

EVALUACIÓN DE LA ADSORCIÓN-DESORCIÓN DE ^{14}C -CARBOFURAN Y FURADAN 3SC[®] EN TRES SUELOS DE CUNDINAMARCA (COLOMBIA)

EVALUATION OF ^{14}C -CARBOFURAN AND FURADAN 3SC[®] ADSORPTION-DESORPTION IN THREE CUNDINAMARCA SOILS (COLOMBIA)

EVALUAÇÃO DA ADSORÇÃO-DESORÇÃO DE ^{14}C -CARBOFURAN E FURADAN 3SC[®] EM TRÊS SOLOS DE CUNDINAMARCA (COLÔMBIA)

*Eliana M. Valencia^{1,2}, Jairo A. Guerrero¹, Amanda de Yunda¹,
María J. Martínez¹*

Recibido: 19/11/07 – Aceptado: 07/04/08

RESUMEN

El plaguicida carbofuran es uno de los N-metilcarbamatos más efectivos y de mayor uso en los cultivos de fresa en Colombia, y debido a su toxicidad es importante evaluar su movilidad en los sistemas específicos de producción agrícola. En este estudio se realizaron ensayos de adsorción y desorción de carbofuran analítico y carbofuran formulado (Furadan) mediante isoterma ajustadas al modelo de Freundlich, sobre el horizonte superficial de tres suelos productores localizados en el departamento de Cundinamarca, área de mayor producción de fresa en Colombia. Se utilizaron concentraciones del plaguicida dentro del intervalo de aplicación comercial al cultivo (comprendidas entre 0,12 y 2,57 $\mu\text{g}/\text{mL}$). En todos los casos se presentó buen ajuste al modelo. La adsor-

ción del plaguicida en los tres suelos fue baja con valores de coeficientes de adsorción ($\log K_d$) entre 0,04 a 0,40. Los coeficientes de adsorción normalizados con el contenido de carbono orgánico del suelo ($\log K_{OC}$) se encontraron en un rango desde 1,73 hasta 2,05. Los resultados muestran diferencias significativas en la adsorción del plaguicida formulado (Furadan) y analítico, encontrándose tendencias opuestas dependiendo del lugar de ensayo; estas diferencias se asociaron con el distinto grado de humificación de la materia orgánica de los suelos, y la presencia de adyuvantes en el producto formulado. En ninguno de los suelos estudiados se presentó el fenómeno de histéresis.

Palabras clave: adsorción, desorción, ^{14}C -carbofuran, histéresis, suelo.

1 Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia 1, sede Bogotá, Bogotá D.C. Colombia.

2 elimeval@hotmail.com

ABSTRACT

Carbofuran is a N-Methylcarbamate frequently used in strawberry cultivation in Colombia. Due to its toxicity it is important to evaluate its migration in the strawberry production system. In this work the adsorption-desorption of ^{14}C carbofuran (analytical standard) and commercial pesticide (Furadan) was studied by Freundlich isotherms in superficial soils of three locations in Cundinamarca state, a major strawberry production area in Colombia. The pesticide concentrations were between the ranges normally used in the farming (ranged between 0.12 and 2.57 $\mu\text{g/mL}$). A good model adjust was present in all the studies. The adsorption of ^{14}C carbofuran on the 3 studied soils was low; with adsorption coefficients values ($\log K_d$) ranging between 0.04 to 0-40. The adsorption coefficients normalised with the organic carbon content of soil ($\log K_{oc}$) ranged from 1.73 to 2.05. Significant differences were found between a commercial pesticide (Furadan) and an analytical carbofuran and were associated with the organic matter humification grade in the different soils and the presence of adjuvants in the formulate one. Hysteresis effect was not presented in the soils studied.

Key words: Adsorption, desorption, ^{14}C -carbofuran, hysteresis, soil.

RESUMO

O praguicida carbofuran é um dos N-metilcarbamatos mais efetivos e de maior uso nos cultivos de morango na Colômbia e devido à sua toxicidade é importante avaliar a sua mobilidade nos sistemas específicos de produção agrícola.

Neste trabalho avaliou-se a adsorção-desorção tanto do ^{14}C carbofuran analítico como uma das formulações comerciais (Furadan) mediante isoterms ajustadas ao modelo de Freundlich, sobre o horizonte superficial de três solos produtores localizados no estado da Cundinamarca, área de maior produção de morango em Colômbia. Utilizaram-se concentrações do praguicida dentro do intervalo de aplicação comercial ao cultivo (0.12 até 2.57 $\mu\text{g/mL}$). Em todos os casos se apresentou bom ajuste ao modelo. A adsorção do praguicida nos três solos foi baixa com valores de coeficientes de adsorção ($\log K_d$) entre 0.04 a 0.4. Os coeficientes de adsorção normalizados com o conteúdo de carbono orgânico do solo ($\log K_{oc}$) encontraram-se numa casta desde 1.73 até 2.05. As diferenças na adsorção do praguicida comercial e do praguicida analítico foram significativas, se bem que as tendências foram diferentes em função do tipo de solo. Estas diferenças foram associadas com o distinto grado de humidificação da matéria orgânica dos solos e à presença de adjuvantes no producto formulado. Em nenhum dos solos estudados se apresentou o fenômeno de histeresis.

Palavras-chave: Adsorção, desorção, ^{14}C -carbofuran, histeresis, solo.

INTRODUCCIÓN

El carbofuran, 2,3-dihidro- 2,2-dimetilbenzofuran-7-il-metilcarbamato (Figura 1), es uno de los N-metilcarbamatos más usados en el departamento de Cundinamarca (Colombia) para controlar insectos, mitas y nemátodos en fresa; generalmente se emplea en la presentación Furadan 3SC de Bayer Cropscience S.A.

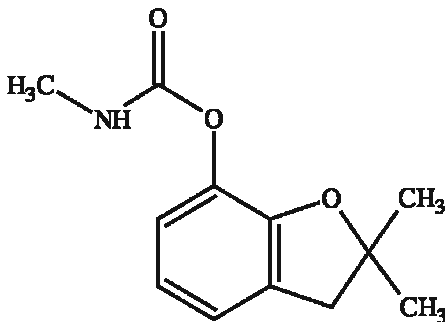


Figura 1. Estructura química del carbofuran.

(33% P/V; dosis de aplicación: 2 L/ha). La solubilidad de carbofuran en agua es 320 mg/L (25 °C) y es soluble en otros solventes como acetona, acetato de etilo, acetonitrilo y benceno. Su presión de vapor es de 2,7 mPa a 33 °C, y el coeficiente de partición octanol/agua es de 1,23-1,42 (1).

Dada la amplia utilización del carbofuran es importante la evaluación y el seguimiento de los residuos en productos de cosecha, aire, aguas y suelos. Los coeficientes de adsorción y de desorción de los plaguicidas describen el comportamiento de éstos en el suelo y representan una expresión de la movilidad inherente del compuesto en el mismo, además permiten establecer si un compuesto es reversible o irreversiblemente adsorbido lo cual influye en su disponibilidad biológica, su toxicidad a los organismos (terrestres y acuáticos) y su potencial de bioacumulación (2-5).

La adsorción de un plaguicida en el suelo se suele determinar mediante las isotermas de adsorción y de desorción ajustadas a un modelo de comportamiento apropiado como el de Freundlich (2-5) descrito por la ecuación [1] que se emplea

tanto para el equilibrio de adsorción como para el de desorción.

$$Cs_{(eq)} = K_F \times Caq_{(eq)}^{1/n} \quad (\mu\text{g} / \text{g}) \quad [1]$$

donde: $Cs_{(eq)}$ es la concentración de carbofuran en el suelo en el equilibrio ($\mu\text{g/g}$), $Caq_{(eq)}$ es la concentración de carbofuran en la solución en el equilibrio ($\mu\text{g/mL}$), $K_F = Kd$ (mL/Lg) y $1/n$ son coeficientes empíricos de la adsorción.

Por lo general, el coeficiente de adsorción normalizado (K_{oc}) se expresa con base en el contenido de carbono orgánico (CO), empleando la ecuación [2].

$$K_{oc} = Kd \times 100 / \% CO \quad (\text{mL} / \text{g CO}) \quad [2]$$

El coeficiente de histéresis “H” se considera una medida de la irreversibilidad de la adsorción (5), están dados por la ecuación [3].

$$H = \frac{l / n_{(ads)}}{l / n_{(des)}} \quad [3]$$

donde: $l / n_{(ads)}$ y $l / n_{(des)}$ son los coeficientes de la ecuación de Freundlich en los procesos de adsorción y de desorción respectivamente.

Aplicando la metodología descrita en suelos de campos de arroz en Ban Non-Reung, en la provincia de Khon Kaen, en Tailandia, con muy bajos contenidos de materia orgánica (0,30%), pH de 4,95, contenidos de arena, limo y arcilla de 42,5, 32,5 y 25,0%, se encontraron valores de K_F de 1,0 L/kg (6, 7). En suelos franco arcillosos con contenido de CO del 5,3% y pH de 8,6 se encontró un Kd de 22,4 L/kg, mientras que en un suelo franco arenoso con CO del 1,8% y pH de 8,4 se encontró un Kd de 19,9 L/kg (1). El análisis de un suelo franco limoso con CO del 1,2% y pH 7,1 arrojó un Kd de 0,246 L/kg, mientras que en un suelo

franco arenoso con CO de 0,4% y pH de 6,5 se obtuvo un *Kd* de 0,115 L/kg (8).

Dada la importancia del fenómeno de adsorción de los plaguicidas en el suelo, y la poca información de su comportamiento en suelos de Colombia, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la adsorción-desorción de ^{14}C carbofuran en tres suelos de Cundinamarca principalmente dedicados al cultivo de fresa, y en los que generalmente se utiliza Furadan para el control de plagas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelos

Las muestras de suelo se tomaron del horizonte superficial en una profundidad de 0-20 cm (9), en fincas localizadas en zonas de cultivo de fresa de los municipios de Facatativá, Sibaté y Guasca, en el departamento de Cundinamarca. Se escogieron lotes en descanso para evitar la interferencia de posibles residuos de Carbofuran. Se secaron a temperatura ambiente y se tamizaron por malla No. 10 (2 mm). Las muestras presentaron las características químicas y mineralógicas que se muestran en la Tabla 1. El análisis físico y químico se realizó en el laboratorio de Química Agrícola del Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia, y el análisis mineralógico se realizó en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Materiales de referencia y reactivos

El estándar de carbofuran usado se obtuvo del Dr. Ehrenstorfer (Augsburg, Alemania), con pureza del 99%. El ^{14}C -Carbofuran de Sigma, con una actividad de

30,56 mCi/mmol. El Furadan 3SC (carbofuran comercial, suspensión concentrada para uso agrícola) de Bayer Cropscience S.A.

Determinación de la adsorción-desorción de ^{14}C -carbofuran en los suelos

Se realizaron dos experimentos de comparación empleando en el primero carbofuran comercial (Furadan), y en el segundo carbofuran analítico. El estudio de adsorción-desorción se llevó a cabo siguiendo el protocolo estándar de la EPA (3).

Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente por el método en paralelo. En el primer experimento se utilizaron 6 concentraciones y 4 réplicas de carbofuran (radiomarcado y frío, este último como Furadan), mientras que en el segundo experimento se evaluaron 4 concentraciones y 3 réplicas de carbofuran (radiomarcado y frío, este último como estándar analítico). Las soluciones empleadas incluyeron la concentración aplicada sobre cultivos de fresa, y se prepararon en CaCl_2 0,01 M. A cada una de ellas se le midió la actividad en desintegraciones por minuto (DPM) en un contador de centelleo líquido Beckman LS 5600 (10). Dichas concentraciones se muestran en la Tabla 2.

Isoterma de adsorción

En tubos de centrifuga de 10 mL de capacidad se pesaron 2,0 g de suelo y se añadieron 5,0 mL de la solución respectiva (C_1 - C_6), se agitaron durante 24 horas en un agitador mecánico (3), se separó el sobrenadante por centrifugación a 10.000 rpm durante 15 minutos en una centrifuga

Tabla 1. Caracterización física y química de los suelos estudiados, y análisis mineralógico de la fracción arcilla por difracción de rayos X

Análisis físico-químico y mineralógico	Suelo		
	Facatativá	Sibaté	Guasca
Humedad (%)	12,01	14,83	2,90
Arena (%)	40	47	42
Arcilla (%)	14	9	13
Limo (%)	46	44	45
Textura ¹	Franca	Franca	Franca
pH (1,1) ²	5,20	5,69	5,32
Carbono orgánico (%) ³	3,79	3,95	1,20
Materia orgánica (%) ⁴	6,53	6,81	2,07
CIC (cmolk ⁻¹) ⁵	39,93	41,47	10,53
Material no cristalino	++++	----	+
Caolinita	+	----	++
Haloisita	+	----	-
Cristobalita	+	----	-
Cuarzo	tr	----	+++
Lepidocrocita	tr	----	tr
Arcillas de 14 Å (expandibles)	tr	----	-
Metahaloisita	-	----	++

MÉTODOS DE ANÁLISIS¹Textura: Bouyucos; ²pH: Relación suelo:agua 1:1³Carbono orgánico: Walkley Black; ⁴Materia Orgánica: CO (%) x 1,724⁵CIC: capacidad de intercambio catiónico: acetato de amonio**CONVENCIONES**

++++ Dominante (> 50%); +++ Abundante (30-50%); ++ Común (15-30%); + Presente (5-10%); tr, trazas (< 5%); - No detectada; ---- No realizado

MLW T 25. Se determinó la actividad (DPM) en alícuotas de 1,0 mL del sobrenadante, que corresponde al ¹⁴C carbofuran en equilibrio (plaguicida no adsorbido). Se evaluó un blanco sin suelo para determinar la posible adsorción sobre las paredes de los tubos que fueron previa-

mente silanizados con diclorodimetilsilano al 5% en tolueno, dicha pérdida de plaguicida fue descartada. La cantidad de carbofuran adsorbido por gramo de suelo se calculó con base en la diferencia entre la cantidad inicial de la solución y la concentración de la misma en el equilibrio.

Tabla 2. Soluciones para el experimento de adsorción-desorción de carbofuran en suelos de cultivo de fresa

Solución	Concentración de ^{14}C carbofuran ($\mu\text{g/mL}$)	Concentración de carbofuran frío ($\mu\text{g/mL}$)	Concentración total de carbofuran ($\mu\text{g/mL}$)
C ₁	0,07	0,05	0,12
C ₂	0,07	0,50	0,57
C ₃	0,07	1,00	1,07
C ₄	0,07	1,50	1,57
C ₅	0,07	2,00	2,07
C ₆	0,07	2,50	2,57

C₁-C₆, concentraciones totales de carbofuran (experimento 1); C₁, C₃, C₄, C₆ concentraciones totales de carbofuran (experimento 2).

Isoterma de desorción

Se retiró la solución remanente de la adsorción y se adicionaron nuevamente 5 mL de CaCl₂ 0,01 M, la solución se dejó en contacto con el suelo durante 24 horas más con agitación continua, periodo establecido para lograr el equilibrio de desorción por otros autores (3, 7). Se centrifugó nuevamente y se determinó la actividad presente en la solución a partir de una alícuota de 1 mL, esta actividad se consideró desorbida por el suelo.

Para la descripción cuantitativa del proceso de adsorción-desorción las isotermas obtenidas experimentalmente representando las cantidades adsorbidas en suelo ($C_{s(eq)}$ en $\mu\text{g/g}$), frente a las concentraciones de la solución en equilibrio, $C_{aq(eq)}$ en $\mu\text{g/mL}$, se ajustaron a la ecuación de Freundlich (ecuación [1]) tanto en el proceso de adsorción como de desorción.

Estabilidad del carbofuran

Para comprobar la estabilidad del plaguicida durante el proceso se tomó una solu-

ción del extracto de Furadan (experimento de desorción), se sometió a un proceso de limpieza y concentración por extracción en fase sólida en cartuchos de aminopropil, usando como mezcla de acondicionamiento y de elución metanol: acetona (0,3:9,7). Se inyectaron 20 μL en un cromatógrafo líquido de alta eficiencia (Agilent Technologies 1100), acoplado a un derivatizador poscolumna PCX5200 (Pickering Laboratories) y detector de fluorescencia (Agilent Technologies). Columna analítica C-18 (25 cm x 4,6 mm di, 5 μm de tamaño de partícula, Pickering Laboratories) con inyector manual (loop de 20 μL) y sistema de desgasificación con Helio. Se usó un gradiente compuesto por acetonitrilo:metanol:agua como fase móvil de elución. Se recogieron fracciones de 1 mL de la fase móvil de elución (en total 40 fracciones), se les adicionó coctel de centelleo, y se determinó la actividad en el contador de centelleo líquido (LSC).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dos de los suelos seleccionados para el estudio presentaron contenidos altos de materia orgánica (Facatativá y Sibaté), y uno de ellos está influenciado por la presencia de material amorfo alofánico caracterizado por su gran superficie de adsorción. El suelo Guasca presenta un contenido inferior de materia orgánica y el componente arcilloso dominado por cuarzo y minerales de red 1:1 con baja capacidad de adsorción. Por tanto, se esperaba un comportamiento diferencial en las tres muestras con respecto a la adsorción del plaguicida.

En las Figuras 2 y 3 se muestran las isotermas ajustadas al modelo de Freundlich para Furadan. La Tabla 3 muestra los coeficientes de correlación de las isotermas, los coeficientes de adsorción y de desorción, los coeficientes de adsorción normalizados con el contenido de carbo-

no orgánico de cada suelo, así como los coeficientes de histéresis.

Se obtuvieron coeficientes de correlación con valores entre 0,976 y 1,000, indicando la linealidad de los datos y el ajuste a la isoterma. Los valores de 1/n son cercanos a 1, por tanto, las constantes de adsorción y desorción de Freundlich son iguales a los coeficientes de partición (K_d), y se puede asumir que dichas constantes no varían en el intervalo de concentraciones estudiadas, y que los valores de las constantes son independientes de la concentración de carbofuran.

Empleando el programa estadístico SPSS (Versión 10,0) se evaluó la correlación entre las diferentes propiedades fisicoquímicas de los suelos y los valores de $Kd_{(ads)}$ obtenidos para cada uno de ellos, encontrando correlaciones positivas estadísticamente significativas entre la CIC de los suelos, el CO de los mismos y los

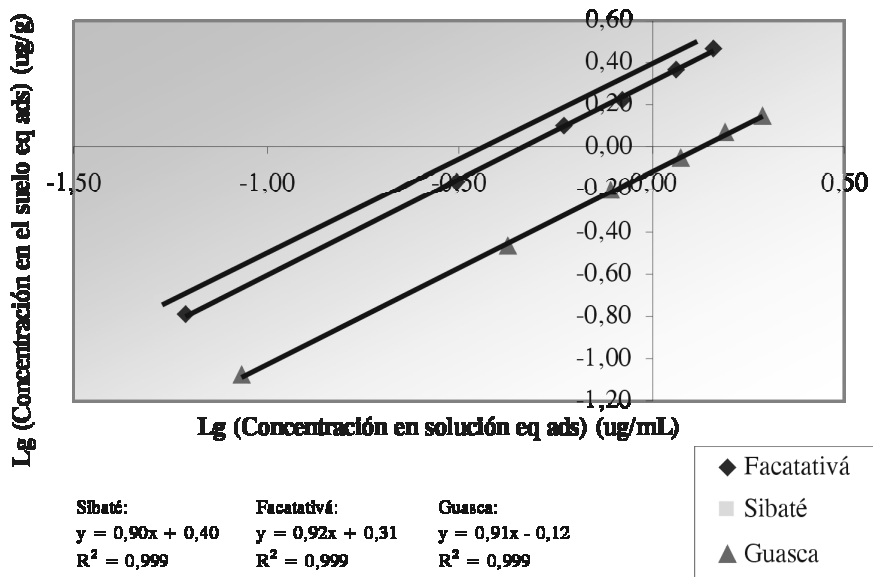


Figura 2. Isoterma de adsorción de FURADAN según Freundlich.

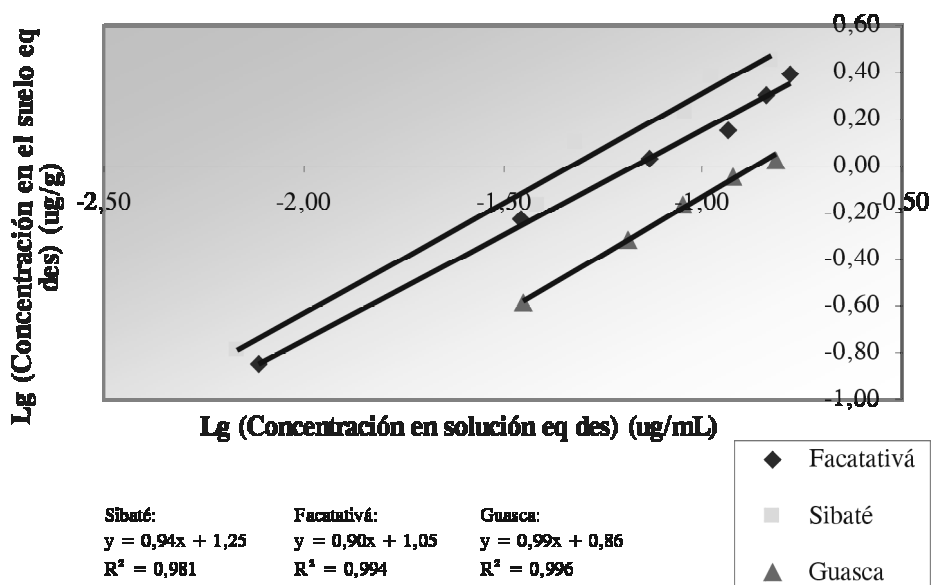


Figura 3. Isoterma de desorción de Furadan según Freundlich.

coeficientes de adsorción con un 95% de confianza.

Los K_{OC} obtenidos para carbofuran son similares a los encontrados por otros investigadores en suelos de diferentes regiones, donde suelos con contenidos de carbono orgánico entre 0,4 y 3,5% presentaron valores de $\log K_{OC}$ entre 1,56 y 1,80 de CO (5), indicando una afinidad escasa de los componentes de la fracción coloidal de los suelos en estudio (materia orgánica y arcilla) por el carbofuran. El $Kd_{(ads)}$ para el Furadan fue mayor en el suelo de Facatavá y Sibaté, con contenido mayor de CO y CIC, los valores obtenidos mantuvieron la relación entre el $Kd_{(ads)}$ y el contenido de materia orgánica encontrada por otros investigadores destacados en la revisión de literatura realizada por Delle en el 2001 (5), quienes encontraron correlación positiva entre el $Kd_{(ads)}$ de carbofuran, el contenido de car-

bono orgánico y la capacidad de intercambio catiónica de los suelos. Según lo citado por Evert (1), este hecho trae como consecuencia menor movimiento en suelos con mayor contenido de materia orgánica y/o contenido de arcillas; este autor encontró que suelos con porcentajes de carbono orgánico del 5,3% presentaron un $Kd_{(ads)}$ de 22,4 L/kg, y suelos con carbono orgánico del 1,8% exhibieron un $Kd_{(ads)}$ de 19,9 L/kg. Por otra parte, Jaramillo y cols. (11) afirman que la baja lixiviación de carbofuran en suelos de áreas de cultivo de papa en Carchi, Ecuador, con contenidos de carbono orgánico altos, entre el 6 y el 10%, se relaciona con la elevada adsorción de los plaguicidas en los suelos. Igualmente, Castillo y cols. (12) encontraron diferencias en la lixiviación de carbofuran en suelos con diferente contenido de materia orgánica. En los tratamientos con menor nivel de materia orgánica el carbofuran fue arrastrado en

Tabla 3. Adsorción-desorción de ^{14}C carbofuran en tres suelos de Cundinamarca

Parámetros	FACATATIVÁ		SIBATÉ		GUASCA	
	Furadan	Carbofuran analítico	Furadan	Carbofuran analítico	Furadan	Carbofuran analítico
r_{ads}	1,000	0,994	1,000	NR	1,000	0,983
r_{des}	0,997	0,997	0,990	NR	0,998	0,976
$\log Kd_{(\text{ads})}$	0,31	0,4	0,39	NR	0,12	0,04
$\log Kd_{(\text{des})}$	1,05	1,58	1,25	NR	0,86	1,37
$\log K_{\text{OC}}$	1,73	1,82	1,81	NR	1,54	1,46
$1/n_{(\text{ads})}$	0,92	0,99	0,90	NR	0,91	1,07
$1/n_{(\text{des})}$	0,90	1,21	0,94	NR	0,99	1,23
H	1,02	0,82	0,95	NR	0,92	0,87

r_{ads} y r_{des} = coeficientes de correlación en la adsorción y desorción respectivamente; $Kd_{(\text{ads})}$, coeficiente de adsorción; $Kd_{(\text{des})}$, coeficiente de desorción; K_{OC} , coeficiente de adsorción normalizado con el carbono orgánico; $1/n_{(\text{ads})}$, pendiente en la ecuación de adsorción; $1/n_{(\text{des})}$, pendiente en la ecuación de desorción; H , coeficiente de histéresis, NR no se realizó.

el agua percolada del primer muestreo, mientras que en aquellos con mayor cantidad de materia orgánica el transporte fue más lento.

En el caso del suelo de Facatativá la presencia de material no cristalino aparentemente no influyó en la adsorción como lo muestran estudios donde suelos alofánicos adsorben mayores cantidades de plaguicidas que suelos no alofánicos, y por tanto, de acuerdo con los resultados, se concluye que la materia orgánica del suelo es el adsorbente más importante para ciertos plaguicidas como el carbofuran (5, 13, 14).

Los valores de K_{OC} obtenidos están en un intervalo entre 1,73 y 2,05 CO, por tanto el carbofuran se puede clasificar de móvil a moderadamente móvil (5).

Para determinar si el proceso de adsorción-desorción se ve influenciado por la presentación del plaguicida se evaluaron

los interceptos de las curvas de adsorción y de desorción mediante una prueba de comparación de medias. Los resultados mostraron diferencia estadísticamente significativa en todos los casos, es decir los fenómenos de adsorción y desorción son diferentes cuando se trata el suelo con carbofuran analítico o con plaguicida comercial, aunque en cada suelo la tendencia es diferente.

Lo anterior sugiere que la afinidad del plaguicida por el suelo varía dependiendo de la formulación y, por ende, su capacidad de adsorberse o desorberse, ya que existen diferentes tipos de adyuvantes, como surfactantes, humectantes, adherentes, acidificantes y penetrantes, y cada uno de ellos se emplea dependiendo del tipo de plaguicida con base en sus funciones específicas; por ejemplo, en el caso de los carbamatos que se degradan en medios básicos se suelen emplear acidificantes, los cuales disminuyen el pH de la solución por asperjar minimizando pérdidas

por degradación alcalina en aguas con pH superiores a 7. Teniendo en cuenta que dependiendo del modo de aplicación se emplean penetrantes para aplicación vía foliar (aceites y derivados de lecitina de soya), y que los surfactantes ayudan a mejorar el cubrimiento de las hojas, se comprende la interacción de estas sustancias con la materia orgánica del suelo.

Algunos investigadores han encontrado que la adsorción de plaguicidas por suelos orgánicos tiene lugar por interacciones hidrofóbicas entre las moléculas de los plaguicidas y las superficies hidrofóbicas de los suelos saturados con surfactantes catiónicos como el bromuro de octadeciltrimetilamonio (15).

La diversidad en la composición de la materia orgánica puede generar diferencias en la adsorción de compuestos orgánicos (5); de esta forma, los valores de K_{oc} obtenidos se pueden deber al contenido en los suelos de huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, donde el orden de adsorción es: huminas > ácidos húmicos > ácidos fúlvicos. En este estudio se encontró que para Facatativá la adsorción fue menor al emplear Furadan, es decir, con adyuvantes, y para Guasca fue mayor.

Esto podría deberse a que en presencia de adyuvantes no se ve afectada la adhesión de la molécula de plaguicida a las partículas sólidas del suelo de alto grado de humificación (Guasca), e incluso podría favorecerla, mientras que en el suelo de Facatativá podría darse una competencia por los sitios de adsorción entre las moléculas de adyuvantes y el carbofuran cuando se emplea el producto formulado. Lo anterior se propone ya que en análisis previos realizados sobre la fracción orgánica

de suelos de Guasca se encontraron cantidades altas de fracción insoluble en álcalis (65% de huminas), seguido por ácidos húmicos y ácidos fúlvicos (16), soportando lo mencionado anteriormente.

Para evaluar la adsorción del Furadan en los diferentes suelos se compararon los Kd_{ads} obtenidos, empleando un test de comparación de medias, el cual muestra que el $t_{tab(95\%)}$ es mayor que el experimental en todos los casos, y por ello se puede concluir que no hay diferencia estadísticamente significativa en la adsorción de los diferentes suelos.

Aunque teóricamente no hay histéresis cuando la adsorción es totalmente reversible –lo que implica que H sea igual a 1–, en la práctica se ha establecido que valores del coeficiente H comprendidos entre 0,7 y 1 no presentan histéresis (17). En nuestro estudio, empleando plaguicida comercial y analítico, los valores de H (Tabla 3) muestran que la adsorción es reversible en todos los suelos, lo que indica que los mecanismos de adsorción y de desorción son muy similares.

El carbofuran no se degradó durante el estudio de adsorción-desorción ya que las fracciones recolectadas en el HPLC no presentaron actividad, excepto la correspondiente al tiempo de retención del carbofuran. El cromatograma se muestra en la Figura 4.

CONCLUSIONES

Aunque los valores de Kd_{ads} obtenidos muestran aparentemente mayor adsorción de Furadan en el suelo con mayor contenido de carbono orgánico, sugiriendo que éste es el componente del suelo

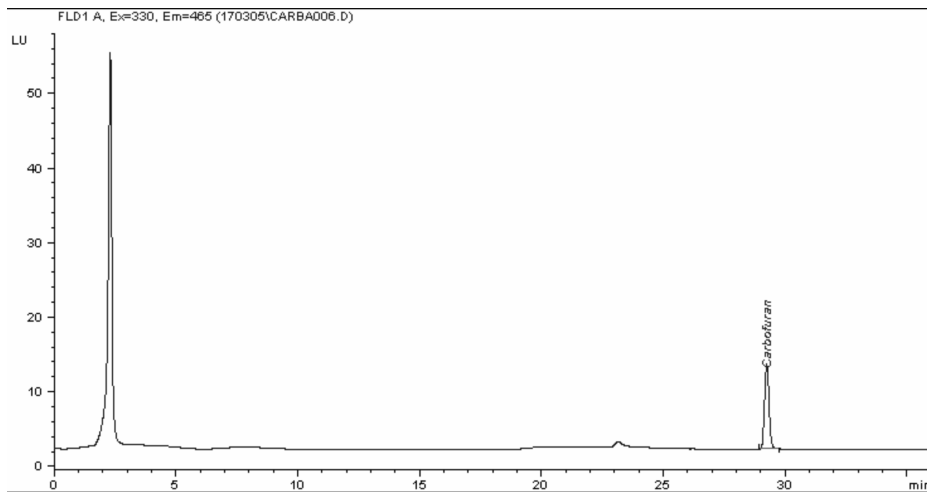


Figura 4. Cromatograma de la solución de Furadan resultante del experimento de desorción.

que influencia en mayor grado la adsorción, se demostró que estadísticamente la diferencia no es significativa, ya que en general los bajos coeficientes de adsorción obtenidos experimentalmente en los suelos estudiados, su relativa alta solubilidad en agua, su bajo coeficiente de partición octanol/agua y los valores de K_{oc} experimentales lo clasifican de móvil a moderadamente móvil, por tanto, el carbofuran puede lixiviar a través del perfil de los suelos, por lo que este plaguicida o sus metabolitos de degradación se pueden encontrar en aguas subterráneas.

La presencia de adyuvantes parece influenciar los fenómenos de adsorción-desorción de carbofuran, aunque estas diferencias pueden estar ligadas al grado de humificación de la MO ya que en cada suelo se observó una tendencia diferente, sugiriendo que si el grado de humificación es elevado se adsorbe preferentemente el compuesto formulado y no el carbofuran analítico.

Los coeficientes de histéresis obtenidos, muy cercanos a la unidad, indican que las interacciones entre carbofuran y estos suelos son débiles, y que el proceso de adsorción es reversible en gran parte.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Departamento de Química de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, y al Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA), Viena, Austria, por su colaboración y financiación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Evert, S. Environmental Fate of Carbofuran. Environmental Monitoring Branch. Department of Pesticide Regulation. Sacramento. 2002. Disponible en:
2. Caceres, T.; Ying, G.; Kookana, R. Sorption of Pesticides Used in Banana Production on Soils of Ecuador.

- Aust. J. Soil Res.* 2002. **40**: 1085-1094.
3. EPA. Fate, Transport and Transformation Test Guidelines. OPPTS 835.1220. 1998. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals. Sediment and Soil Adsorption/Desorption Isotherm.
 4. Samiullah, Y. Prediction of the Environmental Fate of Chemicals. New York: Elsevier Science Publishers Co, Inc. 1990. pp 111-116.
 5. Delle, A. Factors Affecting Sorption of Organic Compounds in Natural Sorbent/Water Systems and Sorption Coefficients for Selected Pollutants. A Review. *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 2001. **30**: 187-435.
 6. Teerakun, M.; Reungsang, A.; Virojanakud, W. Phytoremediation of carbofuran in soil. *J. Sci. Technol.* 2004. **26**: 171-176.
 7. Lalah, J.; Wandiga, S. Adsorption/Desorption and Mobility of Carbofuran in Soil Samples from Kenya. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 1996. **56**: 575-583.
 8. Dutra, E. Carbofuran (096). University of Brazil and Central Laboratory of Health of the Federal District Brasilia. FAO. 2001. Disponible: http://www.fao.org/ag/AGP/pesticide/JMPR/Download/2002_eva/carbofuranjj/pdf.
 9. Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). El análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Manual de Asistencia Técnica No. 47. Bogotá. 1989.
 10. International Atomic Energy Agency. Laboratory Training Manual on the Use of Nuclear and Associated Techniques in Pesticide Research. Technical reports series No. **329**. 1991.
 11. Jaramillo, R.; Bowen, W.; Stoorvogel, J. Carbofuran Presence in Soil Leachate, Groundwater, and Surface Water in the Potato Growing Area in Carchi, Ecuador. Quito: Natural Resource Management. International Potato Center. (CIP). 2000. pp. 355-360.
 12. Castillo, A.; Delfino, M.; Subovsky, M.; Rodríguez, S.; Fernández, N.; Rojas, J. Movilidad de carbofuran en columnas de suelos. Comunicaciones científicas y tecnológicas. Resumen A-016. 2003. Argentina: Universidad Nacional del Nordeste.
 13. Lalah, J.; Wandiga, O.; Dauterman, C. Mineralization, Volatilization, and Degradation of Carbofuran in Soil Samples from Kenya. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 1996. **56**: 37-41.
 14. Baskaran, S.; Bolan, N.; Rahma, A.; Tillman, R. Pesticide Sorption by Allophanic and Non-Allophanic Soils of New Zealand. *J. of Agr. Res.* 1996. **39**: 297-310.
 15. Sánchez, L.; Romero, E.; Sanchez, F.; Dios, G.; Castillo, A.; Cabrera, J.; Peña, A. Efecto de la adición de materia orgánica y surfactantes sobre el comportamiento de metidation en suelos de La Vega de Granada. Estudios de la zona no saturada del suelo. 1999: 109-114.

16. Fairre, P. Lessivage et Planosolisation dans les Sequences de Sols Caracteristiques des Millieux Intradins de Colombie (Amérique du Sud). Tesis doctoral. Francia: Universidad de Nancy. 1998.
17. Mamy, L.; Barriuso, E. Desorption and time-dependent sorption of herbicides in soils. Journal compilation. British Society of Soil Science, *European Journal of Soil Science*. 2006. pp. 1-14.

