

Sección: Concientífica

Las dos caras del secuestro de contaminantes en suelos

The two sides of contaminant sequestration in soil

Marisol Osorio-Torres

Viridiana W. Velázquez-Vázquez*

División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco, México.

**Autor para la correspondencia: viridiana.velazquez@ujat.mx*

RESUMEN

El secuestro de contaminantes es un proceso mediante el cual sustancias como hidrocarburos, antibióticos o pesticidas quedan inmovilizadas por interacciones físicas, químicas y biológicas con la matriz del suelo, lo que reduce su biodisponibilidad. El secuestro es un proceso dinámico que depende del tipo de suelo, del contaminante y de las condiciones ambientales. Este fenómeno puede ser positivo al limitar la dispersión de contaminantes y su ingreso a la cadena trófica, pero también presenta efectos negativos, ya que dificulta su cuantificación y su remediación, y puede modificar la fertilidad del suelo.

Palabras clave: Contaminación, destino ambiental, biodisponibilidad.

SUMMARY

The sequestration of contaminants is a process by which substances such as hydrocarbons, antibiotics, or pesticides become immobilized through physical, chemical, and biological interactions with the soil matrix, reducing their bioavailability. Sequestration is a dynamic process that depends on the type of soil, the nature of the contaminant, and environmental conditions. This phenomenon can be beneficial because it limits the spread of contaminants and their entry into the food chain; however, it can also have negative effects, as it makes contaminants more difficult to quantify and remediate and may alter soil fertility.

Keywords: Soil pollution, sequestration, bioavailability.

Introducción

Cuando caminas en un campo ¿Qué es lo que ves bajos tus pies? Ves a lo que comúnmente se le llama “tierra”, sin embargo, su nombre correcto es suelo. Este es como la piel viva del planeta, una capa delgada que recubre la corteza terrestre que sostiene casi toda la vida y que está compuesta por una mezcla de minerales (arcillas y arena), materia orgánica (lo que proviene de la descomposición de seres vivos), agua, aire y organismos vivos [1].

Sin embargo, durante los últimos años esta piel ha sido herida con emisiones de autos e industrias, desechos de aguas negras y desechos tóxicos que terminan contaminando el suelo.

La contaminación del suelo es un problema generalizado y preocupante, ya que la producción de alimentos depende de su salud. En contraste, el 40% de los suelos del mundo están enfermos; es decir degradados, y más del 75% de la superficie terrestre está afectada por la degradación [1]. Para que los suelos recuperen su salud y sus funciones, es necesario limpiar o disminuir los contaminantes, a lo que se le conoce como remediación.

El suelo es un compartimento de reserva de nutrientes, pero también puede almacenar contaminantes, como antibióticos, hidrocarburos y plaguicidas, los cuales, dependiendo de sus características y de las del suelo, pueden tener diferentes destinos ambientales como: la volatilización, biodisponibilidad, lixiviación, secuestro, degradación o transporte. En este artículo se aborda la doble cara del secuestro de contaminantes en suelos y su relevancia.

¿Por qué algunos contaminantes desaparecen y otros no? El misterio del secuestro de sustancias

Cuando un contaminante entra en contac-

to con el suelo se generan interacciones físicas, químicas o biológicas que determinan cuál será el camino que seguirá el contaminante y dónde terminará, es decir, su destino ambiental, este artículo se enfoca en dos de ellos: el secuestro y la biodisponibilidad. Cuando se habla de que una sustancia (antibióticos, hidrocarburos, entre otros) está secuestrada, significa que se encuentra atrapada en alguna parte del suelo, es decir, está capturada físicamente, por ejemplo, en los microscópicos túneles y poros de un suelo, donde puede permanecer inmobilizado durante mucho tiempo lejos del alcance de plantas, animales o cuerpos de agua. Por otra parte, cuando se habla de biodisponibilidad, la sustancia se encuentra libre (Figura 1), así que puede moverse hacia donde desee y, si la encuentra algún organismo, podría ser consumida por él. Una analogía con videojuegos sería imaginar al organismo como un pacman y a las sustancias como las bolitas que se puede comer. En ese sentido, si la sustancia biodisponible es un contaminante, ésta puede entrar en la cadena trófica, pudiendo afectar la salud humana y/o al medio ambiente.

El mecanismo de secuestro que predomine dependerá de varios factores, principalmente de la composición del suelo y del contaminante. Es importante mencionar que, se habla del suelo como si solo existiera una versión de este; sin embargo, no hay nada más alejado de la realidad, ya que existen 32 grupos de suelo reportados en el mundo por la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo [2] cada uno con características fisicoquímicas particulares. En México se han reportado 26 diferentes tipos de suelo, así, analizarlo es muy diferente a analizar el agua, ya que el suelo no cuenta con una composición definida, sino que se trata de una mezcla heterogénea cuyas características fisicoquímicas dependen de la roca meteorizada que dio lugar a su porción mineral, de las plantas y animales que se descompusieron para formar la materia orgánica, de los microorganismos presentes y de las condiciones ambientales. Así que, si se desea conocer qué tanto de una sustancia específica



Figura 1. Representación esquemática de la biodisponibilidad y el secuestro de contaminantes en el suelo. Elaborada con Chat GPT5.2 de OpenAI.

se secuestra o queda biodisponible en un suelo, hay que realizar el análisis particular para el suelo en cuestión.

Factores que determinan el secuestro de contaminantes

De manera general, son la cantidad y tipo de materia orgánica y de arcillas presentes en los suelos los factores que definen si será secuestrador o no. La característica que comparten tanto las arcillas como la materia orgánica es la carga eléctrica, lo que les permite interactuar con los contaminantes que poseen la carga opuesta. En caso de que el suelo sea arcilloso u orgánico, una vez que los contaminantes entran en contacto con el suelo, se pegan a la superficie de las partículas de arcilla o de la materia orgánica presente en el suelo mediante un proceso conocido como adsorción. Entonces cuando el contaminante tiene contacto

físico en la parte externa de los componentes del suelo, se denomina fisisorción. Por otra parte, algunas sustancias pueden movilizarse a través de los espacios vacíos y entrar en los poros de la materia orgánica del suelo mediante un proceso conocido como difusión, lo que puede dar lugar a la absorción; es decir, los contaminantes se incorporan en la estructura interna del suelo y éste actúa como si fuera una esponja. Cuando esto ocurre, se pueden formar enlaces químicos, estos enlaces actúan como un pegamento fuerte dejando atrapadas las moléculas del contaminante mediante un proceso conocido como quimisorción. Entonces, cuando hay afinidad del contaminante con la materia orgánica o las arcillas sucede el gran misterio, los contaminantes se inmovilizan y quedan retenidos en el suelo, es como si mágicamente desaparecieran porque ya no se pueden extraer ni cuantificar, volviéndose prácticamente invisibles.

El secuestro y sus dos caras

Este planteamiento depende del enfoque desde el que se analice. Una de sus caras, tiene implicaciones positivas (Figura 2), en algunos casos, los contaminantes pueden reaccionar químicamente con los compuestos presentes en el suelo, formando sustancias nuevas que son menos solubles y, por lo tanto, menos biodisponibles. Además, cuando los contaminantes se inmovilizan en el suelo, se reduce su movimiento hacia ríos, lagos o aguas subterráneas evitando que se lixivien en el agua y, en consecuencia, disminuyendo el riesgo de que lleguen a plantas, animales o personas. Cuando un contaminante no está biodisponible, difícilmente entra a la cadena trófica, evitando que el contaminante se acumule (bioacumulación) y se concentre en organismos de eslabones superiores de la cadena alimenticia (biomagnificación) [3]. Lo anterior trae como consecuencia una disminución del riesgo por exposición a sustancias tóxicas.

La otra cara del secuestro tiene aspectos negativos (Figura 2), ya que, una vez que el contaminante se atrapa en el suelo, no es posible extraerlo, ni siquiera utilizando las técnicas especificadas en la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 [4]. Hay varias consecuencias de que los contaminantes secuestrados no sean extraíbles, la primera de ellas es que, al permanecer anclados en el suelo estarán ocupando un espacio dentro de los poros, que, en un suelo no contaminado tendría nutrientes, agua o aire, provocando modificación en las propiedades fisicoquímicas de los suelos como la capacidad de intercambio catiónico, la capacidad de retener agua (capacidad de campo), el potencial de hidrógeno (pH) e inclusive la textura (proporción de arenas, limos y arcillas). La segunda consecuencia de que los contaminantes se secuestren en los suelos es que se vuelven invisibles a la legislación mexicana, esto quiere decir que difícilmente se podrá saber la concentración real de contaminantes en un suelo, ya que, si no se pueden extraer, tam-

poco se pueden cuantificar. Aunado a lo anterior, el fenómeno de secuestro es dinámico, esto quiere decir que se modifica por diversos factores como el potencial de hidrógeno (pH), el área superficial, las cargas de partículas y la humedad del suelo; es decir, si estas propiedades se modifican el contaminante podría liberarse, ocasionando que se lixivie a los mantos acuíferos [5]. Otro de los factores clave a considerar es el tiempo de contacto entre el contaminante y el suelo [6]; así, entre más tiempo pase en ser atendido un derrame, más difícil será extraer los contaminantes de este, subestimando los valores reales de contaminación.

De esta manera, se pueden tener suelos que cumplan con la normatividad vigente en cuanto a límites máximos permisibles de contaminantes, pero que se hayan modificado sus características fisicoquímicas, hayan perdido sus funciones y disminuido su fertilidad, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria.

¿Por qué debería estudiarse el secuestro de contaminantes?

En el mundo de la contaminación ambiental el suelo es una bóveda microscópica que almacena diversos contaminantes, como restos de antibióticos o derivados de petróleo. El secuestro es como poner un contaminante dentro de esta bóveda y la biodisponibilidad es qué es tan capaz es ese contaminante de “escapar” para ser consumido por un ser vivo. Cuando el contaminante secuestrado es un hidrocarburo (diésel, gasolina, petróleo crudo, etc.), se ha observado que los suelos se vuelven hidrofóbicos [7]; es decir, repelen el agua. Por consiguiente, en lugar de retener agua, la rechaza y se pierde el contacto entre el suelo y el agua, impidiendo la liberación de nutrientes para que las plantas los absorban.

Además, otros contaminantes presentes en el suelo, como metales pesados o restos de pesticidas, pueden llegar a los alimentos que se



Figura 2. Comparación estructural de mucinas secretoras y transmembranales.
 A: Mucina secretora. B: Mucina transmembranal. Creada en BioRender.

consumen día a día o filtrarse hacia el agua subterránea, lo que generaría daño a la salud humana, ambiental y animal.

Viéndolo de otra manera, si el suelo fuera una esponja y los contaminantes fueran tinta, al inicio la tinta mancha todo (alta biodisponibilidad). Con el tiempo, la tinta se iría a los rincones más profundos de la esponja y se almacenaría (secuestro): ya no mancha al tocarla (baja biodisponibilidad); sin embargo, si se exprime la esponja (cambio de condiciones), parte de la tinta acumulada saldría de golpe.

Reflexiones sobre el secuestro

Desde una perspectiva ambiental, el se-

cuestro es un fenómeno que contribuye a la protección de los ecosistemas, disminuyendo la biodisponibilidad de los contaminantes y evitando que sustancias tóxicas alcancen ríos, lagos y otros cuerpos de agua. Lo anterior reduce el riesgo de bioacumulación y biomagnificación.

Por otro lado, es importante considerar, que el secuestro de contaminantes en suelos no es una técnica de remediación, sino que dificulta el proceso de limpieza y recuperación de la salud del suelo, ya que el contaminante secuestrado sigue ahí, interfiriendo con las funciones del suelo y poniendo en riesgo la seguridad alimentaria.

Conocer el fenómeno de secuestro de contaminantes en suelos es esencial para asegurar la suficiencia alimentaria, ya que concientizarnos

hará que pensemos dos veces antes de arrojar sustancias al suelo. Hay que tener muy presente que la importancia del suelo se debe a la estrecha relación con la producción de alimentos, el agua potable y la salud de los ecosistemas. Se espera que comprender cómo el suelo puede secuestrar contaminantes y reducir su biodisponibilidad permita valorar su importancia y fomentar prácticas de manejo más responsables y sostenibles.

Glosario

Absorción: proceso físico o químico por el cual partículas de una sustancia se adhieren a la superficie de un sólido [8].

Adsorción: es el proceso físico o químico por el cual partículas de una sustancia se incorporan a la estructura interna de un material [8].

Difusión: es el proceso físico por el cual partículas se desplazan espontáneamente de una región de mayor concentración a una de menor concentración [8].

Materia orgánica: Conjunto de compuestos derivados de restos de plantas, animales y microorganismos en descomposición [3].

Suelo arcilloso: Clase de terreno mineral que posee partículas menores a 0.002 mm de grosor. Muestra poca porosidad, lentitud al dejar pasar agua y aire, y gran poder para guardar alimento y agua [5].

Suelo mineral: Terreno donde predominan compuestos minerales (arena, arcilla) [7].

Suelo orgánico: Suelo que tiene un porcentaje de materia orgánica en peso superior al 20-30% [3].

Agradecimientos

Agradecemos el financiamiento del proyecto de ciencia básica número 287972-Z, otorgado por CONACYT, actualmente SECIHTI.

Referencias

- [1] United Nations. (2024, 2 de diciembre). *La desertificación y la degradación del suelo afecta a 3000 millones de personas en todo el mundo*. Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2024/12/1534741>
- [2] FAO. (2014). World Reference Base for Soil Resources 2014: International soil classification systems for naming soils and creating legends for soil maps. In *World Soil Resources Reports* No. 106. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-classification/world-reference-base/en/>
- [3] Sarkar B, Mukhopadhyay R, Ramanayaka S, Bolan N, Ok YS. (2021). The role of soils in the disposition, sequestration and decontamination of environmental contaminants. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376:20200177. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0177>
- [4] Diario Oficial de la Federación (2013). *NOM-138-SE-MARNAT/SSA1-2012. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación*. DOF 10-09-2013, 16.
- [5] Adriano, D. C., Wenzel, W. W., Vangronsveld, J., & Bolan, N. S. (2004). Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*, 122(2-4 SPEC. IIS.), 121-142. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.003>
- [6] Alexander, Martin. (2000). Aging, Bioavailability, and Overestimation of Risk from Environmental Pollutants. *Environmental Science & Technology*, 34(20), 4259-4265. <https://doi.org/10.1021/es001069+>
- [7] Mohanta, S., Pradhan, B., & Behera, I. D. (2024). Impact and Remediation of Petroleum Hydrocarbon Pollutants on Agricultural Land: A Review. *Geomicrobiology Journal*, 41(4), 345-359. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2243925>
- [8] REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: *Diccionario de la lengua española*, 23.ª ed., [versión 23.8.1 en línea]. <https://dle.rae.es>