

Determinación de la adsorción de cadmio mediante isotermas de adsorción en suelos agrícolas venezolanos

Determination of the adsorption of cadmium by adsorption isotherms in agricultural soils venezuelans

Nereida Sánchez^{1}, Neudis Subero¹, y Carmen Rivero²*

¹Laboratorio de Investigación y Tecnología de Suelo y Ambiente (LITSA), Facultad de Ingeniería, Departamento de Química, Universidad de Carabobo, Valencia, Edo. Carabobo, Venezuela.

²Laboratorio de Biología y Fertilidad de Suelos, Facultad de Agronomía, UCV, Maracay, Edo. Aragua, Venezuela.

*Autor para correspondencia: nsanchez@uc.edu.ve

Rec.: 06.05.11 Acept.: 28.09.11

Resumen

El cadmio es un metal pesado que tiende a acumularse en la superficie del suelo. En los últimos años, las actividades antropogénicas han ocasionado un incremento en los niveles de este metal en suelos agrícolas generando gran preocupación ambiental debido a su movilidad y lixiviación en el perfil del suelo y a la facilidad con que es absorbido por las plantas. El objetivo de este trabajo fue determinar la capacidad de adsorción de cadmio, de cuatro suelos venezolanos de uso agrícola con diferencias texturales. Para determinar la capacidad de adsorción del metal en cada suelo, inicialmente se determinó el tiempo óptimo de agitación; el cual fue de 2 horas y la relación suelo-solución enriquecedora de Cd; la cual fue de 1:50. Con estos parámetros se elaboraron las isotermas de adsorción para los suelos y se compararon los modelos de Freundlich y Langmuir. Los resultados mostraron que el modelo matemático de Freundlich es el que mejor describe la cinética de la reacción y la capacidad de adsorción de Cd por los suelos, siendo los que poseen mayores contenidos de arcilla, MO y pH ácidos los de mayor capacidad de adsorción.

Palabras clave: Cd y suelo, isotermas de adsorción.

Abstract

Cadmium is a heavy metal which tends to accumulate in the soil surface. In recent years, anthropogenic activities have caused an increase of the levels of this metal in agricultural soils causing great environmental concern due to their mobility and leaching in the soil profile and the ease way to be absorbed by plants. The purpose of this study was to determine the adsorption capacity of cadmium in four Venezuelan agricultural soils with different texture. To determine the adsorption capacity of Cd in each soil, first of all the optimal time of stirring was determined, which was two hours and the soil-enriching solution of Cd, which was (1/50). With these parameters, cadmium adsorption isotherms for all soils were developed and compared with Freundlich and Langmuir models. The data showed that the Freundlich mathematical model is one of that best describes the kinetics reaction and adsorption capacity of cadmium in soils. Soils with the highest clay content, organic matter and acid pH conditions were those that showed higher adsorbing cadmium capacity.

Key words: Adsorption isotherms, cadmium and soil.

Introducción

El cadmio (Cd) es un metal pesado no esencial y poco abundante en la corteza terrestre, sin embargo en las últimas décadas se ha incrementado su acumulación en el suelo, debido a actividades antropogénicas. La contaminación de suelos con Cd está relacionada con la movilidad, transporte y distribución del metal en el perfil del suelo. Esta dinámica del metal se describe mediante procesos de adsorción y desorción que dependen de la forma química del metal y de las propiedades físicas y químicas del suelo, atribuidas a los componentes de éste como son una superficie altamente reactiva, área superficial, presencia de ligandos orgánicos e inorgánicos producto de la descomposición de la materia orgánica, así como también al pH y la presencia de fosfatos (Insuasty *et al.*, 2008; Jakub *et al.*, 2008; Estévez *et al.*, 1998). La disponibilidad de Cd en el suelo determina tanto su posible absorción por los cultivos como su lixiviación y posterior contaminación de aguas subterráneas. Esto ha motivado la realización de estudios sobre este tema en diferentes sistemas de suelo (Alves *et al.*, 2010; Krishnamurti *et al.*, 1999).

En Venezuela se ha evaluado el contenido de Cd en cultivos de cacao en los estados Aragua y Miranda, encontrándose que los niveles disponibles en suelos del estado Miranda varían entre 0.25 y 1.25 mg/kg (Izquierdo y Ramírez, 2000), siendo 0.8 mg/kg el estándar de calidad de suelos agrícolas (Guía de Protección Ambiental, 1995), mientras que en los suelos del estado Aragua los niveles de Cd disponible varían dentro de los niveles críticos (Adams, 1996).

Debido a la complejidad de la dinámica de este elemento en el suelo, el mecanismo de adsorción puede ser analizado a partir de la interacción de sus componentes individuales o distintas formas presentes en la solución (adsorbato) y los constituyentes de la fase sólida del suelo (adsorbente), que representan la superficie activa, lo cual mantiene constante la cantidad de sustancia adsorbente y las condiciones ambientales en las que ocurre el proceso de adsorción. La determinación de equilibrios en batch y la construcción de modelos de adsorción como las isotermas de Freundlich y de Langmuir constituyen

los métodos más extendidos para describir la adsorción de contaminantes en los suelos a escala de laboratorio. Estos modelos representan ecuaciones matemáticas que establecen una relación entre la cantidad de adsorbato retenido por un sólido como función de la cantidad de éste en la fase líquida estática (Alloway, 1990).

Con base en lo expuesto anteriormente, el presente trabajo tuvo como propósito medir la capacidad de adsorción de Cd en cuatro suelos venezolanos de uso agrícola, con diferencias texturales contrastantes, mediante el uso de isotermas de adsorción.

Materiales y métodos

Caracterización de suelos

El muestreo se realizó en suelos de uso agrícola con diferentes tipos de cultivo en un área de 01 ha, en varios sitios y estados de Venezuela: Mariara (Carabobo) en caña de azúcar, Lomas de Níquel (Miranda) con hortalizas, Bailadores (Mérida) con hortalizas y El Tigre (Anzoátegui) en pasturas. En cada suelo se tomó una muestra compuesta por 20 submuestras entre 0 y 20 cm de profundidad, las cuales se secaron a temperatura ambiente, se trituraron y tamizaron a través de una malla de 2 mm. En las submuestras se determinaron: textura (Bouyoucos, 1962), pH en distintas soluciones con una relación 1:1, materia orgánica (MO) (Heanes, 1984), fósforo disponible (Olsen *et al.*, 1954), acidez y aluminio intercambiable (Yuan, 1958), calcio, magnesio, potasio, sodio y capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) (Rhoades, 1982), cadmio total por el método 3050B (Agencia de Protección Ambiental, EPA, 1996) y la técnica de plasma acoplado inductivamente (ICP), mediante la línea de emisión 228,802. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

Cinética de adsorción

Para estudiar la adsorción de Cd, se determinó primero el tiempo de contacto necesario para que el sistema suelo-solución enriquecedora de Cd alcanzara el equilibrio y segundo la relación suelo-solución enriquecedora de Cd.

Determinación del tiempo óptimo de equilibrio para cada suelo

Con base en la metodología propuesta por Christensen (1984), para cada tiempo de agitación (30, 60, 120 y 240 min) se tomaron 1 g de muestra de suelo y 20 ml de solución enriquecedora de CdCl_2 , equivalente a 20 mg/l de Cd en CaCl_2 0.001M como fuerza iónica, que fueron colocados en tubos de centrifuga de polipropileno de 50 ml. El pH de la solución se ajustó al de cada suelo, con una variación de ± 0.03 unidades, utilizando HCl 0,1 Mc/lit ó NaOH 0.1 Mc/lit; se agitaron a 480 r.p.m. en los tiempos de agitación establecidos, se centrifugaron a 10000 r.p.m. por 10 min y los sobrenadantes se filtraron a través de papel de filtro Whatman N° 42. La concentración de Cd en los sobrenadantes se determinó mediante Espectroscopia de Absorción Atómica. La concentración de Cd adsorbido se determinó como la diferencia entre la cantidad en la solución inicial y la cantidad remanente en la solución, después de haber alcanzado el equilibrio (García-Miragaya y Page, 1978). Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y la prueba de medias de Tukey para determinar diferencias significativas entre los distintos tiempos de agitación evaluados y la adsorción de Cd en los suelos.

Determinación de la relación suelo:solución enriquecedora

Para cada suelo se evaluaron distintas relaciones suelo:solución enriquecedora, así: 1:5, 1:20 y 1:50 (Krishnamurti *et al.*, 1999; Ramachandran y D'Souza, 1999; Ahumada *et al.*, 1995; Christensen, 1984). De cada suelo se tomaron 2, 1 y 0.4 g, equilibrados con 10, 20 y 20 ml de la solución de Cd, ajustando el pH en cada suelo. Las muestras fueron agitadas durante 120 min en un agitador horizontal a 480 r.p.m. La suspensión fue centrifugada a 10,000 r.p.m. por 10 min y el sobrenadante se filtró a través de papel Whatman N° 42.

Isotermas de adsorción de Cd

De cada suelo se tomaron por triplicado 0.4 g y se agregaron 20 ml de la solución enriquecida con la dosis de Cd respectiva. El suelo El Tigre se equilibró con solución de Cd en solución de CaCl_2 0.001M de la forma

siguiente: 0.5, 0.75, 1, 2.5, 5 y 10 mg/lit, el suelo Mariara se equilibró con 5, 10, 20, 40, 80 y 160 mg/lit, el suelo Bailadores con 5, 10, 20 30, 40 y 80 mg/lit y el suelo Lomas de Níquel con 0.75, 1.5, 3, 5, 10 y 20 mg/lit. El pH de cada solución se ajustó al de cada suelo. La homogenización de las muestras se hizo con un agitador horizontal a 480 r.p.m. por 120 min. Los resultados de adsorción de Cd en cada suelo se analizaron según las isotermas de Langmuir y van Bemelen-Freundlich, representadas por las ecuaciones (1) y (2) respectivamente:

$$(c/x) = (c/x_m) + (1/k.x_m) \quad (1)$$

$$\log x = \log a + n \log c \quad (2)$$

donde x es la cantidad de Cd adsorbido (mg/kg suelo), c es la concentración de Cd en el equilibrio, x_m es la máxima adsorción de Cd (mg/kg), a es el coeficiente de adsorción de Cd, y k y n son constantes empíricas que expresan la intensidad de la adsorción. También se determinó la relación de las concentraciones en las fases sólida y en la solución, conocida como capacidad de adsorción de un suelo, que se representa por Kd (Gomes *et al.*, 2001) según la ecuación (3),

$$Kd = a.c^{n-1} \quad (3)$$

donde, los valores de a y n se determinaron a partir del modelo linealizado de la isoterma de Freundlich.

Resultados y discusión

Caracterización de los suelos

Dos de los suelos presentaron texturas contrastantes (Cuadro 1): el suelo El Tigre se caracteriza por un alto contenido de partículas gruesas y el suelo Mariara, donde predominan partículas finas. Los suelos Bailadores y Lomas de Níquel presentaron diferencias entre el contenido de partículas finas.

Los suelos Mariara, El Tigre y Bailadores se clasifican como ligeramente ácidos, mientras que el suelo Lomas de Níquel presentó un pH extremadamente ácido, con aluminio intercambiable. La condición de acidez en este último puede ser debida, principalmente, a la hidrólisis de aluminio, mientras en los suelos

Mariara, El Tigre y Bailadores se debe, posiblemente, a la actividad biológica de los organismos, reacciones químicas de descomposición y mineralización de la materia orgánica o meteorización de minerales en el suelo.

Los contenidos de materia orgánica en los suelos Mariara, Bailadores y Lomas de Níquel presentaron un nivel medio (2.1 - 4.0%) y el suelo el Tigre un nivel bajo (< 2%).

Además, los suelos Mariara, Bailadores y Lomas de Níquel presentaron CICE muy altas, lo cual es un indicador de la fertilidad del suelo y sugiere que en ellos la pérdida de cationes por lavado es mínima, a diferencia del suelo El Tigre en el que la CICE es baja, debido a la escasa contribución de la materia orgánica (0.43 %), así como también por la falta de coloides inorgánicos (textura arenosa francosa). El contenido de Cd, en todos los suelos evaluados es inferior al contenido promedio de cadmio en suelos agrícolas (0.8 mg/kg) (Guía de Protección Ambiental, 1995).

Determinación del tiempo óptimo de equilibrio

En la Figura 1 se observa la cantidad de Cd adsorbido vs. el tiempo de contacto del suelo con la solución enriquecedora. La concentración de Cd adsorbida aumenta al incrementar el tiempo de contacto, hasta un valor máximo a partir del cual se mantiene constante.

Se observaron diferencias ($P < 0.05$) entre los distintos tiempos de agitación evaluados y su efecto sobre la adsorción de Cd. No obstante, después de 60 min la cantidad de Cd adsorbido

en los suelos no varió, lo que coincide con los hallazgos en otros estudios (Ramachandran y D'Souza, 1999; Ahumada *et al.*, 1995). Por tanto se seleccionó dicho tiempo como óptimo.

Relación óptima suelo:solución enriquecedora

La capacidad de adsorción de Cd en los suelos Mariara, Bailadores y Lomas de Níquel aumentó al disminuir la relación suelo:solución enriquecedora, siendo mayor la adsorción en el suelo Bailadores (Figura 2).

En el suelo El Tigre no se observa esta dependencia debida a la concentración de Cd, la cual pudo haber saturado los sitios de adsorción en el suelo. Chen *et al.* (2007) trabajando con diferentes relaciones suelo:solución encontraron que a partir de la relación 1:20 la cantidad de Cd adsorbido se hacía constante. Considerando la experiencia anterior y los trabajos realizados por Ramachandran y D'Souza (1999) y Ahumada *et al.* (1995). Los rangos de las soluciones enriquecedoras de Cd utilizadas en la construcción de las isotermas de adsorción de Cd de los suelos Mariara, Bailadores y Lomas de Níquel estuvieron por encima de los 20 mg/lt, mientras que para construir la isoterma de adsorción de Cd del suelo El Tigre se usaron dosis de Cd inferiores a 20 mg/lt.

Isotermas de adsorción de Cadmio

En las curvas de las Figuras 3 y 4 se observan las curvas de adsorción de Cd para los suelos evaluados. El suelo Mariara presenta

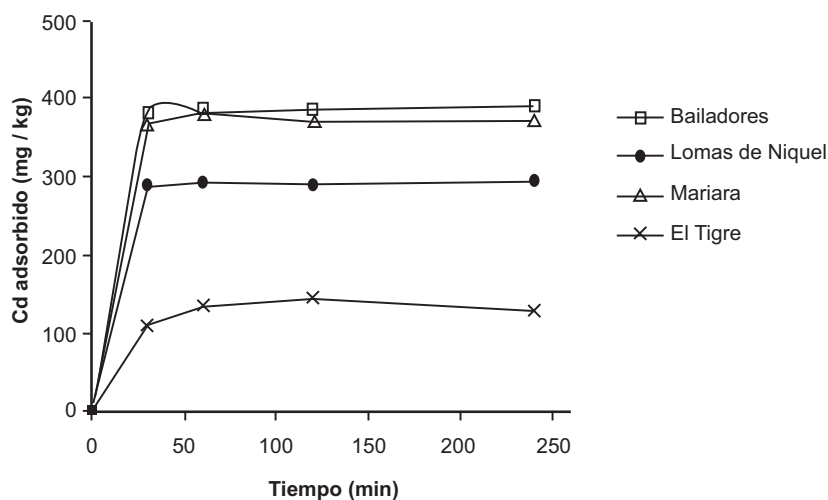


Figura 1. Cantidad de cadmio adsorbido a través del tiempo de contacto con la solución.

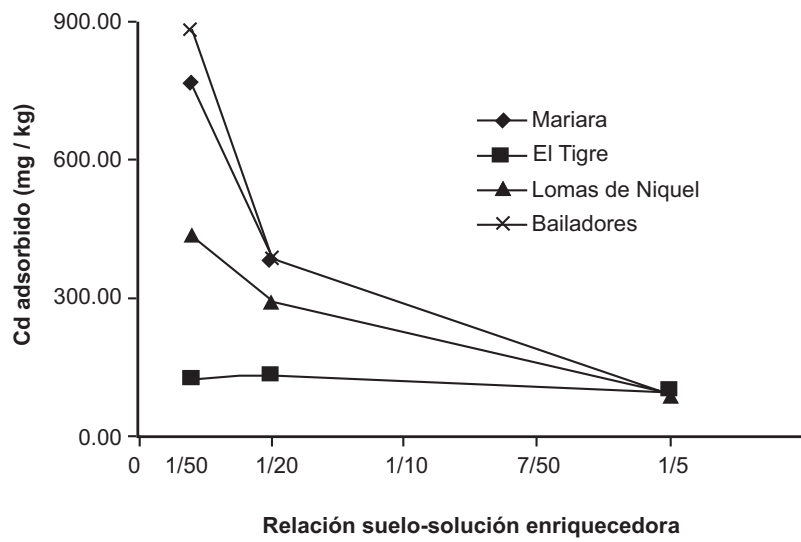


Figura 2. Capacidad de adsorción de Cd con respecto a la relación suelo-solución enriquecedora.

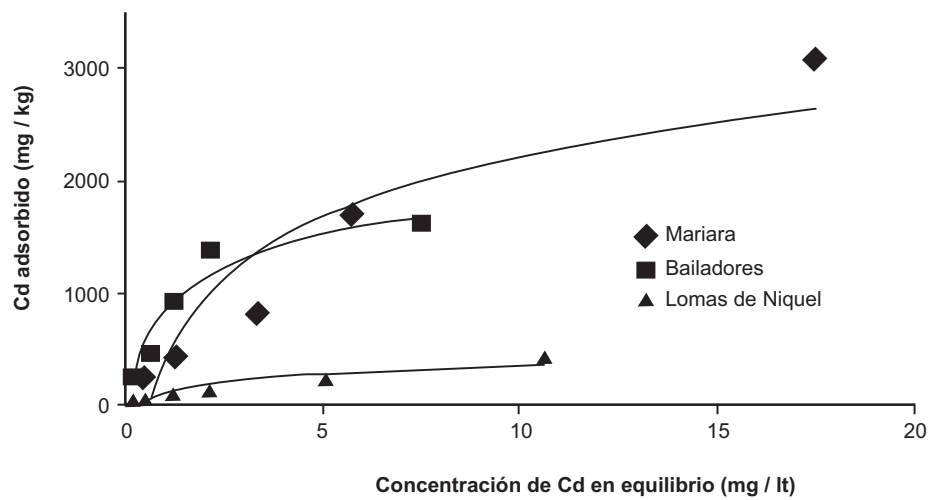


Figura 3. Curvas de adsorción de Cd para los suelos Mariara, Bailadores y Lomas de Niquel.

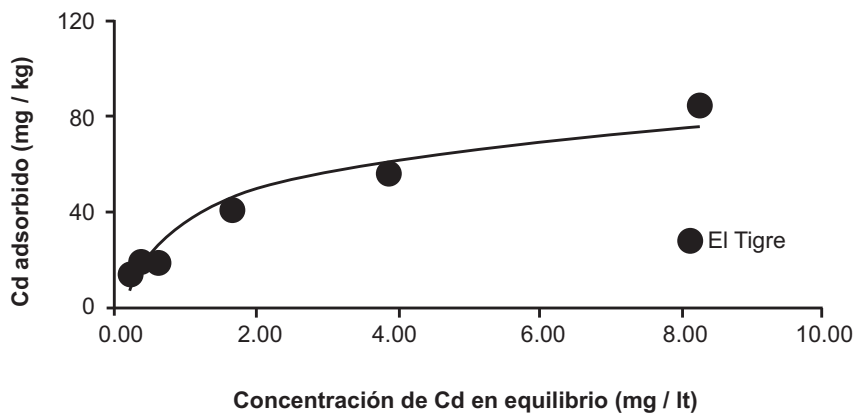


Figura 4. Curvas de adsorción de Cd para el suelo El Tigre.

mayor adsorción de este metal, seguido por los suelos Bailadores, Lomas de Níquel y El Tigre, respectivamente.

Al comparar las isotermas de los cuatro suelos, para dosis de Cd < 80 mg/lit se observa que el suelo Bailadores tiene mayor capacidad de adsorción, seguido por los suelos Mariara, Lomas de Níquel y El Tigre, respectivamente. Esta tendencia coincide con la seguida por la CICE y el contenido de calcio, como se ve en el Cuadro 1. Es posible que los contenidos de Ca en estos suelos hayan sido afectados por el manejo cultural previo al presente ensayo, lo que pudo influir en la adsorción de Cd. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Liao y Selim (2009) y Díaz *et al.* (2005) quienes encontraron que el proceso de adsorción de Cd en los suelos está relacionado principalmente con la CICE y el contenido de calcio. Contreras *et al.* (2005) estudiaron el efecto de la adición de calcio en suelos de texturas contrastantes, encontrando que éste disminuye la cantidad de Cd disponible a medida que se incrementa la dosis de calcio aplicada. Debido a la afinidad química entre los cationes Ca^{2+} y Cd^{2+} , este último tiende a competir por los sitios activos de adsorción en

el suelo, generando un problema ambiental, ya que el Ca^{2+} es un nutriente principal y el Cd^{2+} es un elemento tóxico. La absorción de Cd por un cultivo no sólo depende de la actividad del ion en la solución del suelo sino también de su disponibilidad para la planta desde la fase sólida del suelo mediante el proceso de difusión.

Los valores de los parámetros obtenidos mediante el ajuste de las isotermas de adsorción en los suelos del estudio, utilizando los modelos linealizados de Langmuir y Freundlich, aparecen en el Cuadro 2. Las isotermas de los suelos Mariara y Bailadores se ajustan al modelo de Langmuir, y el valor del parámetro $X_{m\acute{a}x}$ es un indicador de que el suelo Mariara tiene la mayor fuerza de adsorción de Cd, lo que se atribuye al mayor contenido de arcilla presente en este suelo.

Las isotermas de los suelos Lomas de Níquel y El Tigre muestran un mejor ajuste de los datos con el modelo de Freundlich, con coeficientes de correlación mayores que 0.980. Por lo tanto, en estos suelos el valor del parámetro a está relacionado con la capacidad de adsorción de cadmio. Este valor es mayor en el suelo Lomas de Níquel lo que

Cuadro 1. Análisis físicos y químicos de los suelos estudiados.

Análisis	Suelos			
	Mariara	El Tigre	Bailadores	Lomas de Níquel
Arcilla (%)	50	14	22	34
Limo (%)	42	11	52	34
Arena (%)	8	74	26	32
Textura	AL*	aF*	FL*	F*
pH (1:1)	6.2	6.0	6.1	4.1
pH (suelo-KCl 1:1)	4.9	4.4	5.6	3.9
pH (suelo-K ₂ SO ₄ 1:1)	5.6	4.8	6.4	4.3
Al interc. (cmol/kg suelo)	0	0	0	0.44
Acidez total interc.(cmol/kg suelo)	0.21	0.21	0.21	0.64
M.O (g/kg)	3.3	0.4	3.4	2.1
Ca (mg/kg)	6712	1440	8360	4600
Mg (mg/kg)	645	64	263	398
K (mg/kg)	35	7	221	233
Na (mg/kg)	8	12	10	13
CICE (cmol/kg suelo)	19.6	3.9	23.0	13.8
Cd (mg/kg)	0.08	0.02	0.02	0.05
P (mg/kg)	6.8	5.6	257.9	103.9

*AL: arcillo limoso, aF: arena francoso, FL: franco limoso, F: francoso.

Cuadro 2. Adsorción de Cd y coeficientes derivados de la isoterma de Langmuir y de Freundlich.

Suelos	Parámetros de Langmuir		Parámetros de Freundlich			
	R ²	k	X _{máx}	R ²	a	n
Mariara	0.984	0.063	5917.16	0.972	401.33	0.651
Lomas de Níquel	0.832	0.110	769.23	0.999	78.85	0.729
Bailadores	0.983	0.692	1949.32	0.919	671.58	0.561
El Tigre	0.948	0.467	102.04	0.980	29.30	0.500

R²: coeficiente de correlación. k: constante asociada a la energía de enlace. X_{máx}: adsorción máxima de Cd (mg/kg); a: capacidad de adsorción de Cd (mg/kg suelo). n: constante relacionada con la velocidad de adsorción.

indica que este suelo tiene mayor capacidad de adsorción de Cd, lo que correlaciona con los contenidos de arcilla, materia orgánica, pH y CICE de este suelo.

Al relacionar la CICE con la adsorción máxima de Cd (X_{máx}) y la capacidad de adsorción de Cd (a), se encontró que todos los suelos presentaron una relación exponencial del tipo: $y = 58.43 e^{0.186x}$ (R²=0.823); $y = 12.40 e^{0.168x}$ (R²=0.950), respectivamente, sin embargo, cuando se relacionaron los suelos con CICE > 10 cmol/Kg se encontró una relación lineal sólo entre la CICE y a, así: $y = 63.48x - 809.5$ (R² = 0.990).

En general, el proceso de adsorción de Cd depende de las propiedades físicas y químicas en el suelo, así como también de las propiedades intrínsecas del metal, por lo que la capacidad de adsorción del metal no puede ser explicada sólo por un modelo en particular (Miranda *et al.*, 2002).

Conclusiones

La ecuación descrita por el modelo de Freundlich presentó un mejor ajuste de los datos de adsorción de Cd en los suelos Lomas de Níquel y El Tigre, mientras que los datos de adsorción de Cd en los suelos Mariara y Bailadores se ajustaron al modelo de Langmuir.

La capacidad de adsorción de Cd mostró una relación lineal (R² = 0.99) con la CICE para los suelos Mariara, Bailadores y Lomas de Níquel, siendo el suelo Bailadores el que tiene mayor capacidad de adsorción. Por tanto, el grado de adsorción de Cd en estos suelos, no sólo se relaciona con las diferencias texturales entre los mismos, sino también con la CICE, contenido de calcio, MO y pH ácido.

Los suelos Mariara, Bailadores y Lomas de Níquel presentaron alto contenido de calcio debido al manejo agrícola y tienden a adsorber gran cantidad de Cd, lo que podría generar problemas de traslocación del metal a la planta o de lixiviación a horizontes profundos con impacto a cuerpos de agua, todo esto sujeto a la fracción del suelo que se enriquece cuando el Cd es adsorbido.

Agradecimientos

Este trabajo fue subvencionado por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC), según el oficio N° CDCH-0348-08 del 2008.

Referencias

- Adams, M. 1996. Determinación de los Procesos Asociados a la Contaminación con Cadmio en la Región Centro Norte Costera de Venezuela. Universidad Central de Venezuela. Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía. Maracay.
- Ahumada, I.; Salazar, M.; Vergara, I.; y Schalscha, E. 1995. Influencia de la incorporación de sulfato y fosfato sobre la sorción y desorción de Cd en suelo de origen volcánico. *Agricultura Técnica*. Chile. 55 (3-4): 257 - 261.
- Alloway, B. J. 1990. Heavy metals in soils. John Wiley and Sons, Inc. New York, pp:7 - 28.
- Alves, L.; Egreja, F.; De Bellis, V.; Dos Santos, E.; y Ianhez, R. 2010. Utilizaçãodos modelos de Langmuir e de Freundlich na adsorçãode cobre e zinco em solos Brasileiros. *Acta Agronómica*. Universidad Nacional de Colombia. *Acta Agron.* 59 (3). Disponible en http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/17659
- Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54:464 - 465.

- Chen, W.; Chang, A.; Wu, L.; Li, L.; Kwon, S.; y Page, A. 2007. Probabilty distribution of cadmium partitioning coefficients of cropland soils. *Soil Science* 172(2):132 - 140.
- Christensen, T. 1984. Cadmium soils sorption at the concentrations: I. Effect of time, cadmium load, pH, and calcium. *Water, Air, Soil Poll.* 21:105 - 114.
- Contreras, F.; Herrera, T.; e Izquierdo, A. 2005. Efecto de dos fuentes de carbonato de calcio (CaCO₃) sobre la disponibilidad de cadmio para plantas de cacao *Theobroma cacao L.* en suelos de Barlovento, estado Miranda. *Venesuelos* 13: 52 - 63.
- Díaz, A.; Arroqui, A.; y Sarquis, P. 2005. Estudios de niveles de cadmio en perfiles de suelo en la localidad de Villa Nueva. *Minería y Geología* 21 (1) [en línea] Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=223516048002>>ISSN 0258 5979. [Consulta: 2011, Agosto 17].
- EPA, Agencia de Protección Ambiental. 1996. Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges and soils. [Documento en línea]. Disponible en: <http://www.epa.gov/sw-846/pdfs/3050b.pdf>
- Estévez, J.; Andrade, L.; Marcet, P.; y Montero, M. 1998. Influencia de las propiedades del suelo en la fijación y movilidad de Zn y Cd. *Edafología* 5: 9 - 27.
- García-Miragaya, J. y Page, A. 1978. Sorption of trace quantities of cadmium by soils different chemical and mineralogical composition. *Water, air , soil poll.* 57-58:479 - 488.
- Gomes, P.C.; Fontes, M.; Da Silva, A.; Mendoca, E.; y Netto, A. 2001. Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1115 - 1121.
- Guía de Protección Ambiental. Tomo III. Catálogo de estándares ambientales 1995. Publicado por: Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ). Traducido por: A. Schwender, Servicios lingüísticos de la GTZ. [Documento en línea]. Disponible en: <http://www.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/ENV/envsp/vol3366> [Consulta: 2010, Enero 26].
- Heanes, D. 1984. Determination of total organic-C in soil by and improved chromic acid digestion and spectrophotometric procedure: *Soils Sci. Plant Anal.* 15:1191 - 1213.
- Insuasty, L.; Burbano, H.; y Menjivar, J. 2008. Dinámica de Cd en suelos cultivados con papa en Nariño, Colombia. *Acta Agronómica* 57(1):51 - 54.
- Izquierdo, A. y Ramírez, R. 2000. Determinación de cadmio en las plantaciones de cacao del Estado Miranda y alternativas para disminuir su efecto contaminante. INIA Estación Experimental Miranda - Venezuela - UCV. Facultad de Agronomía.
- Jakub, M.; Tomasz, B.; y Maneckia, M. 2008. Imobilization of aqueous cadmium by addition of phosphates. *J. Haz. Mat.* 152:1332 - 1339.
- Krishnamurti, G. S.; Huang, P.; y Kozak, L. 1999. Sorption and desorption kinetics of cadmium from soils: Influence of Phosphate. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 164:888 - 898.
- Liao, L. y Selim, H. M. 2009. Competitive sorption of nickel and cadmium in different soils. *Soil Sci.* 174(10):549 - 555.
- Miranda, E.; Gómez, A.; Hidalgo, C.; Etchevers, J.; y Elizalde, M. 2002. Efecto de la presencia de ligantes orgánicos y del pH en la adsorción de Cd y Pb en Bentonita. *Universidad Nacional Autónoma de México. Rev. Intern. Contam. Amb.* 18 (1):39 - 49.
- Olsen, S. R.; Cole, C.; y Adams, S. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *U.S. Circ.* 939.
- Ramachandran, V. y D'Souza, J. 1999. Adsorption of cadmium by Indian soils. *Water, Air, Soil Poll.* 111:225 - 234.
- Rhoades, J. (Comp.). 1982. Cation Exchange Capacity. *Methods Of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Second edition. Number 9 (part 1).* EE.UU. p. 1159.
- Yuan, T. L. 1958. Determination of exchangeable hydrogen in soils by a titration method. *Florida Agric. Experiment Station. Soil Sci.* 88:164 - 167