
CONCENTRACIÓN RESIDUAL DE HIDROCARBUROS EN SUELO DEL TRÓPICO. I: CONSIDERACIONES PARA LA SALUD PÚBLICA Y PROTECCIÓN AL GANADO

RANDY H. ADAMS y FERNANDO MORALES-GARCÍA

RESUMEN

En este trabajo se evalúan algunos de los factores más importantes con respecto a los criterios de saneamiento de suelo en un ambiente tropical rural, incluyendo el transporte de hidrocarburos del suelo a la planta, la ingesta de suelo contaminado por ganado, y el consumo de alimentos de origen vegetal y animal producidos

en estos sitios. Los resultados permiten afirmar que los hidrocarburos característicos de una fracción residual, o bien no son asimilados por las plantas o su incorporación es insignificante. De igual manera, el riesgo para el ganado o los consumidores de alimentos producidos en estos suelos es sumamente bajo.

La utilización del riesgo como criterio para la remediación y recuperación de sitios contaminados con hidrocarburos ha experimentado un desarrollo significativo en las últimas décadas. Se han publicado excelentes trabajos relacionados con el uso del riesgo para la estimación de los límites de remediación en áreas urbanas de uso industrial, comercial y residencial (EPA, 1996; ASTM, 1995). La mayoría de estos trabajos han sido realizados para economías desarrolladas, típicamente en climas templados. De igual manera, muchas de las tecnologías de estabilización han sido evaluadas en base al riesgo para suelos de sitios urbanos (Al-Tabbaa y Evans, 2003).

Sin embargo, una proporción considerable (20%) de la producción petrolera mundial proviene de regiones tropicales (World Oil, 2007) y casi toda esta producción se origina en áreas rurales o costa afuera. Para la mayoría de estas áreas, apenas se ha comenzado el desarrollo de criterios ambientales de recuperación. Para que estos criterios sean

efectivos se necesita prestar especial atención a los aspectos característicos de las zonas rurales en el trópico.

El presente trabajo tiene como objetivo la estimación de concentraciones aceptables de hidrocarburos residuales, así como otros criterios de recuperación, para suelos de uso agrícola y pecuario en regiones tropicales.

Translocación de Hidrocarburos en Plantas

Una de las preocupaciones comunes en las comunidades agrícolas consiste en la creencia que las plantas que crecen en suelos con alguna concentración residual de hidrocarburos no pueden ser utilizadas para el consumo humano o animal. Para evaluar esta afirmación es necesario determinar el potencial de migración de los hidrocarburos desde el suelo hacia el interior de las plantas. Dos estudios (Briggs *et al.*, 1982; Burken y Schnoor, 1998) han evaluado la

migración de contaminantes orgánicos en plantas, uno de ellos en monocotiledóneas (como el maíz, arroz, caña de azúcar, etc.) y otro en dicotiledóneas (como los árboles frutales, tomates, chiles, etc.). Los resultados variaron ligeramente según la especie; sin embargo, fue posible observar dos tendencias generales, las cuales se discuten a continuación.

La concentración de los compuestos orgánicos en las raíces fue medida con respecto a la concentración de cada compuesto en la humedad del suelo. Este término se denominó 'factor de concentración en la raíz' o FCR (*root concentration factor*, RCF, en inglés), donde

$$FCR = \frac{\text{Concentración de compuesto X en la raíz}}{\text{Concentración de compuesto X en la humedad del suelo}}$$

Se encontró que el FCR es proporcional al coeficiente de partición octanol/agua (K_{ow} , del inglés). El K_{ow} es un indicador de la polaridad de un compuesto y su afinidad relativa

PALABRAS CLAVE / Bioconcentración / Contaminación / Hidrocarburos / Riesgo Ambiental / Suelos / Translocación /

Recibido: 27/09/2007. Modificado: 26/05/2008. Aceptado: 28/05/2008.

Randy H. Adams. B.Sc. en Microbiología, University of Washington, Seattle, EEUU. Ph.D. en Edafología, University of California-Riverside, EEUU. Profesor-Investigador, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), México. Dirección: Km 0.5 Carretera Villahermosa-Cárdenas, Villahermosa, Tabasco, México, CP 86104. e-mail: drrandocan@hotmail.com

Fernando A. Morales García. Licenciado en Química, y M.Sc. en Ciencias Biológicas, Universidad Simón Bolívar (USB), Venezuela. Profesor, USB, Venezuela. e-mail: fmoral@usb.ve

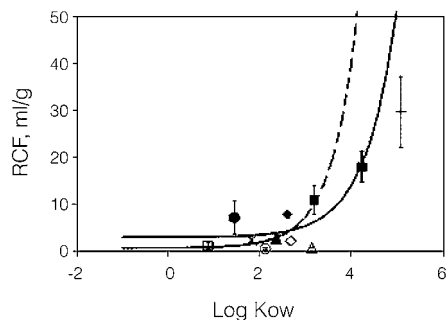


Figura 1. Factor de concentración en la raíz (RCF) de sustancias orgánicas vs logaritmo del coeficiente octanol/agua (Kow). Reimpreso con permiso de Burken y Schnoor (1998). Copyright (1998) American Chemical Society.

por el agua en comparación con sustancias orgánicas. Un K_{ow} bajo indica que la sustancia en cuestión tiene relativamente alta polaridad, mientras un valor alto de K_{ow} indica muy baja polaridad.

Los resultados obtenidos en estos estudios indican que los compuestos menos polares (K_{ow} más alto), fueron más fuertemente adsorbidos y/o absorbidos por la raíz, tal como se muestra en la Figura 1, donde la línea sólida representa la relación entre polaridad ($\log K_{ow}$) y FCR en dicotiledóneas (Burken y Schnoor, 1998), mientras la línea punteada representa resultados obtenidos previamente en monocotiledóneas por Briggs *et al.* (1982). Como se desprende de la figura, los compuestos orgánicos con un valor de $\log Kow$ superior a 3-4, son fuertemente ligados por las raíces.

La segunda tendencia observada se relaciona con la migración desde la humedad del suelo hasta las estructuras superiores de la planta. Esta migración fue medida mediante el 'factor de concentración en la corriente de transporte' o FCCT (*transport stream concentration factor*, TSCF, en inglés), donde

$$FCCT = \frac{\text{Concentración de compuesto X en el xilema}}{\text{Concentración de compuesto X en la humedad del suelo}}$$

siendo el xilema el líquido que transporta humedad y nutrientes desde las raíces a las partes superiores de las plantas.

La relación entre el FCCT y el coeficiente K_{ow} de las sustancias orgánicas, se presenta en la Figura 2. Se puede apreciar que los compuestos con un valor de $\log K_{ow}$ en el intervalo de 1 a 4 se concentraron apreciablemente en las estructuras superiores de las plantas, mientras que los compuestos menos polares ($\log K_{ow} > 5$) se movilizaban muy poco a dichas estructuras.

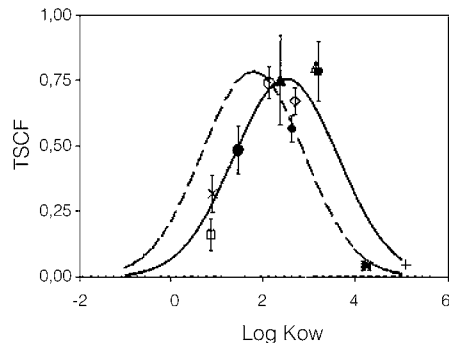


Figura 2. Factor de concentración en la corriente de transporte (TSCF o FCCT) vs logaritmo del coeficiente octanol/agua (Kow). Reimpreso con permiso de Burken y Schnoor (1998). Copyright (1998) American Chemical Society.

En la Figura 2 la línea sólida representa la relación entre la polaridad ($\log K_{ow}$) y el FCCT en dicotiledóneas (Burken y Schnoor, 1998) y la línea punteada representa la relación encontrada en monocotiledóneas por Briggs *et al.* (1982). La extrapolación de las relaciones representadas en la Figura 2 indica que prácticamente no hay translocación para compuestos con un valor de $\log K_{ow} > 6$.

Coefficientes de Partición para Hidrocarburos Residuales

Para determinar si los hidrocarburos residuales en el suelo pueden migrar a las plantas, es necesario disponer de un estimado de sus coeficientes de partición, K_{ow} . El departamento de protección ambiental del estado de Wyoming, EEUU (WEDQ, 2003) ha publicado coeficientes que miden la partición de hidrocarburos del intervalo del diesel entre la humedad del suelo y el carbono orgánico del suelo (en forma de material húmico). La Tabla I, muestra estos coeficientes de partición humedad del suelo/carbono orgánico (K_{oc}).

En ambientes tropicales o semi-tropicales, o en derrames más viejos en ambientes templados, los compuestos más ligeros de la lista de la Tabla I muy probablemente habrán desaparecido por volatilización. Entre los compuestos que se volatilizarían se encuentran los alquilarmáticos y los naftalenos. Estas consideraciones también se aplican a sitios en los que se haya realizado labores de remediación o recuperación del suelo. En algunos ambientes, dependiendo de la edad del derrame y las condiciones del suelo, la mayoría de los n-alcanos más ligeros también pueden desaparecer como conse-

cuencia de la volatilización y la biodegradación.

La evaluación, entonces, del transporte de hidrocarburos hacia las plantas es importante para aquellos hidrocarburos remanentes en el suelo. Los edafólogos han encontrado una relación empírica entre los valores de K_{oc} y K_{ow} que puede ser empleada para transformar valores de K_{oc} a valores de K_{ow} (Bohn *et al.*, 2001):

$$\log K_{oc} = 0,99 \log K_{ow} - 0,34$$

Para los propósitos del presente trabajo, se seleccionó el n-decano, compuesto representativo de los hidrocarburos de intervalo medio pero con un K_{oc} bajo en comparación con los otros compuestos de la lista. De esta forma, la evaluación del transporte resulta sumamente conservadora.

Para el n-decano, el $K_{oc} = 857038$, y el K_{ow} correspondiente = 2169520, con el $\log K_{ow} = 6,34$. Estos valores son similares a los encontrados por otros investigadores (Gustafson *et al.*, 1997), quienes reportan un $\log K_{oc} = 5,4$ correspondiente a un $\log K_{ow}$ de 5,8 para hidrocarburos alifáticos con un intervalo de carbono equivalente (CE) a 10-12. Para hidrocarburos alifáticos con un intervalo de carbono equivalente a 12-16 el $\log K_{ow}$ reportado fue de 7,1. Para la mayoría de hidrocarburos del intervalo medio y pesado, los valores de $\log K_{ow}$ son de uno a varios órdenes de magnitud superiores.

Siembra con Fines Agrícolas y Pastoreo en Suelos con Hidrocarburos Residuales

En general se considera que el perfil superficial de suelo, correspondiente a una profundidad 0 a 30cm, donde se encuentra el mayor volumen de raíces, es el de mayor importancia para el rendimiento de la mayoría de los cultivos económicamente significativos (Porta *et al.*, 1999). Sin embargo, en algunas áreas dedicadas al cultivo de ciertos árboles frutales (cítricos, mango, aguacate, pimienta, etc.) las condiciones en el suelo hasta 1-1,5m de profundidad pueden influir en el rendimiento del cultivo. Debajo de la zona donde se encuentra la mayor parte de las raíces, las condiciones del suelo prácticamente no influyen en los cultivos, por lo que la presencia de hidrocarburos a mayor profundidad no es de importancia agrícola, aunque puede influir en la calidad del agua subterránea. Por estas razones, es importante diferenciar entre el suelo superficial (usado por los cultivos) y el subsuelo (no utilizado por los cultivos). La

TABLA I
COEFICIENTES DE PARTICIÓN HUMEDAD DEL SUELO/CARBONO
ORGÁNICO (K_{oc}) PARA HIDROCARBUROS EN EL INTERVALO DEL DIESEL*

Tipo de compuestos	Nº carbonos	Compuesto	% masa	K_{oc} **	%Peso x (K_{oc})
n- Alcanos	10	n- Decano	1,7	857038	1456965
	11	n- Undecano	7,7	4197590	32321443
	12	n- Dodecano	2,5	5500000	13750000
	13	n- Tridecano	5	17906059	89530295
	14	n- Tetradecano	2,7	7638358	20623567
	15	n- Pentadecano	3,1	205589060	637326086
	16	n- Hexadecano	1,5	85703785	128555678
	17	n- Heptadecano	2,9	236047823	684538687
	18	n- Octadecano	2	1006931669	2013863338
	19	n- Nonadecano	1,5	26485001390	39727502085
20	n- Eicosano	1	89742879450	89742879450	
Alquil-aromáticos	10	n- Butilbenceno	0,038	8770	333
	10	Tetrametilbenceno	1,1	5284	5812
	12	Trietilbencenos	1,6	81846	130954
	14	Octilbenceno	0,61	1054387	643176
Alcanos ramificados	11	Metildecano	1,4	1156112	1618557
	12	Metilundecano	1,7	2904023	4936839
	13	Dimetilundecano	2	9840111	19680222
	13	Metildodecano	0,52	1156112242	601178366
	14	Metiltridecano	0,3	1156112242	346833673
15	Metiltetradecano	0,63	1156112242	728350712	
Cicloalcanos	10	n-Butilciclohexano	0,74	138995	102856
	12	Hexilciclohexano	0,93	1595879	1484167
	12	Fenilciclohexano	0,87	47098	40975
	13	Heptilciclohexano	1	6353309	6353309
Naftalenos	10	Naftaleno	0,8	962	770
	11	Metilnaftalenos	2,8	3570	9996
	12	Dimetilnaftalenos	3,2	9840	31488
	12	Etilnaftalenos	0,2	12106	2421
	13	Trimetilnaftalenos	0,4	48195	19278
Aromáticos Polinucleares	14	Antraceno	0,001	13500	14
	14	Naftenobencenos	9,8	24155	236719
	14	Fenantreno	0,3	17906	5372
	15	Metilfenantrenos	0,8	66527	53222
	16	Dimetilfenantrenos	0,09	66527	5987
	16	Pireno	0,015	36580	549
	18	Criseno	2,2	363245	799139
20	Benzo(a)pireno	0,0004	554240	222	

Tomado de WDEQ (2003).

* Compuestos orgánicos del intervalo de diesel según la definición de la ASTM. C10 a C24. Todos los demás hidrocarburos en este intervalo son <0,1% en masa.

** Este coeficiente de partición, K_{oc} , se define como

$$K_{oc} = \frac{\text{Concentración de compuesto X en el carbono orgánico del suelo}}{\text{Concentración de compuesto X en la humedad del suelo}}$$

siguiente discusión se enfoca en el uso de suelos superficiales de importancia para la agricultura y el pastoreo.

La baja polaridad de los hidrocarburos residuales (valores de K_{ow} altos) y la relación entre la polaridad de compuestos orgánicos y su asimilación y transporte en plantas observada por Burken y Schnoor (1998) y por Briggs *et al.*, (1982), permiten afirmar que prácticamente no son transportados a los tejidos superiores de las plantas (tallos, hojas y frutos). Otros investigadores también han reconocido la ausencia casi completa

de fitoacumulación de hidrocarburos residuales en las estructuras superiores de las plantas, considerándola incluso como insignificante (CCME, 2008). En trabajos experimentales se ha observado que menos del 0,007% de los hidrocarburos residuales en el suelo son transportados a las plantas (Angern *et al.*, 1999). Por tales razones, los sitios en donde el suelo aun contiene hidrocarburos residuales del intervalo medio (y pesado), pueden ser utilizados con seguridad para el cultivo de pastizales, gramíneas, frutas, bambú y otras hortalizas y verduras producidas en

estructuras superiores de las plantas, tales como el tomate, chile, maíz, melón, sandía, piña, etc.

Aunque los hidrocarburos del intervalo medio y pesado no son transportados a las estructuras superiores de las plantas, sí son adsorbidos abundantemente por las raíces. Debido a este fenómeno, en suelos superficiales que aún contienen estos tipos de hidrocarburos puede haber restricciones para el cultivo de ciertos tubérculos que son consumidos sin pelarlos o removerles la cáscara (p.ej. camote o zanahorias).

Sin embargo, la mayoría de los tubérculos pueden ser cultivados con seguridad en sitios con hidrocarburos residuales de rango medio y pesado. Ello se debe a que estos hidrocarburos no pasan de la superficie de la raíz al interior de la planta sino que quedan en las capas exteriores de los tubérculos. En estos cultivos (cebolla, maní y yuca o manioca), las capas exteriores del tubérculo son removidas antes de ser consumido. Cabe recalcar que las restricciones para el cultivo de tubérculos solo aplican cuando el suelo superficial (0-30cm o zona de acumulación de raíces) contiene hidrocarburos. Si los hidrocarburos solo se presentan a mayor profundidad (>30cm), entonces se pueden cultivar de forma segura hasta aquellos cultivos de cáscara muy fina (camote, zanahoria).

Pastoreo e Ingestión de Suelo por el Ganado

Como se señala en el párrafo anterior, los hidrocarburos de rango medio y pesado no son transportados a las estructuras superiores de las plantas, incluyendo los pastos. Por esta razón el consumo de pasto en suelos con estos hidrocarburos no representa un riesgo para el ganado. No obstante, existe otra ruta de exposición que es necesario considerar. El ganado ingiere suelo cuando procura su forraje. Ello puede ocurrir accidentalmente debido a que existen partículas de suelo adheridas a la superficie del pasto o de forma deliberada, con la finalidad de obtener sales esenciales presentes en el suelo (Zach y Mayoh, 1984). Con el propósito de estimar los límites de saneamiento de suelos en base al riesgo, la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, 1994) ha estimado las tasas de consumo de suelo para diferentes tipos de ganado. Por ejemplo, se estima que el ganado bovino para producción de carne ingiere una masa de suelo equivalente a ~6% de su ingesta diaria. Para el ganado ovino esta tasa es ~10% y para el ganado caprino está entre ~2 y 10%, dependiendo de sus hábitos de pastoreo (IAEA 1994; ORNL, 2005).

Para estimar el riesgo que representa el consumo de suelo con hidrocarburos para el ganado, es necesario conocer la toxicidad de los hidrocarburos para el animal, así como su tasa de ingesta de suelo. Pattanayek y DeShields (2003) estimaron el riesgo para el ganado por la ingesta de suelo, basados en estudios previos de toxicidad del petróleo en estos animales. En este estudio se desarrolló una dosis de referencia DRf, (*reference dose*; RfD) de petróleo para el ganado, estimada de tal manera que no causa efectos adversos. Esta dosis, de 211mg de petróleo por kg de masa del ganado bovino por día, fue obtenida a partir del trabajo de Stober (1962) y de las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de EEUU para convertir los LOAEL (*low observable adverse effects level* o nivel para el que se observan bajos efectos adversos) a NOAEL (*no observable adverse effects level* o nivel para el que no se observan efectos adversos; Edwards *et al.*, 1997).

Una dosis de referencia como la señalada anteriormente representa la cantidad de un compuesto que un animal (o persona) puede ingerir sin que existan efectos adversos por esta razón. Si la dosis de referencia es muy baja, significa que la ingestión de cantidades por arriba de este valor, aunque sean muy bajas, podrían provocar efectos adversos y que el compuesto es intrínsecamente muy tóxico. Por el contrario, si la dosis de referencia es muy alta, significa que se puede ingerir cantidades significativas del compuesto sin que se presenten efectos dañinos. En este caso la toxicidad intrínseca del compuesto sería muy baja. En otras palabras: para DRf alta= toxicidad baja y para DRf baja= toxicidad alta.

Usando el valor de DRf de 211mg TPH/kg/día, en conjunto con la tasa de ingestión de pasto por el ganado bovino (2,5-2,75% del peso corporal; Tobías, 1997; Lyons *et al.*, 1999), se puede

calcular la concentración máxima de hidrocarburos en el suelo de tal forma que no se rebase el límite de protección considerado seguro para el ganado:

Concentración máxima de TPH en el suelo = [(DRf)(PC)]/(TIS)

donde TPH: hidrocarburos totales del petróleo (*total petroleum hydrocarbons*), DRf: dosis de referencia (211mg TPH/kg de peso corporal/día), PC: peso corporal del animal (~500kg para ganado bovino para carne), y TIS: tasa de ingestión de suelo calculada como

$$TIS = 100 \times \frac{\text{proporción de suelo en ingesta}}{\text{en ingesta}} \times \text{ingesta}$$

donde la proporción de suelo en ingesta= 0,06 (6% de ingesta) e ingesta= 2,75% de peso corporal (0,0275x500kg).

Estos cálculos resultan en TIS= 0,825kg de suelo/día para un animal con un peso corporal de 500kg, y una concentración máxima de TPH en el suelo de 127879mg TPH/kg de suelo, en base a peso seco de suelo.

Este resultado es muy conservador y protector para el ganado porque supone que el animal pastorea 100% del tiempo en el área con la concentración residual de hidrocarburos que se ha estimado. Si solo pastorea una parte del tiempo, p. ej. 50%, el valor estimado debe de ser corregido utilizando un factor de uso del suelo (FUS), en este caso de 0,5 (PADEP, 1998; TNRCC, 2001). Ello significaría un valor límite del doble del estimado inicialmente, es decir de cerca de 256000mg TPH/kg suelo.

Se pueden realizar cálculos similares para ovejas y cabras, obteniendo valores para la concentración máxima de TPH en el suelo de 60286mg TPH/kg suelo para ovejas, y de 52750 a 263750mg TPH/kg suelo para cabras, dependiendo de sus hábitos

de pastoreo en cada sitio particular, tal como se describe en la Tabla II. Como se puede apreciar de estos cálculos, la mayoría de los sitios con alguna concentración residual de hidrocarburos no representan riesgo para la salud del ganado. Solo en aquellos sitios con concentración de TPH superior a 50000mg/kg y con pastoreo intensivo de ovejas o cabras, se podrían presentar limitaciones a la ganadería.

Por otra parte, es necesario recalcar que los niveles calculados por este método y presentados en la Tabla II son muy conservadores, ya que están basados en

1) Una dosis de referencia utilizando petróleo crudo; sin embargo en áreas con derrames viejos o en sitios remediados, normalmente no se encuentran las fracciones ligeras de hidrocarburos, (que también son las más tóxicas). En realidad, los hidrocarburos correspondientes a las fracciones residuales normalmente presentan muy baja toxicidad (Alexander, 1999).

2) La dosis de referencia fue calculada utilizando lineamientos muy conservadores de la EPA para estimar el nivel para el que no se observan efectos adversos (NOAEL) a partir del nivel experimental en el que se observa algún efecto adverso mínimo (LOAEL). Por esta razón el NOAEL real puede ser mucho mayor que el nivel estimado en este trabajo, lo cual equivale a decir que el petróleo sería mucho menos tóxico que lo que se ha supuesto aquí.

Por las razones anteriores y considerando principalmente la baja toxicidad de las fracciones residuales del petróleo, es probable que un valor más realista de la dosis de referencia para TPH residual, se encuentre en el orden de 2 a 10 veces por arriba del valor estimado. Esto indica que es muy poco probable que los hidrocarburos residuales signifi-

TABLA II
DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE HIDROCARBURO RESIDUAL EN EL SUELO PARA LA PROTECCIÓN DEL GANADO POR PASTOREO

Tipo de ganado	Promedio de peso corporal (PC)	Biomasa vegetal consumida por día	Ingestión de suelo/día	Factor de uso del suelo	Concentración máxima de hidrocarburo residual
Bovino	500kg	2,75% de PC= 13,75kg	6% de biomasa ingerida= 0,825kg	1 (100%)	127879mg TPH/kg suelo
				0,5 (50%)	255758mg TPH/kg suelo
Ovino	56,7kg	3,5% de PC= 1,98kg	10% de biomasa ingerida= 0,198kg	1 (100%)	60286mg TPH/kg suelo
				0,5 (50%)	120572mg TPH/kg suelo
Caprino	29,5kg	4% de PC= 1,18kg	2% de biomasa ingerida= 0,0236kg (nota: pasto y hierba como forraje)	1 (100%)	263750mg TPH/kg suelo
			10% de biomasa ingerida= 0,118kg (nota: pasto como forraje, principalmente)	1 (100%)	52750mg TPH/kg suelo

quen un riesgo significativo para la salud del ganado.

Estimación del Riesgo al Consumidor de Productos Animales

Para evaluar el riesgo potencial para los consumidores de carne y leche producida en sitios donde el suelo superficial contiene contaminantes orgánicos, se ha desarrollado un método capaz de estimar la transferencia de los compuestos orgánicos contaminantes desde el suelo a la carne o a la leche (Travis y Arms, 1988; EPA, 1993; ORNL, 2005). Este factor, denominado 'factor de biotransferencia' (FBT o *biotransfer factor*; BTF), se define como la proporción de un contaminante en el tejido del animal con respecto a la ingesta diaria de este contaminante por parte del animal, tanto en su alimento como en el suelo. Si se calcula la cantidad del contaminante que el animal ingiere, comúnmente en forma de suelo contaminado con TPH, se puede estimar la concentración de este contaminante en la carne o leche producida según la relación

$$FBT = \frac{\text{mg de contaminante X/kg tejido, peso fresco}}{\text{mg contaminante X ingerido/día}}$$

La relación entre el FBT y el carácter lipofílico del contaminante orgánico ha sido determinada experimentalmente para muchos compuestos en la carne y leche de ruminantes (Travis y Arms, 1988; ORNL, 2005). La tendencia general es que el valor del FBT sea mayor para los compuestos menos polares o más lipofílicos (mayores valores de K_{ow}). Sin embargo, una evaluación cuidadosa de los resultados muestra que por arriba de un valor de K_{ow} de $\sim 10^6$ ($\log K_{ow} > 6$), la biotransferencia no se incrementa sino que alcanza un valor máximo de FBT de 0,05-0,06.

Esto se debe probablemente a la muy baja absorción intestinal de este tipo de compuesto. En este sentido, estudios realizados en ratas muestran que los hidrocarburos de muy baja polaridad y por lo tanto muy lipofílicos, con valores de K_{ow} entre 10^6 y 10^9 , tienen tasas de absorción intestinal de 0-4% (Smith *et al.*, 1996; Edwards *et al.*, 1997).

Una vez determinando el FBT para un contaminante en particular, en este caso para los hidrocarburos característicos de un aceite residual, se puede multiplicar por la tasa de ingestión del suelo del ganado, para generar un 'factor de bioconcentración'

(FBC; *bioconcentration factor*, BCF). El FBC es la concentración relativa de un contaminante en la leche o carne del ganado con respecto a su concentración en el suelo:

$$FBC = \frac{\text{mg de contaminante X/kg carne}}{\text{mg de contaminante X/kg suelo}}$$

entonces, para un contaminante X= TPH, resulta

$$FBT \times \text{Tasa de ingestión del suelo} = \frac{\text{mg TPH/kg carne}}{\text{mg TPH/día}} \times \frac{\text{kg suelo}}{\text{día}} = \text{fracción de la dieta de carne} \text{ conocida como 'meat diet fraction'}, \text{ así como el tiempo relativo en que el ganado pastorea en el área con aceite residual con respecto a otras áreas (factor de uso de suelo mencionado en la sección anterior).}$$
$$= \frac{\text{mg TPH/kg carne}}{\text{mg TPH/kg suelo}} = FBC$$

Por ejemplo, al utilizar la tasa de ingestión de suelo para el ganado bovino calculada en la sección anterior (0,825kg suelo/día) y el valor máximo del FBT de 0,06 el factor de bioconcentración sería de 0,0495, es decir de aproximadamente 5%. Esto significa que bajo estas condiciones (hidrocarburos residuales de muy baja polaridad, pastoreo del ganado bovino para producción de carne únicamente en el área con aceite residual) la concentración de hidrocarburos que se espera encontrar en la carne sería aproximadamente el 5% de la concentración en el suelo.

Para completar el cálculo, es necesario determinar cuánta carne o leche consume la población, así como la dosis de referencia para estos tipos de compuestos en seres humanos. Para muchas poblaciones rurales en regiones tropicales, las tasas de consumo de carne y leche son bajas (el pescado y legumbres representan sus fuentes principales de proteínas). Tal es el caso del sudeste tropical de México. En esta región se ha encontrado que el consumo promedio de carne de res es de 18 a 46g por persona por día, mientras que el consumo de leche es casi nulo (UJAT, 2005).

Por otra parte, las dosis de referencia para diferentes tipos de hidrocarburos han sido estimadas a partir de la revisión de diferentes estudios toxicológicos (Edwards *et al.*, 1997). Estas tienden a ser más altas (corresponden a menor toxicidad) en las fracciones más intemperizadas del petróleo, tales como las que se encuentran en las fracciones residuales del mismo. Para seres humanos las dosis de referencia correspondientes a estas fracciones están en el orden de 2mg TPH/kg peso corporal/día.

Estos factores (DRf, tasa de consumo de carne y FBC) pueden ser combinados para calcular una concentra-

ción máxima recomendable en el suelo. Empleando la dosis de referencia se puede determinar la concentración de aceite que puede quedar en el suelo de tal forma que al consumir carne o leche no se presenten efectos adversos en el consumidor. Para esta estimación es necesario agregar algunos factores que pueden modificar la exposición del consumidor, tales como la proporción de carne consumida proveniente del área con aceite, conocida como 'fracción de la dieta de carne' (*meat diet fraction*), así como el tiempo relativo en que el ganado pastorea en el área con aceite residual con respecto a otras áreas (factor de uso de suelo mencionado en la sección anterior).

La combinación de todos estos factores para obtener la 'concentración máxima en el suelo' (CMS) se lleva a cabo en la fórmula

$$CMS = (DRf \times PC) / FBC \times TIC \times ABS \times FDC \times FUS$$

donde DRf: dosis de referencia del consumidor o dosis por debajo de la cual no se producen efectos adversos (mg/kg/día), PC: peso corporal de la persona consumidora de carne (kg), FBC: factor de bioconcentración ((mg TPH/kg carne)/(mg TPH/kg suelo)), TIC: tasa de ingestión de carne (kg/día), ABS: absorción del compuesto en el intestino de la persona consumidora de carne que generalmente se asume como 1 (100%) a menos que existan datos específicos, FDC: fracción de la dieta de carne o proporción de la carne consumida que es producida en el sitio con aceite residual, FUS: factor de uso del suelo o proporción del tiempo que el ganado pastorea en el suelo con hidrocarburos residuales.

A continuación se presenta un ejemplo donde se utilizan datos típicos para la aplicación de la fórmula anterior en ganado bovino. Los parámetros utilizados son:

Dosis de referencia= 2mg TPH/kg de peso corporal/día: Los TPH corresponden a la fracción de hidrocarburos alifáticos de $C > 17$, característicos de la fracción residual de petróleo en el suelo (Edwards *et al.*, 1997).

Peso corporal= ~60kg, basado en un estudio en comunidades rurales en el sudeste tropical de México (UJAT, 2005).

Factor de bioconcentración= 0,05 según los cálculos presentados en la sección anterior para ganado bovino e hidrocarburos de muy baja polaridad.

Tasa de ingestión de carne= estimación conservadora de 50g de carne/día por

persona (0,050kg carne/día/persona) basada en un estudio en el SE de México (UJAT, 2005).

Absorción= 1, con una estimación conservadora de 100% de absorción intestinal.

Fracción de la dieta de carne: 1, con una estimación conservadora de 100% de carne consumida proveniente del sitio con hidrocarburos residuales.

Factor de uso del suelo= 0,5, con una estimación conservadora de 50% de pastoreo, la cual podría ocurrir en un derrame relativamente grande dentro de una propiedad pequeña en un área en desarrollo.

Utilizando estos factores, la concentración máxima en el suelo fue estimada de forma muy conservadora en 96000mg TPH/kg suelo. Esto significa que si tenemos ganado bovino para producción de carne pastando 50% del tiempo en un suelo con 96000mg de TPH residual por cada kg de suelo, una persona de 60kg que consuma alrededor de 50g de carne diariamente, no sería afectada.

Este valor puede variar de acuerdo con las condiciones de cada sitio. Las variaciones dependen en gran medida de los hábitos de pastoreo de los animales criados en sitios que puedan presentar valores residuales de hidrocarburos. Tales hábitos incluyen la tasa de consumo de suelo durante la procura de forraje y el porcentaje del tiempo en que ello ocurre en la fracción del sitio que contiene hidrocarburos residuales. Así mismo influyen la cantidad de grasa en el tejido animal y el consumo humano de los productos animales.

Los datos utilizados para consumo de carne en este análisis (18-46g/persona/día) han sido tomados de comunidades rurales en el sudeste tropical de México. Estos valores son similares pero un poco más bajo que los niveles de la Comunidad Europea (46,5g/persona/día; FAO, 2001) y mucho más bajos que lo encontrado en países que tienen una cultura del alto consumo de carne, como lo es Argentina, con 173g/persona/día, (SAGPyA, 2007).

Otro tipo de comunidad potencialmente afectada es el de comunidades de cazadores y recolectores que viven en la selva. Para este tipo de comunidad, el consumo de carne puede ser mayor. Sin embargo, estas personas obtienen su alimento de un territorio muy amplio (Diamond, 2005) y la fracción de la dieta de carne (FDC) obtenida de un sitio particular será por consi-

guiente muy baja. Esto reduce su ingesta de carne potencialmente afectada a niveles prácticamente insignificantes.

Por otra parte, es probable que la absorción intestinal de las fracciones intemperizadas de los hidrocarburos sea mucho menor a 1 (100%). Según estudios toxicológicos (Smith *et al.*, 1996) la tasa de absorción intestinal sería tan baja como 0,04 (4%), lo que incrementaría la concentración máxima aceptable 25 veces. Esta consideración se suma a las bajas tasas de consumo de carne y leche, bajos factores de uso de suelo, y fracciones de la dieta de carne más bajas en áreas tropicales. Todo lo anterior, indicaría que la ruta de exposición a los hidrocarburos de los humanos debido al consumo de productos animales, es prácticamente insignificante.

Conclusiones

Los hidrocarburos de las fracciones medias y pesadas, típicos remanentes de un proyecto de remediación o de un período significativo de exposición a la intemperie, o bien no son asimilados por las plantas o su incorporación es insignificante. En los suelos de regiones tropicales con hidrocarburo residual, el riesgo para el ganado o los consumidores de alimentos producidos en estos suelos es sumamente bajo.

Los puntos de atención para la producción de alimentos en suelos superficiales (0-30cm) con hidrocarburo residual en ambientes tropicales son:

– Solo tiene importancia para los cultivos el perfil de suelo donde se ubican las raíces el cual es, en la mayoría de los cultivos, de 0-30cm.

– El riesgo por el consumo de cultivos en suelos con hidrocarburos residuales, incluyendo la mayoría de tubérculos y forrajes, es insignificante.

– Solo el consumo de tubérculos cuyas capas exteriores no sean removidas antes de ser consumidos (p.ej. camote, zanahoria) deben considerarse a efectos del riesgo a humanos.

– El riesgo para el ganado que pastorea en suelos con hidrocarburos residuales es prácticamente nulo. Solo se presentaría un riesgo importante en sitios con concentraciones muy altas en el suelo superficial (>50000mg TPH/kg suelo) utilizados para el pastoreo intensivo de ganado caprino y ovino.

– De igual manera, el riesgo para los consumidores de productos

animales (leche y carne) producidos en sitios con hidrocarburos residuales es mínimo. Solo podría ser de importancia en sitios donde la concentración es aun muy alta en el suelo superficial (>50000mg TPH/kg suelo) y donde además exista pastoreo intensivo de ganado caprino y ovino. En el caso de la ganadería bovina el riesgo es prácticamente nulo.

Aunque los riesgos para el ganado o los consumidores de alimentos producidos en terrenos con concentraciones de TPH es insignificante para sitios con concentraciones <50000mg/kg, esto no asegura que el suelo será productivo. Es posible que los mismos hidrocarburos hayan afectado propiedades del suelo que impacta su fertilidad. Esto es el tema del siguiente trabajo en este mismo número.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Sara McMillen, de Chevron Energy and Technology Company, por su apoyo con fuentes de bibliografía y revisión del trabajo, y a Gerónimo Álvarez Coronel por correcciones en el texto.

REFERENCIAS

- Alexander M (1999) *Biodegradation and Bioremediation* 2ª ed. Academic Press. San Diego, CA, EEUU. 453 pp.
- Al-Tabbaa A, Evans AC (2003) Deep Soil Mixing in the UK: Geoenvironmental Research and Recent Applications. *Land Contam. Reclam.* 11: 1-14.
- ASTM (1995) *Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, EEUU. (www.astm.org/Standards/E1739.htm). 53 pp.
- Angern D, Schlupe M, Gälli R, Zeyer J (1999) Movement and Fate of Residual Mineral Oil Contaminants in Bioremediated Soil. *Env. Toxicol. Chem.* 18: 2225-2231.
- Bohn HL, McNeal BL, O'Connor GA (2001) *Soil Chemistry*. 3ª ed. Wiley. Nueva York, NY, EEUU. 303 pp.
- Briggs GG, Bromilow RH, Evans AA (1982) Relationships between lipophilicity and root uptake and translocation of nonionized chemicals by barley. *Pest. Sci.* 13: 495-504.
- Burken JG, Schnoor JL (1998) Predictive Relationships for Uptake of Organic Contaminants in Hybrid Poplar Trees. *Env. Sci. Technol.* 32: 3379-3385.
- CCME (2008) *Canada-Wide Standards for Petroleum Hydrocarbons (PHC) in Soil: Scientific Rationale, Supporting Technical Document*. Canadian Council of Ministers of the Environment. (www.ccme.ca/assets/pdf/pn_1399_phc_sr_std_1.1-e.pdf). 412 pp.
- Diamond J (2005) *Guns, Germs and Steel: The Fates of Human Societies*. Norton. Nueva York, EEUU. 512 pp.

- Edwards DA, Andriot MD, Amoruso MA, Tumme AC, Bevan CJ, Tveit A, Hayes LA, Youngren SH, Nakles DV (1997) *Development of Fraction Specific Reference Doses (RfDs) and Reference Concentrations (RfCs) for Total Petroleum Hydrocarbons (TPH)*. Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series, Vol. 4. Association of Environmental Health and Sciences. Amherst, MA, EEUU. (www.aehs.com/publications/catalog/contents/tph.htm). 137 pp.
- EPA (1993) *Water Quality Guidance for the Great Lakes System and Correction; Proposed Rules*. US Environmental Protection Agency. Washington, DC, EEUU. Fed. Reg. 20802-21047. 246 pp.
- EPA (1996) *Soil Screening Guidance: Users Guide*. EPA 540-R-96-018. US Environmental Protection Agency. Washington, DC, EEUU. (www.epa.gov/superfund/resources/soil/ssg496.pdf). 49 pp.
- FAO (2001) *Perspectivas Alimentarias*. N° 3. Departamento Económico y Social. UN Food and Agriculture Organization. Roma, Italia. (www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/004/y0849s/y0849s04.htm). 51 pp.
- Gustafson J, Griffith Tell J, Orem D (1997) *Selection of Representative TPH Fractions Based on Fate and Transport Considerations*. Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series, Vol. 3. Association of Environmental Health and Sciences. Amherst, MA, EEUU. (www.aehs.com/publications/catalog/contents/tph.htm). 102 pp.
- IAEA (1994) *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments*. Technical Report N° 364. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria. 74 pp.
- Lyons RK, Machen R., Forbes T DA (1999) *Understanding Forage Intake in Range Animals*. Texas Agricultural Extension Service. Texas A&M University. EEUU. (http://wildlife.tamu.edu/publications/L5152). 6 pp.
- ORNL (2005) *Guidance for Conducting Risk Assessments and Related Risk Activities for the DOE-ORO Environmental Management Program*. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, TE, EEUU. (http://rais.ornl.gov/homepage/bjcor271/or271.shtml). 32 pp.
- PADEP (1998) *Ecological Screening Process*. Pennsylvania Department of Environmental Protection. Stokton, PA, EEUU. (www.dep.state.pa.us/dep/subject/advoun/cleanup/2001/022201/SectionVEcoScreenProcess.pdf). 11 pp.
- Pattanayek M, DeShields B (2003) Characterizing Risks to Livestock From Petroleum Hydrocarbons. *10th Annu. Int. Environmental Petroleum Conference*. University of Tulsa/Integrated Petroleum Environmental Consortium. (http://ipecc.utulsa.edu/Ipec/Conf2003/Papers/pattanayek_deshields_29.pdf). 16 pp.
- Porta CJ, López-Acevedo RM, Roquero IBC (1999) *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 2ª ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 849 pp.
- SAGPyA (2007) *Beef Market in Argentina, 2007*. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. Argentina. (www.sagpya.meccon.gov.ar/). 24 pp.
- Smith JH, Mallet AK, Priston R AJ, Brantom PG, Worrell NR, Sexsmith C, Simpson BJ (1996) Ninety-day feeding study in Fischer 344 Rats of Highly Refined Petroleum-Derived Food Grade White Oils and Waxes. *Toxicol. Pathol.* 24: 214-230.
- Stober VM (1962) *Vetraglichkeitsprüfungen Mit Roh- und Heizöl an Rindern*. *Deutsche Tierärztliche Wochenschrift* 69: 386-390.
- TNRCC (2001) *Conducting Ecological Risk Assessments at Remediation Sites in Texas*. Texas Natural Resource Conservation Commission. (www.tceq.state.tx.us/comm_exec/forms_pubs/pubs/rg/rg-263.html). 299 pp.
- Tobías B, Mendoza GD, Arjona E, García-Bojalil C, Suarez ME (1997) A simulation model of performance of growing steers grazing in tropical pastures. *J. Anim. Sci.* 1: 75:271.
- Travis CC, Arms AD (1988) Bioconcentration of Organics in Beef, Milk, and Vegetation. *Env. Sci. Technol.* 22: 271-274.
- UJAT (2005) *Estudio de Riesgo Toxicológico de la Presa Agua de Mina, Unidad Minera Textestepec: Evaluación de Riesgo Ambiental*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco - Pemex Gas y Petroquímica Básica. Villahermosa, Tabasco, México. 54 pp.
- World Oil (2007) Industry at a Glance: World Oil & NGL Production. *World Oil* 228(8) 2 pp. (www.worldoil.com/infocenter/statistics_detail.asp?Statfile=_worldoilproduction).
- WDEQ (2003) Cleanup Levels for Total Petroleum Hydrocarbons in Soil and Groundwater. Appendix. In Fact Sheet N°12. *Soil Cleanup Level Look-Up Table Under the Voluntary Remediation Program*. Vol. 5. Wyoming Department of Environmental Quality, Cheyenne, WY, EEUU. (http://deq.state.wy.us/volremedi/factsheets.asp). 44 pp.
- Zach R, Mayoh KR (1984) Soil ingestion by cattle: a neglected pathway. *Health Phys.* 46: 426-430.

RESIDUAL CONCENTRATION OF HYDROCARBONS IN SOIL IN THE TROPICS. I: CONSIDERATIONS FOR PUBLIC HEALTH AND LIVESTOCK PROTECTION

Randy H. Adams and Fernando Morales-García

SUMMARY

In this study several of the most important factors involved in establishing soil restoration criteria for a tropical rural environment were evaluated, including hydrocarbon transport from the soil to the plant, soil ingestion by livestock, and consumption of foods of vegetable or animal origin produced in these sites. The

results confirm that those hydrocarbons typical of the residual fraction in soil are either not assimilated by plants or their incorporation is insignificant. Likewise, the risk to livestock and consumers of foods produced in these sites is extremely low.

CONCENTRAÇÃO RESIDUAL DE HIDROCARBONETOS EM SOLO DO TRÓPICO. I: CONSIDERAÇÕES PARA A SAÚDE PÚBLICA E PROTEÇÃO AO GADO

Randy H. Adams e Fernando Morales-García

RESUMO

Neste trabalho são avaliados alguns dos fatores mais importantes em relação aos critérios de saneamento do solo em um ambiente tropical rural, incluindo o transporte de hidrocarbonetos do solo até a usina, o solo contaminado ingerido pelo gado, e o consumo de alimentos de origem vegetal e animal produzidos

nestes lugares. Os resultados permitem afirmar que os hidrocarbonetos, características de uma fração residual, não são assimilados pelas plantas ou então, sua incorporação é insignificante. De igual maneira, o risco para o gado ou os consumidores de alimentos produzidos nestes solos é sumamente baixo.