



Capítulo 3. ¿Qué hacer si hay cadmio en suelos y en plantas?

Métodos para mitigar la contaminación

En las últimas décadas, varios enfoques de remediación se han introducido para tratar la contaminación por Cd en arrozales (Sebastian et al., 2018; Booboori & Zhang, 2022). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (1983), y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam, 2004), la degradación del suelo se puede definir como todo proceso que rebaja la capacidad actual y el potencial del suelo para producir, cuantitativa y cualitativamente, bienes y servicios o funciones ecosistémicas y ambientales, como consecuencia, entre otras, de procesos de contaminación con sustancias tóxicas que superan la capacidad de amortiguación del suelo.

Reducir la concentración y la biodisponibilidad de Cd en el cultivo de arroz es una de las estrategias clave para la agricultura sostenible. Esto se hace mediante mecanismos de inmovilización a nivel de suelo o de las raíces y órganos de la planta, con el fin de evitar el ingreso del metal al grano (Volque Sepúlveda et al., 2005). Dependiendo de los resultados de la concentración de los MP, en el suelo y en plantas (raíz, tejido), se toma la decisión de proponer las alternativas de manejo para la remediación. Varios trabajos de investigación recomiendan implementar técnicas que han demostrado su capacidad para el saneamiento de cultivos y la recuperación de suelos contaminados.

Las metodologías para mitigar el efecto de MP en los suelos y recuperarlos de la contaminación dependen de las características del suelo, del contaminante, de la eficacia esperada con cada tratamiento, su viabilidad económica y el tiempo estimado para su desarrollo (Booboori & Zhang, 2022). Existen metodologías *in situ* cuando se aplican en el lugar de la contaminación y *ex situ* cuando se requiere remoción del suelo para su posterior tratamiento.

En efecto, las características del suelo, químicas, físicas y biológicas, determinan en cierta medida su capacidad amortiguadora y de depuración de elementos contaminantes de diferentes orígenes, a través de reacciones de acomplejamiento, adsorción y desorción, precipitación y disolución, oxidorreducción ácido-base y aquellas derivadas de procesos metabólicos. Estas reacciones están relacionadas con propiedades como textura, estructura, porosidad, capacidad de intercambio catiónico, pH y actividad microbiológica (Khalid et al., 2017).

A continuación, se describen algunos métodos de manejo para eliminar la contaminación de Cd en suelos arroceros; son métodos de remediación típicos que se basaron en estudios recientes (Li et al., 2021; Sebastian et al., 2018).

Métodos de manejo agronómico

Existen estrategias que se basan en la reducción de la presencia de MP en los suelos empleando métodos de remoción, mediante el uso de sustancias químicas y la adición de materiales no tóxicos que permitan la estabilización del suelo (Liu, Tie et al., 2018; Chang, Diao et al., 2018). Algunos de los materiales empleados para mejorar las características químicas y físicas de los suelos son escorias, zeolitas, calizas y ceniza volcánica (Basta & McGowen, 2004). Sin embargo, no siempre están disponibles estos materiales, son costosos o no permiten el uso del suelo en agricultura inmediatamente después del tratamiento (Khan & Doty, 2011).

Por lo anterior, en los últimos años se ha trabajado con mayor énfasis en el uso de materiales a base de carbono, como el biocarbón, que es el resultado de la carbonización de biomasa vegetal y animal a temperaturas entre 300°C y 600°C bajo condiciones anaeróbicas (Qian et al., 2016) y que puede mejorar las características fisicoquímicas del suelo.

El uso de materiales minerales puede mejorar el pH del suelo, y de esta manera reducir la disponibilidad y solubilidad de los MP. En cuanto a los materiales orgánicos, estos incrementan el carbono orgánico total del suelo, lo cual mejora su condición fisicoquímica y microbiológica, y esto permite el establecimiento de vegetación capaz de trabajar como fitoremediador por su capacidad de retener cationes, hecho que reduce la toxicidad de Cd (Huaraca-Fernández et al., 2020). El manejo de nutrientes es una de las estrategias empleadas para mitigar el efecto de Cd en diferentes cultivos (Nazar et al., 2012), especialmente de nutrientes como P, K, S, Fe y Zn, con los que se ha observado un beneficio en mitigación de Cd. La aplicación adecuada de P favorece no solo el crecimiento y el desarrollo de las plantas, sino que además aumenta la actividad de enzimas antioxidantes, lo cual se refleja en una disminución de Cd y H₂O₂ (Arshad et al., 2016).

Los niveles de K en el suelo se han estudiado como posible fuente de reducción de la absorción y traslocación de Cd en plantas de girasol y como inhibidor de la permeabilidad de las membranas provocada por el estrés (Samet et al., 2017), así como su participación en la formación de pigmentos fotosintéticos y prevención de la descomposición de clorofilas (Cakmak, 2005). Todo lo anterior está relacionado con la mitigación del efecto del Cd.

En el estudio de Kao (2014), se determinó que los cultivos de arroz en suelos con altos niveles de Cd incrementaron su crecimiento y desarrollo al aplicarles KCl y se observó una disminución de la actividad de la enzima NADPH oxidasa. Sin embargo, para otros cultivos, la deficiencia de K mostró una acción de protección del estrés oxidativo provocado por el Cd, debido principalmente al

aumento de la actividad de enzimas antioxidantes (superóxido dismutasa, ascorbato peroxidasa, glutatión reductasa y catalasa).

El azufre (S), por su parte, tiene mecanismos muy diferentes a los otros nutrientes, pues se considera que está involucrado en la biosíntesis de agentes detoxificantes de MP (Anjum et al., 2008). El S redujo la afectación en el contenido de clorofila y aumentó la actividad de las enzimas antioxidantes, ascorbato-peroxidasa, glutatión reductasa y catalasa (Bashir et al., 2015).

Una nutrición adecuada con Fe puede mitigar el efecto tóxico del Cd. Así, en plantas de arroz se ha encontrado que la aplicación de este micronutriente reduce la concentración de Cd (Kao, 2014). En maíz, la aplicación de diversas fuentes y concentraciones de Fe (entre 53 y 80 mg/kg) redujo la disponibilidad de Cd en suelo entre 4,59 y 5,19 mg/kg, con incrementos en producción de cerca del 30 % y reducciones de Cd en grano entre 35 % y 48 % (Zhang et al., 2021). Lo anterior se debe al aumento de la fotosíntesis, al rendimiento del grano, a las actividades enzimáticas y a la reducción del estrés oxidativo y el contenido de Cd en los diferentes órganos de la planta (Rizwan et al., 2017).

Otros elementos no esenciales como el Se y silicio (Si) han mostrado efectos favorables en la mitigación del estrés por Cd; por ejemplo, reducción de su concentración en hojas, tallo, raíces y frutos, y disminución de los daños ocasionados en el crecimiento y rendimiento en cultivos de tomate (Nogueirol, 2016). El Se, por su parte, indujo la biosíntesis de la melatonina, lo cual aumentó la tolerancia al Cd, con reducciones en la disminución del crecimiento, la fotoinhibición y la pérdida de electrolitos (Li et al., 2016; Hernández-Baranda et al., 2019). El Si es un elemento benéfico para mantener el crecimiento en ambientes de estrés. Frente a la toxicidad por Cd, también ha aumentado la resistencia de diversos cultivos, y de esta manera se ha logrado reducir el transporte de Cd de la raíz a las hojas y disminuir la absorción de Cd por las raíces (Wu et al., 2015; Shi et al., 2010).

Uso de enmiendas

Los suelos contaminados por MP también pueden recuperarse *in situ* añadiéndoles sustancias orgánicas e inorgánicas y mezclándolas para transformar los contaminantes. Asimismo, se ha llevado a cabo la adición de carbonatos, zeolitas, fosfatos, minerales de Fe, bentonitas, hidróxido cálcico, compost o levaduras en el momento de inmovilizar y reducir la biodisponibilidad de metales tóxicos como Pb, uranio (U), As, Zn, Ni, estroncio (Sr), Cu y Cd (Hartley et al., 2004; Castaldi et al., 2005; Raicevic et al., 2006; Chen et al., 2006). Sin embargo, los mecanismos de secuestro de metales en suelos por estas enmiendas no se conocen por completo y aunque en campo se ven los efectos benéficos, aún no se conoce el tiempo de duración de la recuperación o si se vuelven reversibles con el tiempo (Hamon et al., 2002). Por ejemplo, si el efecto se debe a cambios de pH, es fácilmente reversible con un cambio en el pH, pero si las enmiendas promueven el secuestro de metales en formas no lábiles en suelo, y estos quedan atrapados en las estructuras de las arcillas o acomplexados por enlaces covalentes, entonces la inmovilización de los metales puede ser mucho más duradera (Adriano et al., 2001).

Fitorremediación

Otra de las estrategias empleadas es la fitorremediación, que consiste en emplear plantas con alta capacidad de absorber e inmovilizar los MP y así removerlos del suelo (Dos Santos et al., 2016). Es una práctica económica, efectiva, con bajo impacto en el ambiente y permite prevenir contaminación de suelos y fuentes de agua (Ali et al., 2013). Con esta estrategia los microorganismos del suelo pueden resultar muy útiles para incrementar la capacidad de las plantas de absorber estos metales. Así, se requiere el uso de plantas tolerantes/resistentes a los MP, lo cual generalmente está asociado con la capacidad de secreción de agentes quelantes, el aumento de producción de prolina y de enzimas antioxidantes o la alta capacidad de almacenamiento de MP en las raíces (Pedroso et al., 2018).

Las leguminosas y algunas especies arbóreas son importantes por su alta capacidad de acumulación de MP (Vymazal et al., 2009). Estas plantas permiten recuperar y mantener comunidades microbianas en el suelo que pueden participar en el crecimiento y desarrollo de la planta o en la inmovilización o degradación de los MP (Quintella et al., 2019).

La fitoextracción es un método eficaz para disminuir la contaminación por Cd en el cultivo de arroz, y además aporta ventajas reconocidas a los ecosistemas (Li et al., 2021; Antoniadis et al., 2017). La fitorremediación es un método adecuado para casos de baja o moderada contaminación de Cd en cultivos de arroz; en efecto, según el Codex Alimentarius (2015), los niveles permitidos son de 0,02 y 0,04 ppm para el As y Cd, respectivamente. El estándar europeo para arroz pulido es de 200 µg/kg para Cd. La selección de las plantas acumuladoras eficientes para la fitoextracción de Cd debe diseñarse y desarrollarse más con la ayuda de biotecnologías moleculares.

Biorremediación

Los resultados de una serie de avances tecnológicos para sanear ambientes contaminados con MP han llevado al desarrollo de alternativas como la biorremediación, la cual consiste en utilizar plantas, bacterias, hongos y algas, o enzimas derivadas de estos últimos, para recuperar un ambiente contaminado por medio de mecanismos de ruptura, cambio, remoción, inmovilización y detoxificación de diferentes contaminantes y, especialmente, por su capacidad de acumular o metabolizar los MP (Enerijiof, 2021). La biorremediación ha avanzado en términos de eficiencia, costos y aceptación social (Khalid et al., 2021), y es una práctica que día a día se emplea cada vez más para solucionar problemas de contaminación de suelos y aguas (Bala et al., 2022).

Existen microorganismos del suelo que son tolerantes a la toxicidad del Cd y pueden cambiar sus formas disponibles a formas menos tóxicas (Li et al., 2021). Estudios recientes han demostrado que las bacterias resistentes a los metales disminuyen la fitodisponibilidad de Cd en suelos y su acumulación en plantas (Liu, Li et al., 2018). Además, se han identificado hongos tolerantes a Cd, especialmente del género *Fusarium*, en suelos de minas en Perú (Muñoz-Silva et al., 2019) y hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA), por su capacidad de fitoextracción y de inmovilización de Cd (Alvarado et al., 2011).

La remediación microbiana de MP consiste en biosorción, bioacumulación, biomineralización y biotransformación (Ayangbenro & Babalola, 2017; Li et al., 2021). La ingeniería microbiana es fundamental y se espera que este método sea eficiente y seguro para la recuperación de suelos contaminadas con Cd. Según Siripornadulsil y Siripornadulsil (2013), dependiendo del aislamiento bacteriano, los contenidos de Cd en plantas de arroz pueden disminuir en un rango de 6 % a 61 %.

Como estrategia para abordar mecanismos que permitan reducir la incidencia de MP sobre el arroz a nivel de vivero, la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) ha evaluado la capacidad biorremediadora de microorganismos como los HFMA para suelos y plantas contaminados con MP. En la literatura, los HFMA se han propuesto como una alternativa biológica que ha mostrado reducir la acumulación de ciertos MP como el Cd en especies vegetales, en las cuales las plantas inoculadas translocaron menos MP y fueron más tolerantes a altas concentraciones en el suelo, comparadas con las no inoculadas (Ramtahal et al., 2012; Zhang, Mallik et al., 2019; Cui et al., 2019; Li et al., 2022).

