

Uso de suelos calcinados para minimizar la eutrofización mediante adsorción de fosfatos en Chone, Ecuador

Use of calcined soils to minimize eutrophication through adsorption of phosphates in Chone, Ecuador

Palacios Orejuela, Iván Fernando; Ushiña Huera, Dennis Paúl; Carrera Villacrés, David Vinicio

 Iván Fernando Palacios Orejuela

ifpalacios@espe.edu.ec

ESPE. Sangolquí, Ecuador

Dennis Paúl Ushiña Huera

dpushiña@espe.edu.ec

ESPE. Sangolquí, Ecuador

 David Vinicio Carrera Villacrés

dvcarrera@espe.edu.ec

ESPE. Sangolquí, Ecuador

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN: 1390-7042

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

vol. 5, núm. 1, 2018

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 11 Febrero 2018

Aprobación: 04 Julio 2018

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/624/6243933006/>

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.821>

Autor de correspondencia: ifpalacios@espe.edu.ec



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

Cómo citar: Palacios Orejuela, I. F., Ushiña Huera, D. P., & Carrera Villacrés, D. V. (2018). Uso de suelos calcinados para minimizar la eutrofización mediante adsorción de fosfatos en Chone, Ecuador. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 5(1), 47–53. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.821>

Resumen: Los fosfatos presentes en la Presa Multipropósito Chone han ocasionado problemas de eutrofización en la cuenca del río Grande que provoca afectaciones del tipo social, ambiental y económico para la zona. Una solución es el uso de tecnosoles que son suelos propios de lugar a los cuales se les adiciona elementos ajenos para mejorar su capacidad de remoción de un contaminante específico, sin embargo, este estudio se basó únicamente en la modificación del suelo de Chone mediante su calcinación y así simular un tecnosol capaz de remover fosfatos en soluciones acuosas mediante su calcinación, proceso que provoca un cambio en las propiedades físicas y químicas al tiempo de volatilizar los compuestos orgánicos presentes. Para esto, se realizó una disolución con concentración de 1.25 mg/L de fosfato monobásico de potasio, semejante a la concentración presente en el río. Las concentraciones del adsorbato contenidas en el agua ya filtrada a través del suelo modificado fueron medidas con espectrofotómetro en 4 sesiones continuas a intervalos de 2 horas, la máxima adsorción fue del 92% al cabo de 7 horas de filtrado; la cinética de la adsorción estuvo dada por una reacción de primer orden, además, se obtuvo un mejor ajuste con la isoterma de Langmuir que representó una adsorción en monocapa de fosfatos. Se modeló el comportamiento de la adsorción del fosfato en software libre con el que se estimó un tiempo de saturación del adsorbente de 14 horas. Como conclusiones del trabajo se tiene que los valores de adsorción de fosfatos son mayores con el suelo modificado (92%) que con el suelo natural (40.05%); la calcinación del suelo proporcionó una reactividad de los compuestos férricos presentes en el adsorbente con un incremento de su área superficial, intercambio catiónico y por ende una mayor adsorción del contaminante.

Palabras clave: compuestos férricos, fosfato monobásico de potasio, isoterma de Langmuir, tecnosoles.

Abstract: The phosphates present in the Presa Multipropósito Chone have caused eutrophication problems in the Rio Grande basin, causing social, environmental and economic impacts for the area. One solution is the use of technosols, which are soil added with foreign elements to improve their ability to remove a specific contaminant. However, this study was based on the modification of the Chone soil and thus simulated a technosol

able of removing phosphates in aqueous solutions through its calcination, process that causes a change in the physical and chemical properties at the time of volatilizing the organic compounds present. For this, a solution with concentration of 1.25 mg/L of potassium phosphate monobasic was done, similar to the concentration present in the river. The concentrations of the adsorbate contained in the water already filtered through the modified soil were measured with a spectrophotometer in 4 continuous sessions at intervals of 2 hours, the maximum adsorption was 92% after 7 hours of filtering; the kinetics of the adsorption was given by a first-order reaction, in addition, a better fit was obtained with the Langmuir isotherm, which represented an adsorption in monolayer of phosphates. The behaviour of the adsorption of phosphate was modelled using free software, which was estimated an adsorbent saturation time of 14 hours. As conclusions of the work, phosphate adsorption values are higher with modified soil (92%) than with natural soil (40.05%); the calcination of the soil provided a reactivity of the ferric compounds present in the adsorbent with an increase in its surface area, cation exchange and therefore a greater adsorption of the contaminant.

Keywords: ferric compounds, potassium phosphate monobasic, langmuir isotherm, technosols.

INTRODUCCIÓN

El clima en la región costa ecuatoriana está marcado por una época seca y una lluviosa, esta última caracterizada por el fenómeno de El Niño, que provoca inundaciones en la parte baja de las cuencas de los ríos. La zona de estudio, localizada en Chone, provincia de Manabí sufre de inundaciones, con un registro aproximado de 3500 mm para el 2014 según datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2014), en especial en el cauce del Río Grande, razón por la cual se construyó la Presa Multipropósito Chone (PMCH) inaugurada el 24 de noviembre del 2015, cuyo fin es evitar el crecimiento del río en temporada lluviosa y dotar de agua en la estación seca a aproximadamente 7000 ha (Carrera, Crisanto, Guevara y Maya, 2015). Sin embargo, esta presa ocasionó problemas de eutrofización de tipo hipertrófica en el río (Calvopiña y Vilela, 2017), lo que conllevó un impacto social, ambiental y económico a los poblados que se ubican en su rivera.

Como soluciones ante este problema, se han desarrollado nuevas técnicas en las que se utilizan tecnosoles, que son suelos extraídos del lugar a remediar para su posterior alteración por el hombre, caracterizados por la presencia de artefactos adicionados de forma técnica (Bolaños, Verde, Macías-García, Antelo y Macías, 2014). Para que se denomine propiamente como tecnosol debe existir la adición de elementos ajenos al suelo (>30%) (Bolaños, 2014), caso contrario, si solo se alteran las propiedades del mismo, se trata de un suelo modificado. La calcinación es un cambio de las propiedades físicas y químicas mediante el incremento de la temperatura, en el que se volatilizan los compuestos orgánicos del suelo (Méndez, 2016).

Los suelos de Chone han despertado interés por el estudio de las problemáticas ya mencionadas como en trabajos realizados por Carrera, Guevara, Maya y Crisanto (2015) y (Calvopiña y Vilela, 2017) en los cuales

NOTAS DE AUTOR

ifpalacios@espe.edu.ec

ya se establece una caracterización de estos sustratos, como su densidad, porosidad, conductividad eléctrica (CE), pH entre los principales. Según Carrera, Guevara y Gualichicomín (2014), estos suelos poseen una CE de $0,34 \text{ dS m}^{-1}$ lo que denota una baja salinidad, materia orgánica desde 0,0020% a 0,83% (suelo pobre), densidad entre $0,98$ y $1,24 \text{ g/cm}^3$ (suelos arcillosos) y una porosidad de 50,6% que hace referencia a una textura franca con un contenido considerable de arcilla.

Los suelos arcillosos calcinados poseen muy buenas propiedades puzolánicas (suelos con SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 mayor al 70%, muy resistentes y compactos) (Castillo et al., 2010), con formas amorfas de mucha reactividad. Además, las elevadas temperaturas favorecen el endurecimiento por sedimentación de los compuestos férricos (Llorente, 2002). A estos compuestos se les atribuye un comportamiento adsorbente (Castaño y Arroyave, 1998), para amplias cantidades de metales traza y fosfatos; esta adsorción está influenciada por la presencia de diferentes formas de hierro en cantidades variables, por el pH, materia orgánica, entre otras propiedades del suelo (Acevedo et al., 2004). Los compuestos férricos, en especial los oxidados son anfóteros, con respecto a la reacción con los iones H^+ y OH^- , y a valores de pH ácido promueven el incremento de la carga positiva (Prato et al., 2013), sumado a la elevada superficie específica incrementan la adsorción de aniones como fosfatos, silicatos y ciertos metales (Acevedo et al., 2004). En suelos ácidos tanto el hierro como el aluminio están presentes en cantidades considerables (ya sea parte de la solución del suelo o como iones intercambiables), en estos sustratos existe gran fijación de fósforo que se debe a la formación de compuestos complejos de hierro y aluminio (Acevedo et al., 2004; Prato et al., 2013; Sanguino, 1961).

Con lo señalado anteriormente, los objetivos de este estudio fueron realizar una modificación de las propiedades físicas del suelo de Chone mediante su calcinación, analizar el tipo de isoterma (Langmuir y Freundlich) que mejor exprese su comportamiento y determinar el tiempo requerido para alcanzar el punto máximo de remoción del adsorbato por el adsorbente con el fin de conseguir un suelo modificado capaz de adsorber fosfatos disueltos en solución acuosa de forma semejante a las condiciones de Río Grande para evitar la eutrofización en la parte baja de la cuenca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modificación física del suelo

Los suelos fueron muestreados acorde a la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2002), a partir de los resultados obtenidos por (Calvopiña y Vilela, 2017) donde establecen la aptitud de los suelos para retener fósforo mediante propiedades físicas y químicas de los perfiles muestreados, el perfil seleccionado fue el M16. Los parámetros químicos medidos en los laboratorios de Agrocalidad (Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro) fueron: cantidad de fósforo, aluminio, capacidad de intercambio catiónico (CIC), acidez intercambiable y retención de fósforo cuyos valores se muestran en la tabla 1, de igual forma la tabla 2 presenta los valores obtenidos para las propiedades física del perfil seleccionado.

El tratamiento posterior de la muestra consistió en el secado mediante luz solar por tres días, su triturado y tamizado (tamiz N° 10) para tener un tamaño de partícula uniforme. Posteriormente, se calcinó 50 g. del suelo con la ayuda de un crisol de pedernal y una mufla a temperatura máxima de 600 grados Celsius durante 20 minutos.

TABLA 1
Propiedades físicas del perfil M16

Humedad %	Densidad aparente g. (cm ³)-1	Densidad real g. (cm ³)-1	Porosidad %	Textura
47,49	1,04	2,1	50,4	arcilla

Calvopiña y Vilela (2017)

TABLA 2
Propiedades químicas del perfil M16

pH	3,74
Fósforo (mg.L-1)	< 3,6
Acidez Intercambiable cmol.kg-1	16
Aluminio Intercambiable cmol.kg-1	3,4
K cmol.kg-1	0,24
Ca cmol.kg-1	3,44
Mg cmol.kg-1	13,6
Na cmol.kg-1	0,82
Bases totales cmol.kg-1	18,1
Retención de Fósforo %	54,6

Calvopiña y Vilela (2017)

Contaminación del agua sintética

La concentración de fosfatos presente en las aguas del Río Grande fue simulada a través de una solución de 1,25 ppm de fosfato de potasio monobásico $\text{KH}_2(\text{PO}_4)^{-3}$ (Calvopiña y Vilela, 2017); posteriormente, se colocó el agua sintética (agua con fosfato) en un envase plástico de 0,5 L en donde se instaló una manguera de venoclisis (suero).

Montaje del experimento

El suelo calcinado fue depositado al interior de un tubo PVC de 1 pulgada de diámetro, con un tamiz elaborado de nylon y papel filtro colocado en uno de sus extremos. En la parte superior de un soporte universal se instaló el envase plástico con agua sintética, en la mitad el tubo PVC con el suelo en su interior, ambos conectados mediante la manguera de venoclisis que permitió mantener un caudal constante. El agua filtrada se recolectó en un vaso de precipitación ubicado en la parte baja del soporte (Figura 1). Se tomaron muestras de 0,025 L del agua filtrada a diferentes intervalos de tiempo, la concentración de fosfatos de cada una de las muestras se midió con un espectrofotómetro HACH DR 5000TM UV-Vis (programa 490 del Handbook y $\lambda = 880 \text{ nm}$), según el Método 2340-C del libro Standar Methods de la American Public Health Association (APHA, 2005).

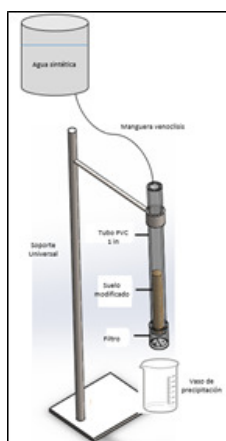


FIGURA 1
Montaje del experimento
Calvopiña y Vilela (2017)

Cinética del proceso y tiempo de vida media

El orden de reacción con respecto a un reactivo, es el exponente de su término de concentración en la ley de velocidad ($v=k.C^n$), donde la suma de los exponentes es el orden global. Para calcular la concentración de un reactivo que quedará transcurrido en el tiempo, es útil integrar la ecuación (1) de velocidad (Chang, 2002).

$$\frac{dC}{dt} = -kC^n \quad \text{Ec. (1)} \quad \text{Ec. (1)}$$

Si $n=1$ (reacción de primer orden), se obtiene la ecuación (2). Donde C_0 es la concentración inicial del reactivo, k la constante de velocidad, y , es la concentración del reactivo pasado el tiempo t de reacción (Avery, 2002).

$$\ln C = \ln C_0 - kt \quad \text{Ec. (2)} \quad \text{Ec. (2)}$$

El tiempo de vida media de un reactivo es el tiempo necesario para que reaccione la mitad de su concentración inicial, expresado en la ecuación 3:

$$t = t_{1/2} \Rightarrow [A] = \frac{[A]_0}{2} \quad \text{Ec. (3)} \quad \text{Ec. (3)}$$

Isotermas

La adsorción es la remoción por adherencia, cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente (suelo modificado) y el adsorbato (fosfato en solución acuosa) (García y Suárez, 2017). Según

la naturaleza del enlace de adsorción, esta puede ser física (fisisorción) unidas por fuerzas de Van der Waals, con formación de multicapas en donde el adsorbato conserva su identidad; o química (quimisorción) con enlaces covalentes, formación de monocapas y pérdida de identidad del adsorbato. La isoterma de adsorción es la relación de dependencia, a una temperatura constante, de la cantidad de adsorbato por peso unitario de adsorbente con respecto a la concentración del adsorbato en equilibrio (Servos, 2014).

En este estudio, se enfatizó el uso de las isotermas de Langmuir y Freundlich. La primera explica una adsorción en monocapa mientras que la segunda en multicapa. La isoterma de Freundlich se expresa de la siguiente forma: (Ec. 4)

$$\text{Log}(q) = \frac{1}{n} \text{Log}(C) + \text{Log}(K) \quad \text{Ec. (4)}$$

Ec. (4)

Donde q es la cantidad de adsorbato (mg) por peso unitario de adsorbente (g); K es la constante de adsorción de Freundlich (mg/g); C es la concentración del adsorbato (mg/L) (Pérez, 2002). Por su parte la isoterma de Langmuir se expresa de la siguiente manera (Ec. 5):

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{b * QM} + \frac{C}{QM} \quad \text{Ec. (5)}$$

Ec. (5)

Donde QM es la cantidad de adsorbato (mg) por peso unitario de adsorbente (g); b es la constante de equilibrio de Langmuir (L/mg) (Pérez, 2002).

Modelación de la adsorción de fosfatos

El proceso de modelamiento sirve para simular o describir el comportamiento de un sistema real complejo mediante ecuaciones para representar las relaciones entre las variables acorde a teorías y principios físicos, químicos implicadas en la adsorción de fosfatos (Balseiro, Petra y Monterroso, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de fosfatos

En total se tomaron 4 muestras del agua sintética filtrada, a intervalos de aproximadamente 2 h. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3. Las concentraciones muestran una reducción de aproximadamente la mitad en cada una de las alícuotas analizadas, hasta alcanzar las 7 h. de filtrado, punto después del cual se satura el suelo y las concentraciones vuelven a incrementarse. La remoción de fosfato alcanzó un 92% (ver Figura 2), una mejora considerable en comparación al 40,05% de remoción del suelo sin modificación alguna, resultado que se obtuvo en el trabajo de Calvopiña y Vilela (2017) con el mismo suelo, resultado similar a lo obtenido en (Barzallo, Bayas, Yáñez y Carrera, 2016). Este porcentaje (92%) es semejante a los registrados en (Bolaños, 2014) y (Velázquez y Caballero, 2014) quienes usan tecnosoles para la adsorción de fosfatos en cuerpos de agua. Además, se puede relacionar que el bajo contenido de materia orgánica, el pH y el contenido de óxidos de hierro y aluminio promueven una mejora en la adsorción de iones fosfatos como lo demostró (Prato et al., 2013).

TABLA 3
Concentraciones de fosfato obtenidas a los diferentes intervalos de tiempo

Tiempo (h)	Concentración (ppm)
0	1,25
3	0,61
5	0,27
7	0,1
9	0,14

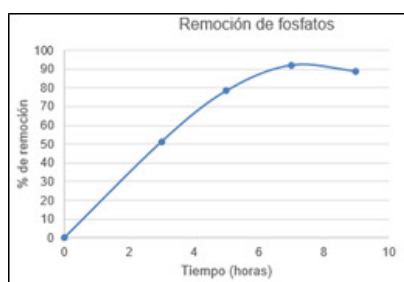


FIGURA 2
Curva de remoción de fosfatos

El suelo analizado presentó un color rojizo, lo que denota la presencia de compuestos férricos, en especial óxidos de hierro, los cuales modifican la carga eléctrica, las propiedades de superficie y aumentan la capacidad amortiguadora del suelo (Acevedo et al., 2004). Dichos compuestos fueron activados con la manipulación de la temperatura, lo que permitió adsorber los fosfatos presentes en el agua. El rol que cumple la temperatura se relaciona con la tasa de adsorción del ión en el suelo, ya que, al incrementar la temperatura aumenta también la adsorción (Barrow, 1992; Silva, 2011), además, con la elevación de la temperatura los óxidos de hierro comunes se pueden transformar en diversos compuestos, como la magnetita (Taylor, 1990), los cuales por su cristalización presentan mayor área superficial con lo que aumentan la capacidad de adsorción de fosfatos suelo (Acevedo et al., 2004).

Cabe destacar que los suelos ácidos, aproximadamente desde pH 6,5 permite el rompimiento de la estructura de los minerales arcillosos y en consecuencia, se libera Al y Fe que reaccionan con el fósforo y se precipita como fosfatos insolubles, como mencionan Sanguino (1961) y Ramírez, Rendón, Acevedo (2011), lo cual concuerda con el trabajo de (Sanyal, De Datta y Chan, 1993) quienes mencionan que, en suelos con pH bajos la adsorción máxima de fósforo se correlaciona con la presencia de minerales de arcillas donde el hierro y aluminio son altas. En este caso se puede inferir que, el pH del suelo bajo estudio tiene una gran significancia en el resultado de la adsorción final de fosfatos.

Cinética del suelo modificado

Se calculó los diferentes órdenes de reacción para el proceso realizado y se escogió el que mejor coeficiente de correlación (R^2) presentó. Los órdenes de correlación se indican en la tabla 4. Un $R^2 = 0,8962$ a mejor cinética que se encuentra descrita por una ecuación de primer orden (Ec. 6), donde t es el tiempo y $[A]_{t=t}$ la concentración.

$$[A]_{t=t} = -0,2821t + 0,1843 \quad \text{Ec. (6)}$$

TABLA 4
Valores de R^2 para cada orden de reacción

Orden de reacción	R^2
Cero	0,8721
Primero	0,8962
Segundo	0,7257
Tercero	0,5278

Así la velocidad de reacción es directamente proporcional a la concentración del reactante (fosfato), es decir que, mientras mayor sea la concentración de fosfatos, mayor será la velocidad de reacción (adsorción). La gráfica para la ecuación de primer orden se muestra en la Figura 3.

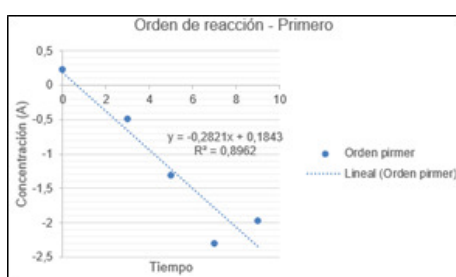


FIGURA 3
Orden de reacción de primer orden

El tiempo que tardaron en reaccionar las partículas del suelo en empezar a adsorber fosfatos (tiempo de vida media) fue de 2,46 h. en base al concepto dado en la ecuación 3, que representó la adsorción del contaminante al entrar en contacto con el suelo, resultado que concuerda con los trabajos de Ayres (1934); Davis (1914) y Hance (1933), quienes comprobaron que de 1 a 4 horas casi todo el fósforo fue fijado por el suelo.

Isotermas de Adsorción

A partir de los valores de la tabla 3 y los calculados para la concentración de adsorbato se obtuvo la isoterma de la Langmuir como se puede ver en la Figura 4 con un $R^2=0,9482$ con su respectiva ecuación en (Ec.7).

$$\frac{C}{q} = (3 \times 10^{-5})C - 6 \times 10^{-7} \quad \text{Ec. (7)}$$

Ec. (7)

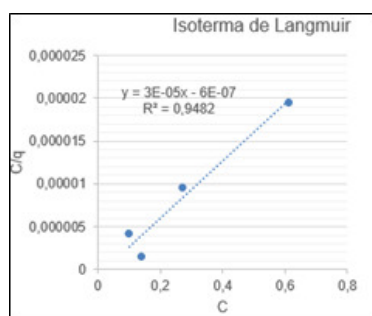


FIGURA 4
Isoterma de Langmuir

Del mismo modo, se calculó la isoterma de Freundlich $R^2=0,9183$ con un y su ecuación final (Ec.8) representada en la Figura 5.

$$\log(q) = -0,3237 \log(C) + 4,7625 \quad \text{Ec. (8)} \quad \text{Ec. (8)}$$

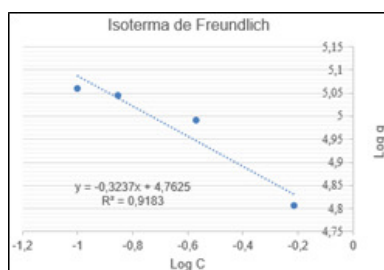


FIGURA 5
Isoterma de Freundlich

En función a los coeficientes de correlación, el mejor ajuste fue con la Isoterma de Langmuir ($R^2=0,9482$), esto implica una adsorción química en la cual se restringe a una monocapa y no existen interacciones laterales entre las moléculas del adsorbato (Pérez, 2002). La diferencia entre los ajustes de ambas isothermas no es significativa, debido a que el ajuste con Freundlich es bueno ($R^2=0,9183$), es decir, el proceso también mantiene un comportamiento de adsorción física en concordancia al tratamiento (calcinación) aplicado al suelo.

Modelamiento de la adsorción de fosfatos

El modelamiento se realizó en el software libre Vensim PLE 7.0, que permitió visualizar el tiempo al cual el suelo modificado se saturó con los fosfatos presentes en el agua. El diagrama del modelo matemático se observa en la Figura 6. Las constantes usadas para el modelamiento con sus valores respectivos son:

- C_0 (concentración inicial del fosfato en el agua): 1,25 mg/L
- Q_v (caudal volumétrico): 0,011 L/h
- A (suelo modificado): 50 g
- K (constante de velocidad): 0,2821
- C_e (concentración máxima adsorbida de fosfato en las mediciones)
- q_t (fosfato en el suelo modificado) valor inicial: 0 mg/g.

Mientras las variables calculadas están dadas de la siguiente forma:

- q_e (constante de equilibrio). (Ec. 9)
- Q_m (flujo másico): (Ec. 10)
- fósforo en el agua (P agua) (concentraciones de la solución filtrada): (Ec. 11)
- adsorción: (Ec. 12)

$$q_e = \frac{C_o - C_e}{A} \quad \text{Ec. (9)} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$Q_m = \frac{C_o * Q_v}{A} \quad \text{Ec. (10)} \quad \text{Ec. (10)}$$

$$P \text{ en el agua} = Q_m - \text{adsorción} \quad \text{Ec. (11)} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$\text{adsorción} = K * (q_e - q_t) \quad \text{Ec. (12)} \quad \text{Ec. (12)}$$

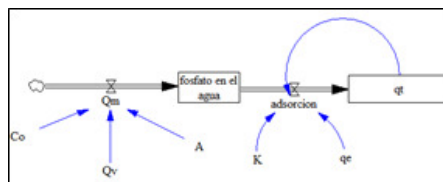


FIGURA 6

Diseño del modelo matemático del fósforo en el suelo modificado

Como resultado del modelo se obtuvo la concentración de fósforo en el suelo calcinado vs. el tiempo (Figura 7) donde se observó que éste se satura completamente al cabo de 14 h. de filtrado, con una constante de equilibrio de 0,00058 (APHA, 2018) mg/g representada en la asíntota, correspondiente a la mayor adsorción de fósforo (1,15 mg/L).

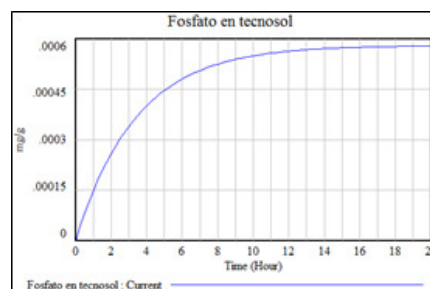


FIGURA 7

Comportamiento del fósforo en el tiempo

El comportamiento del fósforo en el suelo modificado, permite predecir el tiempo que tardará el sustrato en saturarse y así establecer los tiempos de trabajo adecuados con el suelo calcinado.

CONCLUSIONES

La calcinación del suelo para remover fosfatos de soluciones acuosas demostró ser un método eficiente con un 92% de retención. Debido a las características que presenta el suelo de esta zona de Chone, en especial por su pH ácido, baja concentración de materia orgánica y a la presencia de compuestos férricos, que luego de la calcinación incrementan su área superficial y la capacidad de intercambio

catiónico; el método utilizado mejoró la aptitud del suelo para adsorber fósforo. El replicar el método en posteriores estudios con distintos tipos de sustrato permitirá ampliar su campo de aplicación.

El tiempo requerido para alcanzar el punto máximo de remoción fue de aproximadamente 7 h., debido a la naturaleza arcillosa del suelo; la calcinación implicó cambios físicos y químicos en las propiedades del suelo, lo que se demostró con los valores de ajuste obtenidos en las isothermas de Langmuir y Freundlich con adsorciones en monocapa y multicapa respectivamente.

El modelo matemático demostró que el comportamiento del fosfato adsorbido por el suelo modificado se saturará en un tiempo de 14 h. de filtración continua con un q_e de 0,00058 mg/g como máxima relación de adsorción, lo que permite estimar tiempos de trabajo para su aplicación en campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, O., Ortiz, E., Cruz-Sánchez, M. y Cruz-Chávez, E. (2004). El papel de óxidos de hierro en suelos. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 485–497.
- APHA. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Vigésimaprimer ed. New York, Estados Unidos: Díaz de Santos, S.A.
- Avery, H. (2002). *Cinética Química Básica y Mecanismos de Reacción*. Primera ed. Barcelona, España: Editorial Reverté, S.A.
- Ayres, A. (1934). Phosphate fixation in Hawaiian soils. *The Hawaiian Planters Record*, 38, 131–144.
- Balseiro, M., Petra, S. y Monterroso, C. (2015). Leachability of volatile fuel compounds from contaminated soils and the effect of plant exudates: A comparison of column and batch leaching tests. *Journal of Hazardous Materials*, 304, 481–489.
- Barrow, N. (1992). A brief discussion on the effect of temperature on the reaction of inorganic ions with soil. *Journal of Soil Science*, 43, 37–45.
- Barzallo, L., Bayas, N., Yáñez, G. y Carrera, D. (2016). Propuesta de Tecnosol para retener nitratos en el suelo de Chone. XXI Congreso Latinoamericano y XV Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Quito, Ecuador.
- Bolaños, D., Verde, J.R., Macías-García, F., Antelo, J. y Macías, F. (2014). Estudio de la Retención de Fosfatos en un tecnosol. VI Congreso Ibérico del Suelo. Santiago de Compostela, España.
- Bolaños, D. (2014). Aplicación de Tecnosoles para la recuperación de suelos y aguas afectadas por actividades de obras civiles, urbanas y minería. Tesis Doctoral: Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela, España.
- Calvopiña, K. y Vilela, A. (2017). Diseño de tecnosoles para la retención de fosfatos en el agua, de la presa Propósito Múltiple Chone (PPMCH), a partir de muestras de suelos del Cantón Chone, Manabí, Ecuador. Tesis de grado: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Sangolquí, Ecuador.
- Carrera, D., Crisanto, T., Guevara, P. y Maya, M. (2015). Relación entre la composición química inorgánica del agua, la precipitación y la evaporación en la cuenca de Río Grande, Chone, Ecuador. *Enfoque UTE*, 6(1), 25–34.
- Carrera, D., Guevara, P. y Gualichicomín, N. (2014). Caracterización físico-química desde el punto de vista agrícola de los suelos en la zona de riego del proyecto multipropósito Chone. IX congreso de Ciencia y Tecnología ESPE 2014. Sangolquí, Ecuador.

- Carrera, D., Guevara, P., Maya, M. y Crisanto, T. (2015). Variations of Species Concentration in Inorganic Water Dam "Purpose Multiple Chone", Ecuador Based on Precipitation, Evaporation and Evapotranspiration. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 641–646. doi: 10.1016/j.proeps.2015.08.122.
- Castañón, J. y Arroyave, C. (1998). La funcionalidad de los óxidos de hierro. *Revista de Metalurgia CSIC*, 34(3), 274–280.
- Castillo, R., Fernández, R., Antoni, M., Scrivener, K., Alujas, A. y Martirena, J. (2010). Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas. *Revista de Ingeniería de Construcción*, 25(3), 329–352.
- Chang, R. (2002). *Química General*. Séptima ed. Madrid, España: McGraw Hill, S.A.
- Davis, L. (1914). Phosphate fixation in Hawaiian soils. *The Hawaiian Planters' Record*, 38, 206–214.
- García, E. y Suárez, M. (2017). Las arcillas: propiedades y usos. Recuperado el 25 de febrero de 2018, de <https://previa.uclm.es/users/higueras/yymm/arcillas.htm#cic>
- Hance, F. (1933). Phosphate fixation in Hawaiian soils. *The Hawaiian Planters' Record*, 37, 182–195.
- INAMHI. (2014). Anuario Meteorológico N° 51-2011. Recuperado el 20 de febrero de 2018, de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202011.pdf>
- Llorente, M. (2002). Formaciones Superficiales. Recuperado el 26 de febrero de 2018, de <http://campus.usal.es/~deicien/doc/FS.PDF>
- Méndez, E. (2016). Validación del método analítico Walkley y Black de materia orgánica en suelos arcillosos, francos y arenosos del Ecuador. Tesis de grado: Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Pérez, A. (2002). Isoterma de Freundlich y Langmuir. Recuperado el 26 de febrero de 2018, de https://www.academia.edu/11381852/Isoterma_de_Freundlich_y_Langmuir
- Prato, J., Ortiz, L., Gómez, R., Millan, F., Palomares, A.E., Sánchez, J. y Díaz, I. (2013). Adsorción de iones fosfatos sobre lechos de carga variable preparados a partir de suelos oxidicos del Municipio Independencia del estado Táchira. XX Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. San Juan de los Morros, Venezuela.
- Ramírez, V., Rendón, L. y Acevedo, L. (2011). Adsorción máxima del fósforo en suelos de la zona andina centro occidental de Colombia. *Suelos Ecuatoriales*, 41(2), 155–163.
- Sanguino, L. (1961). Influencia del pH sobre la fijación de fósforo y su relación con la respuesta del maíz a la fertilización fosfatada. *Revista de la Universidad Nacional de Colombia*, 11(3–4), 187–209.
- Sanyal, S., De Datta, S. y Chan, P. (1993). Phosphate sorption-desorption behavior of some acidic soils of south and southeast Asia. *Soil Science Society of America Journal*, 57(1), 937–945.
- SEMARNAT. (2002). Norma oficial mexicana NOM021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudios, muestreo y análisis. Recuperado el 25 de febrero de 2018, de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Servos, M. (2014). *Nanotechnology for water treatment and purification*. Primera ed. Londres, Inglaterra: Springer.
- Silva, M. (2011). Adsorción y desorción de fósforo en suelos del área central de la región Pampeana. Tesis Doctoral: Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Taylor, R. (1990). Some observations on the formation and transformation of iron oxides. *Soil Colloids and Their Associations in Aggregates*, 85–103.
- Velázquez, C. y Caballero, W. (2014). Lago Ypacarai, aplicación de tecnosoles antieutrofizantes y reducción de cianobacterias. *Estudios e Investigaciones del Saber Académico*, 8(8), 71–74.