

OBTENCIÓN DEL COEFICIENTE DE CARBONO ORGÁNICO PARA DIESEL A TRAVÉS DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

OBTAINING OF THE COEFFICIENT OF ORGANIC CARBON FOR DIESEL THROUGH ISOTERMAS OF ADSORTION

SANTIAGO ALONSO CARDONA GALLO

Profesor Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín .scardona@unal.edu.co

Recibido para revisar agosto 28 de 2006, aceptado diciembre 14 de 2006, versión final febrero 22 de 2007

RESUMEN : En este trabajo se presentan los valores experimentales del coeficiente de sorción carbono orgánico, K_{oc} , para diesel combustible de producción mexicana el cual es una mezcla de compuestos y cuyo valor no se reporta en la literatura especializada, solo se dan a conocer datos para compuestos individuales. El valor de K_{oc} es constante para un mismo compuesto en un rango amplio de sedimentos y suelos. El coeficiente de distribución, K_d de la mayoría de los compuestos orgánicos se incrementa con la fracción de carbono orgánico, f_{oc} , implicando que otra opción para estimar K_d es a través del coeficiente de sorción K_{oc} y f_{oc} mediante la relación $K_d = f_{oc} K_{oc}$. Los valores de K_d se determinaron por medio de isotermas adsorción, para lo cual se probaron cinco tipos de suelos diferentes, cinco concentraciones de diesel en reactores intermitentes y se modelo el proceso con la ecuación de Freundlich considerando $n=1$ (concentraciones bajas) para los ajustes lineales. Se obtuvieron valores de K_{oc} en un rango de 44.82 a 55.62 mL/g. Se realizó el análisis de varianza y se aplicó la prueba de intervalos múltiples de Duncan para determinar la diferencia entre las medias de los K_{oc} obtenidos. Gráficamente se presentó la influencia de la f_{oc} en la adsorción del diesel.

PALABRAS CLAVE: Coeficiente de partición, diesel, coeficiente carbono orgánico, coeficiente de sorción, factor de retardo.

ABSTRACT : In this work the experimental values of the coefficient are presented of sorption organic carbon, K_{oc} , for fuel diesel of Mexican production which is a mixture of composed and whose value is not reported in the literature specialized, only for rank interval of sediments and soils. The coefficient of distribution, K_d , of the majority of the organic compounds is increased with the fraction of organic carbon, f_{oc} , implying that another option to obtain K_d is through the coefficient of sorption K_{oc} and f_{oc} by means of the relation $K_d = f_{oc} K_{oc}$. The values of K_d were determined through isotherms adsorption, for which five types of different floors were tested, five concentrations of diesel in intermittent reactors and itself model the process with the equation of Freundlich considering $n = 1$ for the lineal adjustments. Values were obtained of K_{oc} in a rank from 44.82 to 55.62 mL/g. The analysis was carried out of variance and applied the test of multiple intervals of Duncan to determine the difference among the averages of the K_{oc} obtained. Graphic the influence of the f_{oc} in the adsorption of the diesel was presented.

KEYWORDS: fuel diesel, distribution coefficient, organic carbon coefficient, retardation factor fraction of organic carbon.

1. INTRODUCCIÓN

La utilidad del valor del coeficiente distribución es conocer la afinidad y la adsorción del diesel en el suelo para poder determinar el factor de retardo del hidrocarburo en suelos y aguas subterráneas, y la posibilidad de estimar el

coeficiente de distribución (K_d , mL/g) del diesel para cualquier tipo de suelo del cual se conozca la fracción de carbono orgánico (f_{oc}) sin necesidad de llevar a cabo las isotermas de adsorción. La adsorción distribuye y transporta

las sustancias orgánicas en las aguas superficiales, profundas y suelos.

La distribución de sustancias orgánicas se puede comprender en alguna medida usando las propiedades fisicoquímicas de los compuestos, como la partición relativa entre octanol líquido y el agua, y la solubilidad en el agua. Las isotermas de adsorción representan un método para obtener el coeficiente de distribución K_d , entre la fase en solución de un contaminante, C_w y la fase sólida que lo adsorbe, C_s .

La sorción en la mayoría de los sistemas de aguas superficiales y profundas se describe con el modelo de adsorción de Freundlich (Weber, 1987, Weber, 1992, Karickhoff, 1978, Schwarzenbach, 1993, Schnoor, 1996, Deutsch, 1997) $C_s = K_d C_w^n$ (con $n=1$ para bajas concentraciones) linealizada $\log C_s = \log K_d + 1/n \log C_w$.

La sorción de compuestos hidrofóbicos como los hidrocarburos se relaciona usualmente con el contenido de sólidos (materia orgánica), indicando que el proceso es una distribución orgánica-orgánica o adsorción (orgánica-orgánica), en lugar de una adsorción pura (Schwarzenbach, 1993). Un coeficiente de distribución normalizado, sustancia orgánica-carbono, K_{oc} (mL/g), se obtiene dividiendo K_d por la fracción de la masa de carbono orgánico (CO), f_{oc} (g carbono orgánico/g suelo), en los suelos o sedimentos, así $K_{oc} = K_d / f_{oc}$ (Karickhoff, 1978, Schwarzenbach, 1993, Schnoor, 1996, Deutsch, 1997, García Navarrete, 1996). Se han determinado los K_{oc} para diversos compuestos individuales como son los halógenos alifáticos (cloroformo, tricloroetileno, clorometano, etc.), compuestos aromáticos (benceno, fenol, tolueno, etc.) y plaguicidas (lindano, dieldrín, DDT, etc.) Weber, 1987, Weber, 1992, Karickhoff, 1978, Schwarzenbach, 1993, Schnoor, 1996 y Deutsch, 1997.

El K_d se encuentra en función del carácter hidrofóbico del compuesto orgánico y la cantidad de materia orgánica presente, dado por la relación $K_d = f_{oc} K_{oc}$ (Karickhoff, 1978, Schwarzenbach, 1993). La adsorción de solutos orgánicos dentro de suelos y sedimentos se representa también por K_d . El compuesto

hidrofóbico prefiere estar asociado con el compuesto orgánico del suelo que estar disuelto en el agua, la adsorción ocurre naturalmente dentro de la materia orgánica en la subsuperficie. El K_d de esta adsorción se representa como $K_d = f_{oc} K_{oc}$, a bajas concentraciones donde $n=1$, $k_d = C_s / C_w$ y por tanto $K_{oc} = C_s / f_{oc} C_w$, donde K_{oc} es el coeficiente de distribución de carbono orgánico y f_{oc} es la fracción de carbono orgánico dentro de la matriz del suelo. La ecuación anterior es válida para f_{oc} mayor que 0.001. Los K_{oc} se pueden estimar de otras propiedades físicas del contaminante tales como la solubilidad o el coeficiente de partición octanol/agua:

$$K_{oc} = 0.63 K_{ow}$$

$$\log K_{oc} = 1 \log K_{ow} - 0.21 \quad (R^2 = 1)$$

O incluso con la solubilidad del agua

$$\log K_{oc} = -0.54 \log S + 0.44 \quad (R^2 = 0.94)$$

Donde K_{ow} es el coeficiente de partición octanol/agua y S la solubilidad en el agua del compuesto (Karickhoff, 1979, Chiou, 1983). El K_{ow} mide el grado hidrofóbico natural del compuesto en estudio.

La determinación de K_d y la obtención de K_{oc} , se realiza en reactores por lotes (Karickhoff, 1979, Chiou, 1983, Schwarzenbach, 1993) con cinco tipos de suelos de diferentes lugares de la república mexicana, Tampico en el Estado de Tamaulipas, Valle de Mezquital en el Estado de Hidalgo, Paseo de la Reforma del Distrito Federal, San Andrés Mixquic en el Estado de México y La Alameda Central del Distrito Federal. En todas las ocasiones, se obtuvo un rango de valores para K_{oc} entre 44.82 a 55.62. A los resultados obtenidos se les aplica un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de intervalos múltiples de Duncan para observar si existe diferencia significativa entre las medias de los datos de K_{oc} . Los suelos se analizaron con el sistema unificado de clasificación de suelos, SUCS, del *British Standards Institution BS5930 Site Investigations* y el análisis de diesel en fase líquida con la metodología de la EPA (*Environmental Protection Agency* de Estados Unidos de Norteamérica) 8015B.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el proceso de adsorción y determinación de K_d y K_{oc} se emplearon cinco tipos de suelos de diferentes lugares. Una arena limosa de baja permeabilidad del Rancho San Francisco en San Andrés Mixquic de propiedad de la UNAM en el Distrito Federal (1), un limo arcilloso de baja permeabilidad de la Alameda Central del Distrito Federal (2), una arena limosa del Valle de Mezquital del estado de Hidalgo (3), una arena limosa de la Ciudad de Tampico en el estado de Tamaulipas (4) y una arcilla plástica del Paseo de la Reforma de la Ciudad de México, monumento al Ángel de la Independencia (5). Los suelos se tamizaron con la malla número 40 para retirar piedras y raíces grandes. El análisis de f_{oc} en el suelo se llevó a cabo con la técnica propuesta por la *American Society of Agronomy* y *Soil Science Society* con el método de *Walkey-Blank* modificado con 5 gramos del suelo de interés. Los suelos se analizaron con el sistema unificado de clasificación de suelos, SUCS, del *British Standards Institution BS5930* Site Investigations y el análisis de diesel en fase líquida con la metodología de la *EPA*, 8015B.

Isotermas de Adsorción

Las isotermas de adsorción para el diesel con la serie de cinco suelos se corrió de acuerdo al método propuestos por Karickhoff et al, 1997 y García Navarrete, 1996. Todas las isotermas se determinaron a temperatura ambiental, 18-19°C, en el laboratorio de la Coordinación Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Se usaron 5 concentraciones de diesel (combustible de producción mexicana) 5,000, 10,000, 20,000, 30,000 y 40,000 mg/L para los ensayos por triplicado. Los reactores intermitentes usados fueron viales de 40 mL. A cada vial se le agregó 20 gramos de suelo a estudiar con 30 mL de pentano de marca *Baker* de grado analítico para facilitar la migración del diesel en el suelo y la concentración citada. Posteriormente se colocaron en agitación por un periodo de 48 horas y con una velocidad de agitación de 50 rpm con un equipo *Orbit Water-*

Shaker de marca *Lab-Line Instruments*. 20 mL del sobrenadante se llevaron a viales de 40 mL, se sellaron herméticamente con aluminio y *septa* de teflón para su análisis por cromatografía de gases en un equipo con selector de masa 5890 serie II de marca *Hewlett Packard*, acoplado a un espectrómetro de masas 5971 A, por inyección directa a 280 °C, temperatura del detector selectivo de masas a 280 °C. Se usó una columna capilar de fenil metil silicona reticulado de 25 metros de longitud y 0.2 mm de diámetro. Se empleó un programa de 50 a 280 °C, con incrementos de 5 °C por minuto, durante un periodo de 49 minutos. El gas transportado fue de helio con flujo de 50 ml/min. Por diferencia con respecto a la concentración inicial se calcula la cantidad del compuesto que se adsorbió en el suelo.

3. RESULTADOS

El estudio presentó la dependencia de la adsorción del diesel con el contenido de materia orgánica presente en la matriz de los suelos analizados. La determinación del intervalo de valores del coeficiente de sorción se llevó a cabo por el análisis de la varianza de las medias de los datos obtenidos de K_{oc} y la comparación de estas con el método de intervalos múltiples de Duncan para conocer su diferencia real (Montgomery, 1991).

Análisis de varianza

El análisis de varianza se realizó para determinar si las medias de los K_{oc} calculados presentaban diferencia o alguna similitud y se partió de la premisa que las medias del coeficiente son iguales, como hipótesis nula. Inicialmente se determinaron y clasificaron los datos reportados por las isotermas de adsorción para el coeficiente de distribución K_d de los 5 suelos como los presenta la tabla 1. Posteriormente se clasificaron los valores obtenidos para f_{oc} por el método de titulación *Walkey-Blank* modificado, presentados en la tabla 2.

Tabla 1. Valores obtenidos por isoterma para K_d .
Table 1. Obtained values of K_d by isotherms.

Procedencia del Suelo	Clasificación del suelo	K_{d1} (mL/g)	K_{d2} (mL/g)	K_{d3} (mL/g)
1. Mixquic	Arena limosa de baja plasticidad	0.900	0.800	0.600
2. Alameda	Limo arcilloso de baja permeabilidad	0.100	0.200	0.200
3. Mezquital	Arena limosa	0.800	0.800	0.900
4. Tampico	Arena 92.1%-8% (SW-SM)	0.450	0.400	0.500
5. Reforma	Arcilla plástica color gris oliva de consistencia baja a media	1.400	1.200	1.400

Tabla 2. Valores obtenidos por el método de *Walkey-Blank* modificado de f_{oc} .
Table 2. Obtained values of f_{oc} by *Walkey-Blank* modified method.

Procedencia del Suelo	f_{oc1} (g CO /g suelo)	f_{oc2} (g CO /g suelo)	f_{oc3} (g CO /g suelo)
1. Mixquic	0.013404	0.015252	0.015564
2. Alameda	0.003420	0.003084	0.002748
3. Mezquital	0.019080	0.018840	0.018840
4. Tampico	0.009400	0.008100	0.010800
5. Reforma	0.024300	0.026100	0.025400

Tabla 3. Valores obtenidos de K_{oc} para el experimento.
Table 3. Obtained values of K_{oc} for the experiment.

Procedencia del Suelo (Tratamientos)	Observaciones			(Y_i) Totales de las observaciones	\bar{Y}_i Promedios de las observaciones (mL/g)
	K_{oc1} (mL/g)	K_{oc2} (mL/g)	K_{oc3} (mL/g)		
1. Mixquic	67.14	52.45	38.55	158.14	52.71
2. Alameda	29.24	64.85	72.78	166.87	55.62
3. Mezquital	44.55	42.46	47.17	134.16	44.72
4. Tampico	47.84	49.38	46.30	143.52	47.84
5. Reforma	57.61	45.98	55.12	158.71	52.90
				$Y_{..} = 761.40$	$\bar{Y}_{..} = 253.79$

El cálculo de coeficiente de sorción a partir de los datos reportados en las tabla 1 y 2 se realizó aplicando la ecuación propuesta por Karickhoff, 1978, Schwarzenbach, 1993, Schnoor, 1996, Deutsch, 1997 y García Navarrete, 1996. $K_{oc} = K_d / f_{oc}$. Cada valor de K_{d1} se dividió por f_{oc1} , columna 1 de la tabla 1 con la columna 1 de la tabla 2 y así respectivamente para los otros datos obtenidos. La tabla 3 presenta los valores calculados de K_{oc} para las tres corridas de cada suelo, los totales y los promedios, donde se

realizó el análisis estadístico y se determinó la hipótesis nula.

Y_i : total de las observaciones bajo el i -ésimo tratamiento.

\bar{Y}_i : Promedio de las observaciones bajo el i -ésimo tratamiento.

$Y_{..}$: suma de todas las observaciones.

$\bar{Y}_{..}$: Media general de las observaciones.

Tabla 4. Análisis de varianza.
Table 4. Analysis of variance.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de Cuadrados	F ₀ Estadístico de prueba
Tratamiento	4	231.2082	MS _{Tratamientos} = 57.8020 (A)	A/B= 0.3665
Error	10	1577.0308	MS _{Error} =157.7030 (B)	
Total	14	1808.2390		

Donde:
$$F_0 = \frac{\frac{SS_{Tratamientos}}{(a-1)}}{\frac{SS_{Error}}{(N-a)}} = \frac{MS_{Tratamientos}}{MS_{Error}}$$

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 Y_{ij}^2 - \frac{Y_{...}^2}{N}$$
 Suma total de cuadrados corregidos.

$$SS_{Tratamientos} = \sum_{i=1}^5 \frac{Y_{i.}^2}{n} - \frac{Y_{...}^2}{N}$$
 Suma de cuadrados entre tratamientos.

$$SS_{Error} = SS_{Total} - SS_{Tratamientos}$$
 : Suma de cuadrados debido al error (dentro de los tratamientos).

a: número de tratamientos o niveles.

n: número de observaciones.

N: número total de observaciones, N=an.

El análisis estadístico se realizó con una significancia del 10%. $F_{0.10,4,10} = 2.61$. El estadístico de prueba calculado, F_0 , es menor que el estadístico teórico, $F_{0.10,4,10}$, $F_0 < F_{0.10,4,10}$ (Montgomery, 1991), implicando que las medias de los valores obtenidos de K_{oc} no presentan diferencias significativas y se acepta la hipótesis nula.

Intervalos múltiples de Duncan

El análisis de intervalos múltiples de Duncan se realizó para poder determinar si existía alguna diferencia significativa entre las medias de los valores obtenidos del coeficiente de sorción K_{oc} (Cardona, 1994). El análisis comparó el intervalo mínimo significativo teórico con una significancia del 10% con la diferencia comparativa entre las medias calculadas de los datos obtenidos experimentalmente. La tabla 5 clasifica las medias de menor a mayor rango por la magnitud (Montgomery, 1991).

Tabla 5. Clasificación de las medias de K_{oc} de mayor a menor.

Table 5. Classification of the means of K_{oc} of greater to smaller.

Medias de K_{oc}	Valor (mL/g)	Número
Y ₃	44.72	3
Y ₄	47.84	4
Y ₁	52.71	1
Y ₅	52.90	5
Y ₂	55.62	2

La tabla 6 presenta los valores calculados del intervalo mínimo significativo a partir de los datos teóricos con una significancia del 10% para cada una de las medias.

Tabla 6. Intervalos mínimos significativos teóricos para las medias.

Table 6. Theoretical significant most minimum intervals for the means.

No. Intervalo	Valor teórico	Valor calculado
R ₂	$r_{0.10}(2,10)7.25=4.48 \times 7.25$	32.48
R ₃	$r_{0.10}(3,10)7.25=4.73 \times 7.25$	34.29
R ₄	$r_{0.10}(4,10)7.25=4.88 \times 7.25$	35.38
R ₅	$r_{0.10}(5,10)7.25=4.96 \times 7.25$	35.96

La tabla 7 presenta los valores calculados de la diferencia comparativa entre las medias obtenidas experimentalmente con los intervalos mínimos significativos.

Tabla 7. Comparación entre medias y con el valor teórico.

Table 7. Comparison between means and with the theoretical value.

No. de comparación de medias de K_{oc}	Valores de comparación	Comparación con el valor teórico	
2 vs 3	55.62-44.82=10.8	10.8 < 35.96	R ₅
2 vs 4	55.62-47.84=7.78	7.78 < 35.38	R ₄
2 vs 1	55.62-52.71=2.91	2.91 < 34.29	R ₃
2 vs 5	55.62-52.90=2.72	2.72 < 32.48	R ₂
5 vs 3	52.90-44.82=8.08	8.08 < 35.38	R ₄
5 vs 4	52.90-47.84=5.06	5.06 < 34.29	R ₃
5 vs 1	52.90-52.71=0.19	0.19 < 32.48	R ₂
1 vs 3	52.71-44.82=7.89	7.89 < 34.29	R ₃
1 vs 4	52.71-47.84=4.87	4.87 < 32.48	R ₂
4 vs 3	47.72-44.82=3.02	2.90 < 32.48	R ₂

Las comparaciones obtenidas de la tabla 7 muestran que las diferencias entre las medias comparadas son menores que el intervalo mínimo significativo (tercera columna), infiriendo que ninguna diferencia observada es mayor que el intervalo mínimo significativo. Lo anterior implica que no existen diferencias significativas entre las medias obtenidas experimentalmente del coeficiente de sorción K_{oc} para los 5 suelos estudiados.

Finalmente se estudio gráficamente la dependencia de la adsorción del diesel con la materia orgánica presente en la matriz del suelo, como lo muestra gráfica 1, donde se describe las medias obtenidas de los valores de K_d y f_{oc} , tabla 8.

Tabla 8. Valores medios de K_d y f_{oc} .

Table 8. Means values of K_d and f_{oc} .

f_{oc}	K_d (mL/g)
1.241	0.7667
0.3084	0.1667
1.892	0.8333
0.944	0.45
2.5267	1.3333

En la gráfica 1 se observa claramente la dependencia de la adsorción del diesel, ya que a una magnitud mayor de f_{oc} , se presenta un valor más alto del coeficiente de distribución K_d .

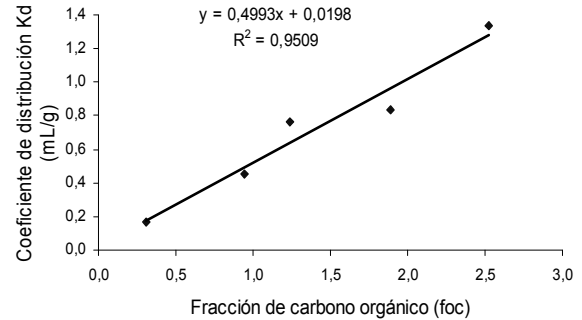


Figura 1. K_d del diesel como función de la fracción de carbono orgánico. f_{oc} .

Figure 1. K_d of diesel how function of the fraction of organic carbon f_{oc} .

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La isoterma de adsorción aplicada para todos los suelos fue igual. Todas las isotermas presentaron linealidad y estuvieron en congruencia con el modelo aplicado. La ecuación de Freundlich representó adecuadamente las isotermas de los 5 suelos estudiados lo cual es similar a lo reportado en otros trabajos (Karickhoff, 1978, Schwarzenbach, 1993, Schnoor, 1996, Deutsch, 1997, Iturbe y Silva, 1992). Todos los K_d se determinaron con el modelo lineal escogido. El contenido de materia orgánica presente en la matriz del suelo favorece la adsorción de los compuestos hidrofóbicos, donde se observó que a una f_{oc} mayor el coeficiente de distribución K_d presentó una magnitud más alta como se ha reportado en otros estudios (Karickhoff, 1978, Schwarzenbach, 1993, Schnoor, 1996, Deutsch, 1997, Chiou, 1983, García Navarrete, 1996, Iturbe y Silva 1992). El intervalo obtenido para el coeficiente de sorción K_{oc} (44.82 a 55.62 mL/g) viene del análisis estadístico el cual respalda su utilización al determinar que la media de los valores hallados son congruentes y

no presentan diferencia como lo demostró el análisis de varianza y la prueba de intervalos múltiples de Duncan. La ecuación $K_d=f_{oc} K_{oc}$ presentó un desempeño satisfactorio ya que los K_{oc} obtenidos y analizados estadísticamente fueron coherentes e igualmente el método aplicado para la determinación de la f_{oc} . Finalmente se puede concluir que el método usado es económico y de fácil aplicación.

5. AGRADECIMIENTOS

Doctora Rosario Iturbe del Instituto de Ingeniería de la UNAM y al M.Sc. José Luis Orantes por la información suministrada de los suelos analizados (Tampico y Valle de Mezquital respectivamente) y los recursos para realizar el estudio.

REFERENCIAS

- [1] CHIOU, CARY T., PORTER, PAUL E. AND SCHMEDDING, DAVID W. Partition equilibria of nonionic organic compounds between soil organics matter and water. *Environ. Sci. Technol.* Vol. 17, No. 4, pp. 227-231. 1983.
- [2] CARDONA, S. Tratamiento de hidrocarburos con un sistema de barrera reactiva permeable. Tesis de Doctorado. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 2004.
- [3] DEUTSCH, WILLIAM J. Groundwater geochemistry: fundamentals and applications to contamination. Lewis Publisher. New York. 1997.
- [4] GARCÍA NAVARRETE, GILBERTO. Evaluación de parámetros de adsorción de compuestos orgánicos halogenados (TCE y PCE) en diferentes tipos de suelos. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado de la UNAM. México, D.F. 1996.
- [5] ITURBE ARGÜELLES., ROSARIO. Y SILVA MARTÍNEZ., ANA. E. Agua subterránea y contaminación. Series del Instituto de Ingeniería, No. 539. UNAM. 1992.
- [6] KARICKHOFF, SAMUEL W., BROWN, DAVID S. AND SCOTT TRUDY A. Sorption of hydrophobic pollutants an natural sediments. *Water Research.* Vol. 13, pp. 241-248. 1979.
- [7] MONTGOMERY, DOUGLAS C. Diseño y análisis de experimentos. 589 paginas. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D.F. 1991.
- [8] SCHNOOR, JERALD L. Environmental modeling: fate and transport of pollutants in water, air and soil. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1996.
- [9] SCHWARZENBACH, RENÉ P., GSCHWEND, PHILIP M. AND IMBODEN, DIETER M. Environmental organic chemistry. Pgs. 681. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1993.
- [10] WEBER, WALTER J. AND SMITH EDWARD H. Simulation and design models for adsorption processes. *Environ. Sci. Technol.* Vol. 21, No. 11, pp. 1040-1048. 1987.
- [11] WEBER, WALTER J., MCGINLEY, PAUL M. and KATZ, LYNN E. Sorption phenomena in subsurface systems: Concepts, models and effects on contaminant fate and transport. *Water Research.* Vol. 25, No. 5, pp. 449-528. 1991.
- [12] WEBER, WALTER J., MCGINLEY, PAUL M. AND KATZ, LYNN E. A distributed reactivity models for sorption by soils and sediments. Conceptual basis and equilibrium Assessments. *Environ. Sci. Technol.* Vol. 26, No. 10, pp. 1955-1962. 1992.