

Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar

Agricultural soils and heavy metals, a toxic relationship that can be remedied

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Luis Antonio Loyde De La Cruz¹

Blanca González Méndez²

Ana Martha Cruz Avalos³

René Loredo Portales⁴

Recibido: 13 / 06 / 2022

Aceptado: 11 / 11 / 2022

Publicado: 07 / 12 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.228>

Autor de Correspondencia:

Rene Loredo Portales

Correo: r.loredo@ugto.mx

Resumen

El suelo es un componente esencial de nuestro planeta, principalmente por que participa en diversos procesos que hacen posible la vida en la Tierra. Uno de los papeles más conocidos es proveer alimentos, debido a que del suelo depende más del 95% de la producción mundial de alimentos. Sin embargo, la contaminación de los suelos es una amenaza constante, ya que los suelos no se consideran un recurso renovable y por ello es necesario remediarlos. Los metales pesados son un contaminante frecuente que pone en riesgo el equilibrio natural de los procesos del suelo y constituyen una amenaza para la salud humana. En este sentido, existen diversas propuestas remediales que buscan removerlos e inmovilizarlos. Algunas de ellas consisten en técnicas biológicas y fisicoquímicas, las cuales utilizan plantas (fitorremediación); asimismo existen otras que usan tratamientos térmicos (desorción térmica), respectivamente.

Palabras clave: suelos agrícolas, metales pesados, remediación.

Abstract

Soil is an essential component of our planet, mainly because it participates in various processes that make life possible in Earth. One of the most important roles is to provide food, due to more than 95% of the world's food production depend on the soil. However, soil contamination is a constant threat, since soils are not considered as a renewable resource; therefore, it is necessary to remedy them. Heavy metals are a frequent contaminant that endangers the natural balance of soil processes and constitutes a threat to human health. In this regard, there are remediation techniques that seek to remove and immobilize them. Some of these techniques are the biological and physicochemical ones, which use plants (phytoremediation), and others use thermal treatments (thermal desorption), respectively.

Keywords: agricultural soils, heavy metals, remediation techniques.

¹ Pasante, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Instituto Politécnico Nacional, Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México, lloyde1800@alumno.ipn.mx, 0000-0003-2958-4882.

² Doctora en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste, CONACyT Universidad Nacional Autónoma de México, Hermosillo, Sonora, México, blancagm@geologia.unam.mx, 0000-0002-9601-5906.

³ Doctora en Biociencias, Departamento de Agronomía, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Irapuato, Guanajuato, México, am.cruz@ugto.mx, 0000-0003-3950-4241.

⁴ Doctor en Química, Departamento de Ciencias Ambientales, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Irapuato, Guanajuato, México, r.loredo@ugto.mx, 0000-0003-0493-4532.



LA IMPORTANCIA DEL SUELO

Seguramente y de manera casi intuitiva sabremos responder a las siguientes preguntas ¿Por qué los suelos son importantes para nosotros? y ¿Cómo es que estos se contaminan? Para entenderlo mejor, este trabajo resume un caso particular y muy relevante para la población; los suelos agrícolas contaminados con metales pesados. Al final del escrito podremos además de responder estas preguntas, una más importante ¿Es posible descontaminar los suelos?

Antes de entrar en el tema central, recordemos ¿Qué son los suelos? y ¿Por qué son tan importantes para nosotros? Algunas definiciones incluyen: el suelo es un medio poroso que se forma en la superficie de la tierra como resultado de los procesos de meteorización; es decir, de la desintegración y la transformación de las rocas y sedimentos sometidos a la acción de la lluvia, el viento, la radiación solar y la actividad de los organismos durante el tiempo [1]. El suelo es un cuerpo natural, que consiste en capas compuestas de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua [2]. El suelo es el resultado de la interacción del clima, los organismos y la topografía que contribuyen al intemperismo de las rocas a través del tiempo.

La formación del suelo es un proceso complejo, y lento ya que se requieren entre 400 y 1000 años para la formación de 1 cm de suelo, es por ello por lo que los suelos también se consideran como un recurso no renovable y en lenta evolución [2].

El suelo es importante ya que es uno de los compartimientos esenciales de nuestro planeta, como la hidrosfera, la biosfera y la atmósfera. El suelo regula diferentes procesos que hacen posible la vida en la tierra, por ejemplo: regula el clima, es un hábitat para los organismos, regula las inundaciones, participa en la retención de carbono, tiene un papel importante en la purificación del agua y la reducción de contaminantes del suelo; de igual manera es el soporte de nuestra infraestructura, es fuente de fibras, combustibles, fármacos y alimentos [3]. Aunque la lista de los papeles que juega el suelo en la Tierra es larga, para la humanidad uno de los roles más importantes del suelo es suministrar alimentos, ya que alrededor del 95% de la

producción mundial de alimentos depende del suelo. En este rol, el suelo proporciona los micronutrientes y macronutrientes esenciales, oxígeno, agua y el sostén donde se desarrollan las raíces de las plantas que se utilizarán para producir alimentos. La demanda de alimentos es tan importante y continúa creciendo tanto que se estima que actualmente la tercera parte de la superficie de la tierra se utiliza para la agricultura [4] (figura 1).

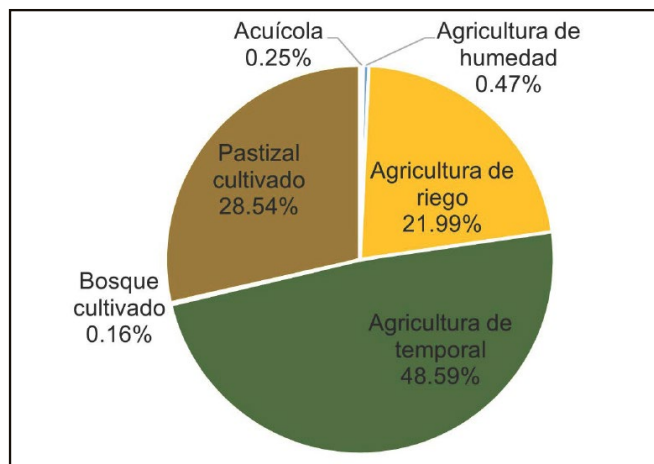


Figura 1. Porcentaje de los diferentes usos del suelo para la producción de alimentos. Elaboración propia: Luis Antonio Loyde de la Cruz [5].

Debido principalmente a las actividades humanas los suelos pueden contaminarse con una amplia variedad de compuestos químicos, son ejemplos, los ácidos, los plaguicidas y los metales pesados (MP). El término MP (aunque comienza a estar en desuso), normalmente nos refiere fácilmente a un número de elementos de conocida toxicidad, entre ellos podemos recordar fácilmente al arsénico (As), plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), etc. En específico para los suelos agrícolas, la presencia de MP en altas concentraciones -más allá de las que se consideran naturales- puede provocar toxicidad a los organismos del suelo, incluyendo a los cultivos disminuyendo la calidad y la producción agrícola (tabla 1).

LA LLEGADA DE LOS METALES PESADOS A LOS SUELOS AGRÍCOLAS

Los MP están presentes en los suelos de forma natural, de hecho, la principal fuente natural de MP es la corteza terrestre quien provee el material parental -la roca que durante el tiempo geológico se va fragmentando hasta formar el suelo-. En este sentido, el material parental meteorizado, determina la mezcla de minerales que predominan en los suelos y que son la principal fuente de nutrientes y también de MP disponibles para las plantas y los organismos del suelo [5]. Sin embargo, en algunos sitios también pueden ocurrir anomalías naturales, es decir, se presentan altas concentraciones de ciertos MP y sus compuestos, que pueden degradar y contaminar los suelos. Esto ocurre por



ejemplo en zonas de yacimientos minerales o en zonas con presencia de actividad volcánica, en donde como resultado de los procesos de erosión naturales, se pueden encontrar zonas mineralizadas [6].

Aunque los suelos que se emplean en la agricultura pueden acumular MP de forma natural (a lo cual se le llama concentración de fondo o cero), la fuente más importante es consecuencia de las actividades antropogénicas (humanas). En el caso de los suelos agrícolas, las actividades que tienen mayor importancia son: 1) la aplicación de fertilizantes, pesticidas y lodos residuales, 2) el riego con aguas residuales y 3) la presencia de residuos mineros [7] (tabla 1).

Tabla 1. Principales metales pesados presentes en los suelos agrícolas, intervalos naturales (mg·kg⁻¹) y fuentes antropogénicas

Elemento	Rango natural (mg·kg ⁻¹)	Fuentes antropogénicas
Arsénico (As)	5–10	Actividades mineras, cenizas de combustión, fertilizantes, pesticidas y herbicidas
Cadmio (Cd)	0.01–0.7	Actividades mineras, fertilizantes fosfatados y lodos residuales
Cromo (Cr)	5-3000	Actividades mineras, fertilizantes fosfatados, y lodos residuales
Cobre (Cu)	2-100	Actividades mineras, disposición de desechos y lodos residuales
Mercurio (Hg)	0.003–4.6 (µg·kg ⁻¹)	Actividades mineras, combustión de carbón y riego con aguas residuales
Níquel (Ni)	10–100	Combustión de carbón y riego con aguas residuales
Plomo (Pb)	2–200	Actividades mineras, deposición atmosférica, y fertilizantes
Zinc (Zn)	10–300	Actividades mineras, cenizas industriales, fertilizantes, y lodos residuales

Elaboración propia: Luis Antonio Loyde de la Cruz [7].

La aplicación de fertilizantes, lodos residuales y el riego con aguas residuales en los suelos agrícolas tiene su fundamento; ya que su aplicación permite tener una mejor producción agrícola al agregar nutrientes a los cultivos, como el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), los cuales usualmente son escasos en los suelos y por ello limitan el crecimiento adecuado de las plantas. También, se suelen adicionar pesticidas para eliminar las plagas que merman la producción agrícola. Sin embargo, todas estas sustancias -que se aplican frecuentemente en los suelos- suelen contener pequeñas cantidades (algunos miligramos por cada kilogramo) de Cd, flúor (F), Hg, Pb, As, níquel (Ni) y zinc (Zn), entre otros. Esto es muy importante, ya que México ocupa el segundo lugar entre los países que usan aguas residuales para el riego de suelos agrícolas y la aplicación de fertilizantes y pesticidas se encuentra pobremente regulada, pues en algunos países el uso de ciertos plaguicidas que aún se emplean en México se encuentran restringidos. Lo anterior, por considerarlos altamente peligrosos para el medio ambiente y la salud humana. Además, los pesticidas y fertilizantes pueden alterar el suelo, principalmente modificando el pH, promoviendo su degradación química y afectando a los organismos del suelo [7].

Otra fuente de MP la constituye, la presencia de residuos de la minería y en concreto los jales o relaves mineros. Los jales mineros, son los residuos que quedan de los procesos químicos y mecánicos empleados para extraer los minerales de interés, como el oro (Au)



y la plata (Ag). Estos desechos contienen MP en el orden de miligramos por cada kilogramo y constituyen partículas finas (algunas de alrededor de 2.5 micras), que pueden dispersarse fácilmente al medio circundante por acción del viento o del agua. De hecho, un escenario común es la presencia de jales mineros aldaños a suelos agrícolas ya que ambos se suelen encontrarse en las cercanías de los ríos y arroyos en donde los jales mineros, en la mayoría de los casos, constituyen pilas de toneladas de material (figura 2). Cuando los MP llegan a los suelos agrícolas desde los jales mineros se producen procesos de meteorización (como aquellos que dan origen a la formación del suelo) y se pueden integrar al suelo y a los cultivos, deteriorando por un lado los suelos agrícolas y por el otro representando un riesgo a la salud para los consumidores de los cultivos contaminados.

Figura 2. Presencia de jales mineros aldaños a suelos agrícolas en la comunidad de San Felipe de Jesús, Sonora. Fotografía de Rene Loredó Portales.



consecuencias de los mp en los suelos agrícolas

Aunque no existen estudios claros sobre la cantidad de suelos agrícolas afectados por MP, se estima que cerca del 44.9% de los suelos en México, presentan evidencias de degradación de los cuales el 17.8% se encuentran afectados por degradación química, que incluye la contaminación por MP. Se considera un suelo contaminado con MP a aquel que presenta concentraciones de uno o algunos elementos por encima del intervalo que se considera natural. En principio, el suelo puede actuar como un filtro de estos contaminantes, reteniéndolos y evitando que se incorporen en cuerpos de agua. Pero cada suelo tiene diferente capacidad para filtrar contaminantes, esto quiere decir que habrá desde algunos con alta capacidad, hasta otros con nula capacidad para filtrarlos. Adicionalmente, cuando

estos se encuentran en altas concentraciones pueden ser una causa de problemas, en especial por que no pueden ser degradados o destruidos como otros contaminantes, por lo que se acumulan progresivamente.

La presencia de altas concentraciones de MP en los suelos agrícolas interrumpen muchos de sus procesos naturales; por ejemplo, pueden producir un cambio en el pH del suelo y en la disponibilidad de nutrientes para los cultivos y en consecuencia pueden afectar negativamente el crecimiento de los cultivos e incluso llevarlos a la muerte, afectando la producción agrícola y la calidad de los cultivos. La disponibilidad de estos está condicionada a valores de pH bajos, por lo que en los suelos ácidos suelen ocurrir las mayores afectaciones relacionadas con su presencia.

Además, los MP pueden pasar del suelo a los cultivos, provocando fitotoxicidad y acumulándose en sus tejidos (bioacumulación), desde donde pueden llegar posteriormente a los animales, afectando su salud. Existe también la posibilidad de acumulación de algunos de ellos, por ejemplo, en la leche de las vacas que los seres humanos consumen posteriormente. Al igual que en los suelos, los MP pueden interrumpir o entorpecer las reacciones bioquímicas que ocurren en nuestro cuerpo y causar toxicidad. Los efectos son variables y dependen del tipo de elemento, su cantidad y la frecuencia de su consumo y pueden ir desde enfermedades gastrointestinales hasta el desarrollo de cáncer.

Estos problemas suelen agravarse en suelos agrícolas que practican la agricultura de manera intensiva y sin periodos de descanso ni rotación de cultivos [8], prácticas que son cada vez más comunes debido al crecimiento de la demanda de alimentos en este mundo de población creciente.

Solución: Remediación de suelos agrícolas

Está claro que la contaminación de suelos agrícolas con MP es un problema creciente, en principio porque no





es posible abrir nuevas tierras al cultivo y aunado a la creciente demanda alimenticia, es necesario implementar estrategias para remediar su degradación.

La remediación solo debe aplicarse en casos muy puntuales; ya que debe estudiarse con detalle el sitio afectado para determinar las necesidades de remediación y con ello optimizar el uso de los recursos. En el caso de los suelos contaminados con MP, las estrategias de remediación se centran en su remoción y/o en su inmovilización, es decir, disminuir su concentración a aquellas aceptables y/o transformarlos químicamente en compuestos que no sean solubles bajo ciertas condiciones ambientales (como ocurre al contacto con el agua de lluvia o de riego). Esto en principio mejora la calidad del suelo, evita que causen afectaciones y se integren a los cultivos y se disminuyen los riesgos asociados a su toxicidad.

Las técnicas de remediación para suelos (incluyendo los agrícolas) afectados por la contaminación con MP se dividen en fisicoquímicas y biológicas. Las técnicas fisicoquímicas, son más variadas y populares, debido a que implican procesos regularmente simples enfocados en su descontaminación e inmovilización de MP, que suelen tener resultados rápidos y requieren en el mejor de los casos un mantenimiento simple; aunque suelen tener altos costos de inversión y de mantenimiento, ya que pueden implicar el uso de maquinaria sofisticada o estructuras para tratar los suelos agrícolas.

Por otro lado, las técnicas biológicas implican el uso de plantas o microorganismos, que mediante procesos naturales extraen o inmovilizan los MP. Algunos de estos procesos incluyen la formación de especies insolubles (ej. sustancias químicas que liberan las raíces y que se unen a los MP), o la adsorción de los MP en sus tejidos, por lo que en este caso se suelen utilizar plantas que normalmente no son comestibles y están adaptadas a las condiciones locales, para evitar su transferencia a las cadenas alimenticias.

Algunos de los procesos fisicoquímicos más comunes incluyen: 1) reemplazamiento de suelo, 2) lavado de suelos, 3) desorción y tratamiento térmico y 4) remediación electroquímica.

En el reemplazamiento de suelo, el suelo contaminado se remueve y es reemplazado por suelo no contaminado. Aunque el suelo removido debe ser tratado, y se le debe dar una disposición final -ya sea reutilizándolo o confinándolo- de acuerdo con su grado de contaminación. Por otro lado, el lavado de suelo aprovecha las propiedades de algunos MP y sus compuestos, que son solubles y pueden "lavarse". La solución de lavado puede ser agua o algún otro químico que permita solubilizar, dispersar o desorberlos de los suelos.

La desorción térmica aprovecha que algunos MP y sus compuestos son volátiles a ciertas temperaturas, por ejemplo, el Hg. Para esto se utiliza vapor, microondas o radiación infrarroja; donde los suelos se calientan por encima de 300 °C (aunque esta técnica en particular es más efectiva para volatilizar contaminantes orgánicos). Si se emplean, por ejemplo, temperaturas por encima de 1600 °C, la materia orgánica del suelo es eliminada y la masa que se forma, después de que el suelo se enfría, forma rocas vítreas en las que los contaminantes quedan atrapados (inmovilizados); posteriormente estas rocas vítreas pueden emplearse, como materiales de construcción. Otras metodologías más sofisticadas incluyen la aplicación de un gradiente de potencial eléctrico (una diferencia de corriente), empleando electrodos que se insertan en el suelo. Esto provoca que los iones metálicos (cargados positiva o negativamente) migren desde los suelos a los electrodos y los recubran, como cuando se croman objetos. Esta técnica además de remover los MP también permite recuperarlos [9] (Figura 3).



Figura 3. Esquema de algunos métodos de tratamiento de suelos mediante proceso fisicoquímicos. Elaboración propia: Luis Antonio Loyde de la Cruz [9].

Por otro lado, las metodologías de remediación biológica incluyen: 1) fitorremediación, 2) biorremediación y 3) adición de biomateriales.

La fitorremediación, utiliza plantas generalmente no comestibles y locales, aprovechando la habilidad de algunas de ellas para acumular MP en sus tejidos (fitoex-



tracción) o inmovilizarlos en sus raíces (fitoestabilización) o incluso volatilizarlos a través de sus hojas (fitovolatilización). La biorremediación emplea microorganismos, como bacterias y hongos, que pueden provocar cambios químicos en los MP y sus compuestos, como parte de su metabolismo y disminuir con ello su solubilidad. Otra alternativa más reciente, es la aplicación de biomateriales, que constituyen materiales que se producen a partir de la pirolisis (descomposición mediante calor a temperaturas de alrededor de 500 °C) de residuos biológicos (desechos de alimentos, huesos animales, desechos de cultivos, entre otros) [9;10]. Este proceso genera materiales porosos, con propiedades principalmente adsorbentes que permiten inmovilizar a los MP y sus compuestos sobre su superficie. Además, se postula como una tecnología de remediación sustentable ya que aprovecha los residuos orgánicos como materia prima.

CONCLUSIONES

Está claro que el cuidado de los suelos es primordial para la población, ya que nos proveen de muchos servicios, además son fuente de la mayoría de nuestros alimentos y son un recurso no renovable porque su proceso de formación requiere cientos de años.

De todos los usos que se le da al suelo, la agricultura es la más importante ya que cerca de la tercera parte de la superficie de la tierra se utiliza para ello. Una de las amenazas que disminuyen la calidad de los suelos agrícolas y afectan los cultivos, es la presencia de metales pesados. Estos elementos tienen diversos orígenes; en su mayor parte se acumulan en los suelos como consecuencia de actividades humanas (ej. presencia de residuos de la minería y aplicación de agroquímicos). Aunque estas consecuencias dependen mucho del tipo de metal y la cantidad en la que se encuentren.

En México, se estima que cerca del 17.8% de los suelos se encuentran afectados por la degradación química (incluyendo la presencia de metales pesados). Para resolver esta problemática, existen una amplia gama de procesos de remediación que se pueden aplicar para recuperarlos.

Estos procesos buscan removerlos del suelo (extraerlos) o inmovilizarlos en el suelo (volverlos insolubles). Sin embargo, muchos de estos procesos son complejos y costosos -como los tratamientos fisicoquímicos-, aunque algunos de ellos pueden mostrar resultados relativamente a corto plazo, poseen algunos efectos secundarios como: pérdida de suelo (remoción, incineración o solidificación) y pérdida de actividad biológica. Por otro lado, los tratamientos biológicos son menos costosos y amigables con el medio ambiente, aunque sus resultados suelen ser a largo plazo. Así, las técnicas de remediación siguen investigándose y se espera que la diversidad de organismos y materiales biológicos disponibles marquen la evolución para la mejora de su efectividad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Sposito, *The chemistry of soils*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2008. ISBN: 978-0-19-531369-7
- [2] "All definitions, FAO SOILS PORTAL, Food and Agriculture Organization of the United Nations". <https://www.fao.org/soils-portal/about/all-definitions/en/> (accedido el 6 de junio de 2022).
- [3] A.P. Eldor, *Soil microbiology, ecology, and biochemistry*. 4th ed. Amsterdam: Academic Press, Elsevier inc., 2015. ISBN: 978-0-12-415955-6
- [4] H. Burbano-Orjuela, "The soil and its relationship with ecosystem services and food security", *Rev. sci. agric.*, Vol. 33, no. 2, pp.117-124, December 2016. DOI: 10.22267/rcia.163302.58.
- [5] B.J. Alloway, *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. 1st ed. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2012. DOI: 10.1007/978-94-007-4470-7.
- [6] S.M. Ghandi y B.C. Sarkar, *Geochemical Exploration en Essentials of Mineral Exploration and Evaluation*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier inc., 2016, pp. 125-158. ISBN: 978-0-12-805332-4.
- [7] R. Nieder, D.K. Benbi y F.X. Reichl, *Role of Potentially Toxic Elements in Soils en Soil Components and Human Health*, 1st ed. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2018, pp. 375-450. DOI: 10.1007/978-94-024-1222-2.
- [8] J.D. Mahecha-Pulido, J.M. Trujillo-González y M.A. Torres-Mora, 2015, "Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región in the meta departmet", *ORINOQUIA*, vol. 19, no. 1, pp. 118-122.
- [9] L. Lianwen, L. Wi, S. Weiping, G. Mingxin, 2018, "Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability", *Sci. Total Environ.*, vol. 633, no. 1, pp. 206-219. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.161.
- [10] N. Siebers y Peter Leinweber, 2013, "Bone Char: A Clean and Renewable Phosphorous Fertilizer with Cadmium Immobilization Capability", *J. Environ. Qual.*, vol. 42, no. 1, pp. 405-411. DOI: 10.2134/jeq2012.0363.

Cómo citar este artículo:

Loyde de la Cruz, L. A., González Méndez, B., Cruz Avalos, A. M., & Loredó Portales, R. (2022). Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar. *EPISTEMUS*, 16(33).

<https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.228>