{In}B_T \quad [\text{Ecuación 6}]$$

$$B = RT / b_t \quad [\text{Ecuación 7}]$$

$$q_e = B \ln A_T + B \ln B_T^8 \quad [\text{Ecuación 8}]$$

Con el valor del punto de corte de la recta Y se encontró A_T (constante de enlace de equilibrio isotérmico Temkin) con la fórmula $A_T = e^{q_e/Bt}$ con un resultado de 1,3936 μmoles . Con el valor de la pendiente se encontró el valor de la B_T (constante de isoterma de Temkin) por medio de la fórmula $b = B_T$, donde el valor es de 2,0732. Estos son los parámetros para el isoterma.

Ecuación 9

$$q_e = B \ln(1,3936 \mu\text{moles}) + B \ln(2,0732 L) \quad [\text{Ecuación 9}]$$

D) *Isoterma de adsorción de Henry de azul de metileno sobre roca basáltica (escoria negra)*

Conociendo la longitud de la onda máxima, la cual es 665,03772 nm, se tomó la absorbancia cada 2 minutos hasta llegar a 20-30 minutos.

Cada absorbancia fue restada por la absorbancia inicial (al minuto 0); a este resultado fue dividido por el resultado de la multiplicación entre ε (absorptividad molar) que es 0,153 l/cm y L (longitud del paso óptico que contiene la muestra) que es 1 cm, obteniendo así la concentración molar.

La concentración fue multiplicada por el volumen de azul de metileno ocupado, que fue de 0,150 L para obtener la molaridad. Se tomó la molaridad inicial de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 33 ppm respectivamente para ser restada por la molaridad final de las concentraciones al tiempo de 20 minutos, debido que este es el tiempo de equilibrio.

Para encontrar la cantidad de azul de metileno adsorbido, se multiplicó por 0,15 litros y por el peso molecular del azul de metileno, que es de 319,852 g/mol , por ley de conversión se pasó a μmoles (q_e). La concentración en equilibrio, es decir al tiempo de 20 minutos, se convertirá las unidades a $\mu\text{moles}/L$ para luego sacar el logaritmo natural ($\ln(C_{eq})$).

Se graficó C_{eq} VS q_e para obtener la ecuación de la recta lineal, donde la pendiente es 0,1591 L. El punto de corte de la recta con el eje Y es 2,8897 μmoles , coeficiente de correlación es 0,8192.

Ecuación 10

$$C_s = C_e \cdot K^9 \quad [\text{Ecuación 10}]$$

Encontramos el valor de la constante k (capacidad de adsorción) por medio de la fórmula donde el valor es de 0,1591.

Ecuación 11

$$C_s = C_e \cdot (0,1591 L)$$

DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se comparan los resultados del análisis, cada isoterma tiene su coeficiente de correlación, lo que nos indica que el valor más cercano a 1 es el Isoterma que se va utilizar.

El isoterma que se va aplicar es de Langmuir, debido a que con su coeficiente de correlación es 0,8687. El isoterma tiene un valor más cercano a 1 comparándolo con los otros isotermas.

Para comparar el valor del área de la roca basáltica ocupamos el "Data report: specific surface area and physical properties of subsurface basalt samples from the east flank of Juan de Fuca Ridge. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, 104 Ocean Administration Building, Oregon State University, Corvallis OR 97331, USA"⁴, donde especifica que el rango de área de la roca basáltica pulverizada debe estar 1-11,5 m²/g⁴. El área de nuestra roca es 5,87 m²/g con lo cual sí cumple con los requisitos. Los números de sitios activos totales disponibles en la superficie de la roca basáltica es de 3,597 sitios/nm². La constante del isoterma de Langmuir es de 238,205X10⁻³ L/mol y la cantidad de adsorbato necesario para formar una monocapa sobre gramo de rocade basalto es de 7,5X10⁻⁶ moles.

Se utilizó un área de partícula de azul de metileno de 1,3X10⁻¹⁸ m²⁵.

LIMITANTES DEL ESTUDIO

El tamaño de la muestra, al ser demasiado grande, sus datos pueden ser erróneos ya que el área será más pequeña. La falta de estudios previos de investigación sobre el tema, pues los encontrados fueron acerca de la bentonita, carbón activado, los cuales tienen un área específica diferente a la roca basáltica.

Ningún país utiliza la roca basáltica como filtro. El presente estudio es novedoso al plantear su uso, ya que los más comerciales utilizan antracita, sílex, granate, pirolusita, hidróxido férrico, carbonato cálcico, zeolita, carbón activado, resina catiónica y grava sílicas.

CONCLUSIONES

La efectividad de remoción de azul de metileno sobre la roca basáltica (escoria negra) es muy buena y a los 20 minutos llega a ser constante. El isoterma que más se adapta es el Langmuir.

La constante del equilibrio de adsorción-desorción formado por el azul de metileno con la roca basáltica es la del isoterma de Langmuir, indica la formación de una monocapa. La superficie específica se puede calcular a partir de la capacidad de la monocapa.

La superficie de la roca basáltica es homogénea, asumiendo que cada sitio de adsorción puede adherir sólo una molécula de adsorbato.

La cantidad de adsorbato necesario para formar una monocapa en la roca de basalto es de 7,5 x 10⁻⁶ moles; con este valor se conoce la cantidad de la roca basáltica que es necesaria para ocuparlo de filtro conociendo la concentración de los elementos químicos del agua.

Es muy práctico utilizar esta roca para la adsorción para agua contaminada, ya que es un recurso natural sin ningún costo. Si el agua residual solo tuviera manganeso 0,03 ppm y hierro a 0,103 ppm, entonces se necesitarían 313,95 gramos de roca basáltica para eliminar estos elementos químicos.

La roca basáltica se puede volver a utilizar, pero antes hay que hacerle un tratamiento de desorción, lo que implica poner la roca basáltica en hornos a altas temperaturas para la eliminación de todo desecho químico que se ha adsorbido.

Los números de sitios activos totales disponibles en la superficie de la roca basáltica son de 3,597 sitios/nm², donde las partículas de azul de metileno están en la roca basáltica.

FINANCIAMIENTO

Departamento de Química de UES-FMOcc prestó los instrumentos y los reactivos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador; al Departamento de Química de UES-FMOcc por facilitar sus instalaciones.

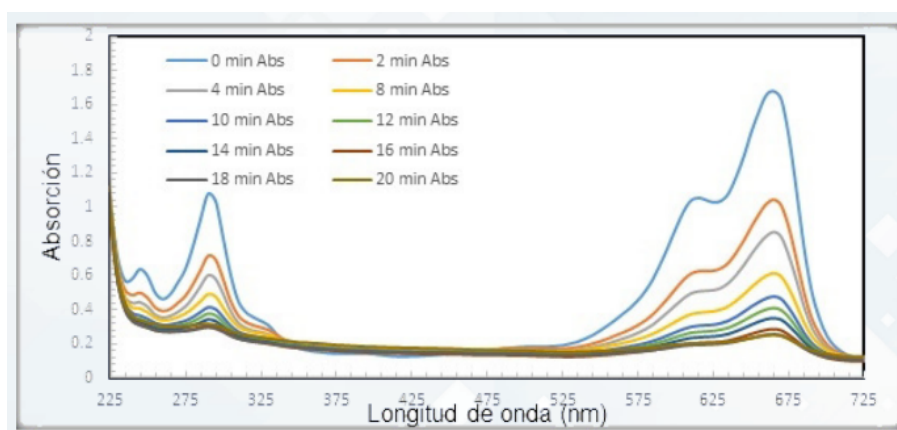


FIGURA 1

Espectros de Adsorción UV-VIS en función del tiempo para una solución de azul de metileno a una concentración de 20 ppm en presencia de 1 gramo absorbente (roca basáltica)
Elaboración propia a partir de los datos recopilados.

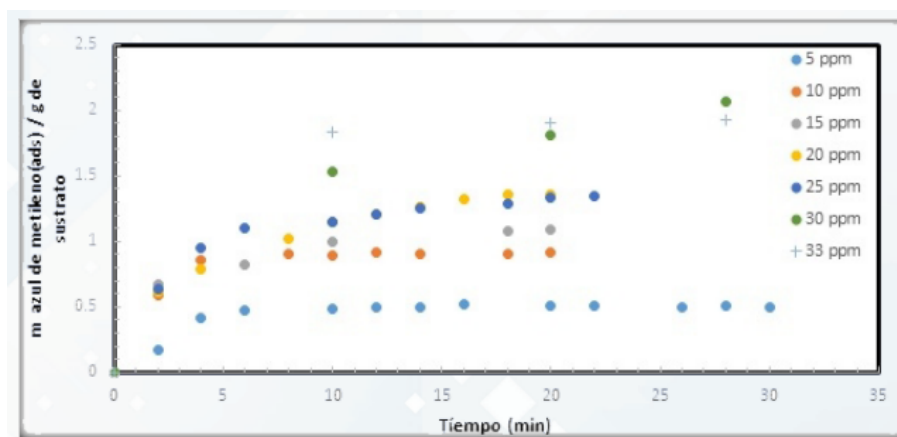


FIGURA 2

Cinética de adsorción en función de masa de azul de metileno/g de sustrato contra tiempo, las soluciones de azul de metileno a concentraciones de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 33 ppm en presencia de 1 gramo absorbente (roca basáltica)
Elaboración propia a partir de los datos recopilados.

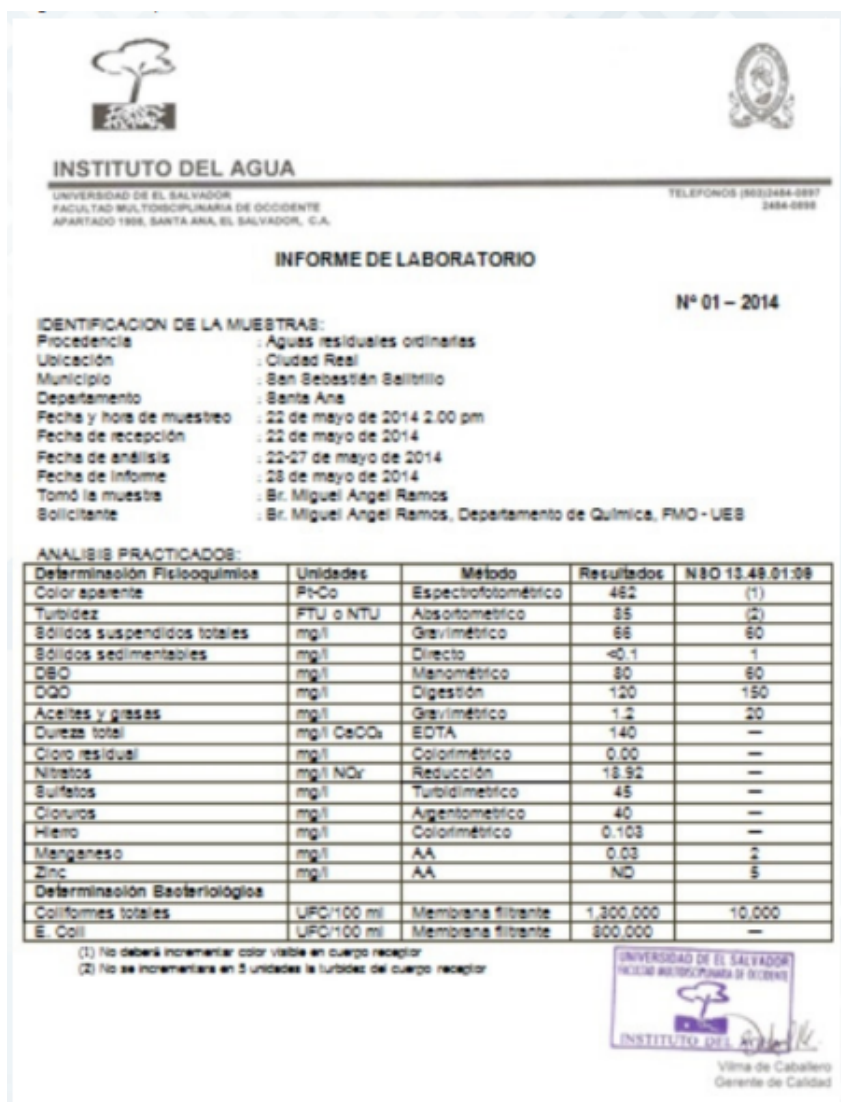


FIGURA 3

Resultados de los análisis de los parámetros críticos sicoquímicos y microbiológicos del agua residual provenientes de la urbanización Ciudad Real de San Sebastián Salitrillo.¹⁰ Ramos Barahona MA. Tratamiento fotocatalítica de las aguas residuales domésticas vertidas por la urbanización Ciudad Real, ubicada en el km 70 de la carretera a Chalchuapa [tesis]. Facultad Multidisciplinaria de Occidente, Departamento de Química: Universidad de El Salvador; 2008.

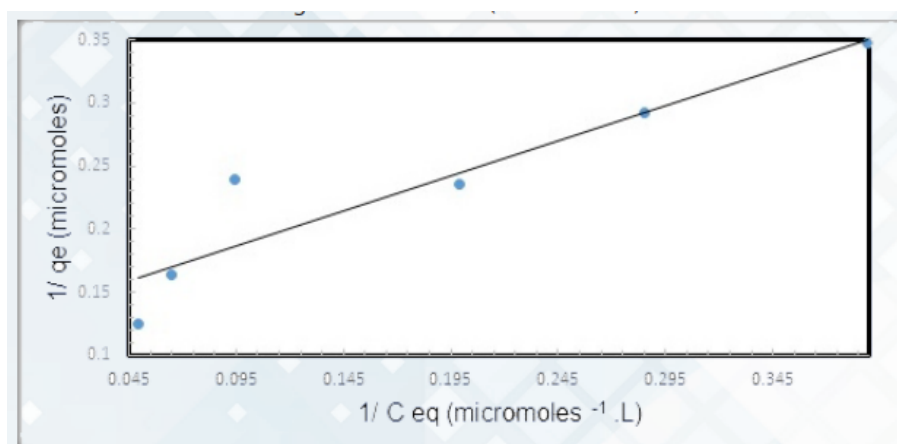


FIGURA 4

Isoterma de Langmuir para los Espectros de Adsorción UV-VIS en función del tiempo para soluciones de azul de metileno a concentraciones de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 33 ppm en presencia de 1 gramo adsorbente (roca basáltica)
Elaboración propia a partir de los datos recopilados.

TABLA 1

Parámetro de los modelos de isotermas de adsorción del azul de metileno sobre roca basáltica

	Isoterma de Langmuir	Isoterma de Freundlich	Isoterma de Temkin	Isoterma de Henry	Área específica
R^2	0.8687	0.8589	0.8121	0.8172	
n_o	7.502×10^{-6} moles				
K	$238 \times 10^{-3} \text{ L/mol}$	$1.94 \times 10^{-6} \text{ mol}$		0.16	
N		2.33 L^{-1}			
S	$5.9 \text{ m}^2/\text{g}$				$1.0\text{--}11.5 \text{ m}^2/\text{g}$
Los números de sitios activos totales	$3.6 \text{ sitios}/\text{nm}^2$				
A_t			1.3974×10^{-6}		
B_t			2.0732 L		

Elaboración propia a partir de los datos recopilados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Largo Castro DP, Villamarín Coral KM. Caracterización y activación química de arcilla tipo bentonita para su evaluación en la efectividad de remoción de fenoles presentes en aguas residuales. Tesis de pregrado. Universidad Tecnológica de Pereira; 2013. 115p
2. Cornejo Rivera MD, Valladares Alemán JR, Hernández Hernández AM. Comportamiento de la producción del cultivo de chile dulce (*capsicum annum*) aplicando diferentes dosis de lombricompost en combinación con harina de roca, en el Cantón San José la Labor, municipio de San Sebastián, departamento de San Vicente, año 2013. Tesis. Universidad de El Salvador; 2014. 78 p.

3. Guzmán Andrews MA, Lara Rodríguez TE. Clasificación de basaltos utilizando métodos radiactivos en la región de Atlixco, Cholula y Huejotzingo en el estado de Puebla, México. Tesis colectiva. Instituto Politécnico Nacional; 2014. 75 p.
4. Nielsen ME, Fisk MR. Data report: specific surface area and physical properties of subsurface basalt samples from the east flank of Juan de Fuca Ridge. Proc. IODP. 2008;301(205)1-8. DOI: 10.2204/iodp.proc.301.205.2008
- Lara González L. Fitorremediación para la extracción del colorante “azul de metileno” mediante el uso de *Eichhornia crassipes*. Tesis de grado. Universidad Autónoma del Estado de México; 2017. 144 p.
6. Martín Martínez JM. Adsorción física de gases y vapores por carbones. Universidad de Alicante, Servicio de Publicaciones; 1990
7. Villarrasa García E. Desarrollo de materiales para adsorción. Tesis doctoral. Universidad de Malaga; 2014. 327 p.
8. Dada AO, Olalekan AP, Olatunya A, Dada AO. Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn²⁺ Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk. J. Appl. Chem. 2012; 3(1):38-45. DOI: 10.9790/5736-0313845
9. Martínez Stagnaro SY. Evaluación sobre el uso de arcillas para la adsorción de colorantes utilizados en la industria textil. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de La Plata, 2017. 182 p.
10. Ramos Barahona MA, Méndez EE. Tratamiento fotocatalítico de las aguas residuales domésticas vertidas por la urbanización Ciudad Real, ubicada en el km 70 de la carretera a Chalchuapa. Tesis de grado. 1ra Edición. Santa Ana. Universidad de El Salvador; 2014. 200 p.
11. Zollinger H. Color Chemistry, Synthesis, Properties and Applications of Organic Dyes and Pigments. 2nd revised Edition. John Wiley & Sons; 1991
12. Ilermann JM. Water treatment by heterogeneous photocatalysis. Environmental Catalysis (1999):171-194. DOI: 10.1142/9781848160613_0009
13. Schiavello M. Photocatalysis and Environment: Trends and Applications. Kluwer Academic Publishers; 1988. 728 p.
14. Serpone N, Pelizzetti E. Photocatalysis, Fundamentals and Applications. 1ra Edición. New York. Wiley Interscience; 1998. 650 p.
15. Ollis DF, Al-Ekabi H. Photocatalytic purification and treatment of water and air. Elsevier Science Publishers BV, Amsterdam; 1993. 820 p.
16. Blake DM. Bibliography of work on the photocatalytic removal of hazardous compounds from water and air. 1994. 83. Disponible en: <https://www.osti.gov/servlets/purl/10149538-M8uQ3I/native/>
17. Pulgarin C, Psjonk CM, Bandara J. Meeting ACS división of environmental chemistry. 1ra Edición. Anaheim. Paper N° 232; 1995. 767 p.
18. Ollis DF. Photocatalytic purification and remediation of contaminated air and water. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIC - Chemistry. 2000;3(6):405–411. DOI: 10.1016/S1387-1609(00)01169-5
19. Lakshmi S, Renganathan R, Fujita S. Study on TiO₂-mediated photocatalytic degradation of methylene blue. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 1995;88(2-3):163-167. DOI: 10.1016/1010-6030(94)04030-6
20. Tennakone K, Senadeera S, Priyadharshana A. TiO₂ catalysed photo-oxidation of water in the presence of methylene blue. Solar Energy Materials and Solar Cells. 1993;29(2):109-113. DOI: 10.1016/0927-0248(93)90068-E
21. Nohara K, Hidaka H, Pelizzetti E, Serpone N. Processes of formation of NH₄⁺ and NO₃⁻ ions during the photocatalyzed oxidation of N-containing compounds at the titania/water interface. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 1997;102(2-3):265-272. DOI: 10.1016/S1010-6030(96)04478-4
22. Menjívar Ortega RB, Méndez EE. Destrucción de contaminantes orgánicos por fotocatalisis en medios no acuosos. Tesis de grado. Santa Ana. Universidad de El Salvador; 2015. 208 p.