

Capítulo 1. Generalidades del cultivo de arroz y presencia de cadmio en suelos arroceros

Taxonomía, descripción botánica y origen del arroz

El arroz pertenece a la familia de las gramíneas. El género *Oryza* tiene veintiún especies silvestres y dos especies cultivadas; nueve de las especies silvestres son tetraploides y las demás son diploides (Khush, 2000). Su origen es asiático; sin embargo, existen dos lugares más precisos respecto a su origen: el oriente de la antigua península de Indochina (hoy ocupada por Vietnam, Camboya y Laos) y el valle del río Yang-Tse Kiang, en China (Degiovanni Beltramo et al., 2010). En esta gramínea anual se destacan los tallos (cilíndricos y huecos, con nudos y entrenudos), las hojas de lámina plana y angosta, unidas al tallo mediante vainas y la inflorescencia en panícula (Degiovanni Beltramo et al., 2010).

La anatomía de las raíces de la planta de arroz es similar a la de las plantas acuáticas, aunque tienen mayor abundancia de pelos absorbentes. En las hojas, se diferencian dos partes: la vaina y la lámina. La vaina se caracteriza por las lagunas aeríferas que tiene en el mesófilo, cuya importancia aumenta a mayor altitud del sitio de cultivo. Por su parte, la panícula soporta las estructuras reproductivas de la planta y desarrolla actividad fotosintética. Por su parte, el fruto del arroz es una cariósida, que consta de endospermo y de varias capas exteriores de células: la aleurona, el tegumento y el pericarpio (Degiovanni Beltramo et al., 2010).

Generalidades del cultivo de arroz

Los cereales, dentro de estos el arroz, han acompañado a la humanidad en su desarrollo. A nivel nutricional, el arroz blanco presenta una gran fuente de calorías, pero también provee importantes minerales (por ejemplo, magnesio [Mg], Mn, selenio [Se], hierro (Fe) y fósforo [P]) y vitaminas (como tiamina, niacina, ácido fólico). Los fitoquímicos bioactivos incluyen polifenoles, antocianinas y flavonoides. El salvado de arroz es rico en compuestos como γ -orizanol, tocoferol, tocotrienol, aminoácidos y fibras dietéticas (Ravichanthiran et al., 2018).

La producción mundial de arroz es de 2.768 millones de toneladas (FAO, 2022), y existe un área sembrada de 165 millones de ha; India es el mayor productor (43,7 millones de ha), seguido por China (31 millones de ha) e Indonesia (14 millones de ha). Durante 2021, en América Latina, Brasil tuvo la mayor área (1.679.497 de ha) y Colombia contó con una superficie de 544.635 ha, con una producción que se orientó fundamentalmente al consumo interno (Fedearroz, 2021; Embrapa Arroz e Feijão, 2022).

El rendimiento promedio mundial de arroz Paddy seco se estimó en 4,6 t/ha (2012-2017), con un máximo de 10,2 t/ha en Australia, mientras que en Colombia el rendimiento es de 4,8 t/ha, cifra que deja al país en el puesto 34 a nivel mundial (Becerra et al., 2020). En Colombia, el área sembrada de arroz (544.635 ha) es la tercera en superficie después del café (840.111 ha) y del maíz (576.230 ha), y se encuentra en 211 municipios de 23 departamentos. Los departamentos con mayores áreas de siembra son Casanare, Meta, Tolima y Huila; en estos dos últimos, se encuentra la producción asociada a distritos de riego (Fedearroz, 2011, 2021; Federación Nacional de Cultivadores de Cereales, Leguminosas y Soya [Fenalce], 2022; Federación Nacional de Cafeteros [FNC], 2022).

La producción de arroz se realiza a partir de diversos tipos de manejo: el primero se clasifica como sistema mecanizado y manual, dependiendo del tipo y de la intensidad de uso de maquinaria, y el segundo es definido como sistema secano o de riego, dependiendo

de la forma y cantidad de agua suministrada al cultivo. La mayor siembra en el país se lleva a cabo durante el primer semestre del año (65 %); así, se encuentra un porcentaje de secano manual del 4 %, cerca del 50 % bajo riego y el restante bajo otros sistemas de producción. Aunque el área de arroz secano (320.772 ha) a nivel nacional es mayor que la de riego (223.864 ha), la producción de arroz riego es superior (1.725.319 t/año) a la de secano (1.601.210 t/año) (Fedearroz, 2021). El secano manual es un sistema en el cual, además de la no aplicación de riego, no se emplea maquinaria para las labores de preparación del terreno, siembra, aplicaciones de agroquímicos y cosecha. En algunas zonas, estas siembras se hacen en las vegas de los ríos para aprovechar la alta humedad de la zona y la fertilidad de los sedimentos. La productividad de este sistema es baja (1,8 t/ha), se emplean variedades tradicionales o semilla no certificada y lo usan pequeños productores, principalmente para pancoger.

Para el caso del arroz secano mecanizado, para el cual se utiliza maquinaria en las labores (preparación, siembra, aplicaciones y cosecha), no se aplica riego, ni está el cultivo bajo inundación. Por lo general, se siembra en zonas donde no hay disponibilidad de distritos de riego para el manejo bajo inundación y por ello se han desarrollado variedades con mayor tolerancia a sequía. Existe otro sistema denominado secano favorecido que se usa en zonas con alta precipitación, lo que permite mantener el lote inundado sin necesidad de riego. Por su parte, el arroz riego requiere la aplicación de agua, especialmente en germinación, floración y llenado de grano (Becerra et al., 2020).

Posibles fuentes de contaminación por cadmio

El Cd, en su forma natural en la tierra, se encuentra principalmente en el estado de oxidación Cd^{2+} . La aplicación continua de diferentes fertilizantes como el superfosfato afecta su disponibilidad y hace que las plantas de arroz no lo absorban de manera correcta (Huang

et al., 2018). Asimismo, los fertilizantes que se obtienen a partir de minerales de fosfato comprenden aproximadamente el 56 % de la entrada total de Cd de origen antropogénico. Otras rutas de entrada de Cd en suelos arroceros se pueden dar a través de prácticas agrícolas como la aplicación de fungicidas que contienen este metal, aplicación de lodos de depuradora, riego con aguas contaminadas y del agua que se libera debido a las explotaciones mineras, lo cual podría estar causando una contaminación masiva.

La deposición atmosférica aporta el 40 % del contenido de Cd proveniente de actividades antropogénicas (Liang et al., 2017). Además, la lluvia ácida puede incrementar la disponibilidad o absorción de Cd por su efecto en la variabilidad del pH del suelo (Yang et al., 2018) (figura 1).



Dinámica de cadmio en el sistema suelo-arroz

Tanto las plantas como los microorganismos han desarrollado mecanismos para la obtención de nutrientes y, de forma similar, han desplegado estrategias para prevenir toxicidad de algunos metales. La absorción de MP considera algunos transportadores para translocación del metal con diferente ubicación a nivel celular, el sustrato sobre el que actúan y los patrones de expresión (Colangelo & Guerinot, 2006).

Algunos de esos mecanismos están relacionados con la modificación del entorno de la rizósfera mediante la excreción de compuestos orgánicos (Sharma et al., 2007), lo cual permite una mayor disponibilidad de los nutrientes presentes en el suelo (Sylvia et al., 2005), que incluyen procesos de quelación y acidificación de la rizósfera, lo que disminuye la movilidad de MP en exceso (González Guerrero, 2005).

La absorción del Cd por la planta de arroz depende de varios factores y componentes ecofisiológicos, los cuales, a su vez, dependen de las características físicas del terreno y de las características morfológicas de la planta (Sebastian & Vara Prasad, 2014). Los componentes físicos que influyen en la absorción del Cd son principalmente el potencial redox del suelo, pH, oligoelementos esenciales y estado y contenido de materia orgánica en el suelo (Jung, 2008).

Debido a su alta movilidad, el Cd ingresa fácilmente a las raíces a través de la epidermis y puede llegar al xilema vía apoplasto o simplasto (Ronzan et al., 2018). Los procesos clave de transporte de Cd desde el suelo hasta los granos de arroz son: primero, la absorción por la raíz y la carga de xilema (translocación de raíz a brote); segundo, redireccionamiento del transporte a través de transferencia intervascular en los nudos de la planta, y tercero, la movilización a las hojas a través del floema (Luo et al., 2022) (figura 2). El arroz permanece durante un largo periodo bajo

condiciones de anoxia, salvo en el momento de la cosecha, cuando está en condiciones aeróbicas; esto permite un incremento de la dinámica del potencial redox del suelo, momento en el cual el Fe se oxida (Magneschi & Perata, 2009).

Las características morfológicas del arroz favorecen la toma de Cd, debido a que tiene un sistema radicular fibroso (Coudert et al., 2010). Los ácidos orgánicos y la solubilización de Cd pueden favorecer la toma de Cd por las células de las raíces (Römheld, 1991; Clemens et al., 2002). La presencia de Fe y Mn en la matriz del suelo facilita la precipitación de la fracción soluble de Cd en el suelo (So & Ringrose-Voase, 2000). En el caso del arroz, la placa formada por Fe y Mn que se precipita en el apoplasto de la raíz cuando se desarrolla el tejido del aerénquima tiene un alto potencial redox; esto hace que durante la época que el arroz está bajo inundación, el Cd no esté disponible para ser translocado en el interior de la raíz (Liu et al., 2008). Los bajos coeficientes de difusión de Cd en sistemas acuosos indican que su toma por la raíz depende de la transpiración y por ello el manejo adecuado del agua es importante en el control de la absorción de Cd por la planta (Lux et al., 2010).

La primera barrera para el ingreso de nutrientes y metales es la pared celular y su composición varía dependiendo de la célula, su afinidad por cationes y retención de algunos MP (Wang & Chen, 2009). Existen diferentes transportadores para la absorción de micronutrientes en el interior de la célula, incluyendo el Cd, dentro de los cuales están los ZIP (*Zn and Fe transporters*), que introducen cationes divalentes en el citoplasma; los CDF (*cation diffusion facilitator*), los cuales reducen la concentración de cationes divalentes en el citoplasma; los tipo primario ABC (*ATP binding cassette*), que utilizan la hidrólisis de ATP para movilizar sustancias que incluyen lípidos, péptidos, azúcares y complejos de glutatión (Rodríguez-Serrano et al., 2008).

Las plantas de arroz absorben el Cd de forma activa, principalmente por las raíces, por la vía simplásmica, con consumo de energía

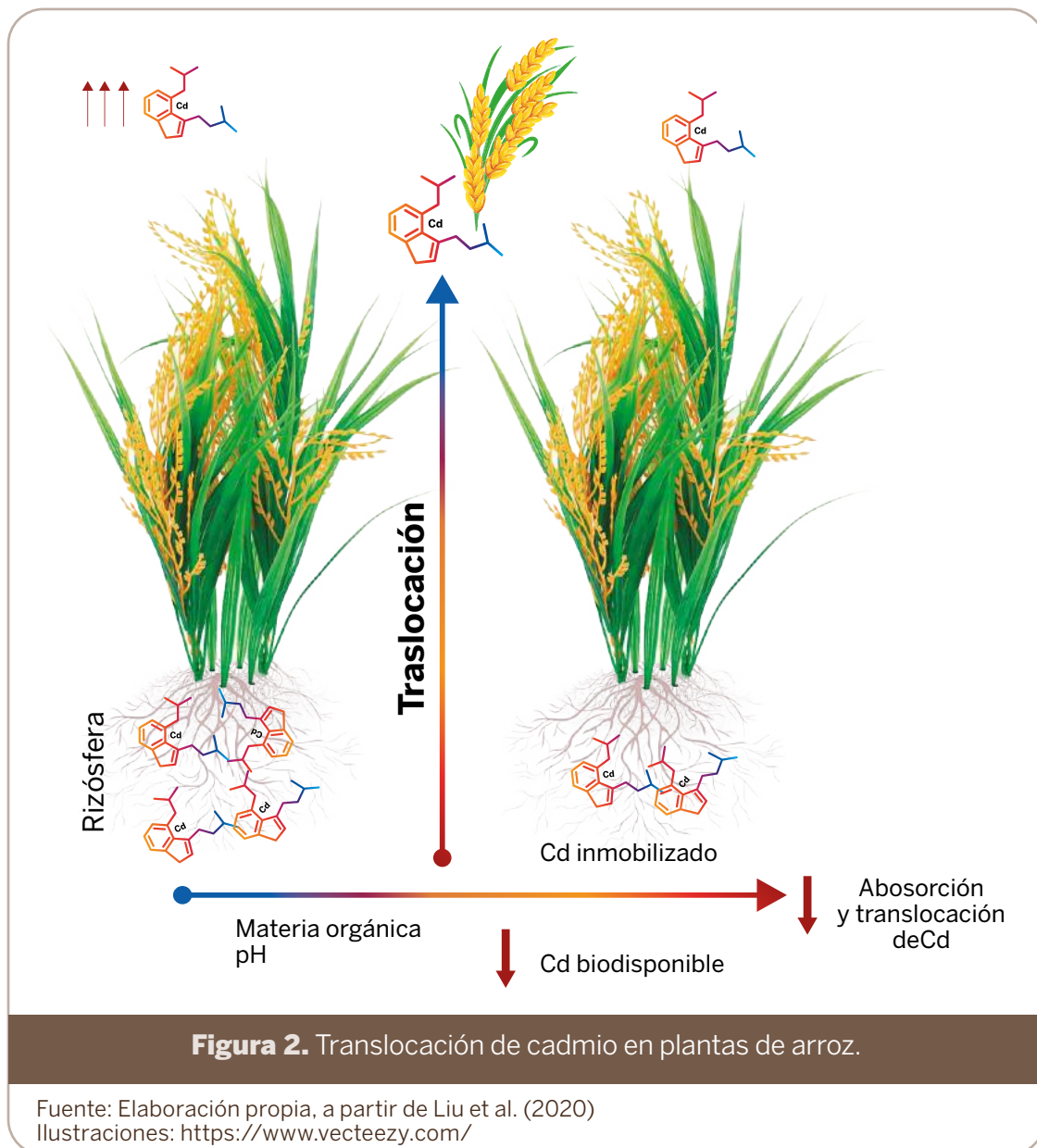
mediado por transportadores de Cd, dentro del cilindro vascular por el plasmodesmo; así, las raíces son el primer contacto con el Cd y, a su vez, la primera barrera para impedir el ingreso del metal. De esta manera, es mucho mayor el contenido de Cd en raíz que en la parte aérea de la planta. El Cd también puede ser absorbido pasivamente a través de compartimientos extracelulares como el espacio intercelular, lo cual ocurre cuando la concentración de Cd es mayor en el suelo que en la raíz. El Cd puede ser almacenado en la vacuola que tiene forma de quelato o continuar al xilema para ingresar a la parte aérea de la planta (Zhang et al., 2022).

De manera similar, el Cd se mueve en el interior de la planta desde la raíz hasta la parte aérea, y de la parte aérea al grano. Los transportadores que están involucrados en este proceso son de la familia ZIP, y están localizados en el plasma de la membrana de la raíz y en los tejidos del tallo, lo que permite el paso del Cd. Este transporte se realiza a través del xilema y muy poco a través del floema (Zhang et al., 2022).

Para la retención de MP a nivel citoplasmático, la quelación juega un papel muy importante para el direccionamiento o la reserva de estos. El glutatión asociado al potencial redox del citoplasma es fundamental en la eliminación de compuestos tóxicos mediante el proceso de conjugación (González Guerrero, 2005). A través de las fitoquelatinas, reguladas por MP , se usan transportadores específicos en el citoplasma para retirar las fitoquelatinas que están unidas a los MP (Yadav, 2010). En cuanto a las metalotioneinas (proteínas de menor tamaño 6.000-7.000 Da), estas posibilitan la quelación de iones metálicos y la protección contra agentes oxidantes (González Guerrero, 2005); principalmente, se acumulan en el citoplasma y requieren otras proteínas como las metalochaperonas, que sirven como impulsoras del metal para que se transfiera con rapidez.

Muchas de las funciones fisiológicas de la planta se afectan por la presencia de Cd, lo que se puede observar en la respuesta de la planta frente a estreses abióticos (Gill & Tuteja, 2011). Uno de los síntomas es la pérdida de pigmentos, ya que se alteran procesos como la

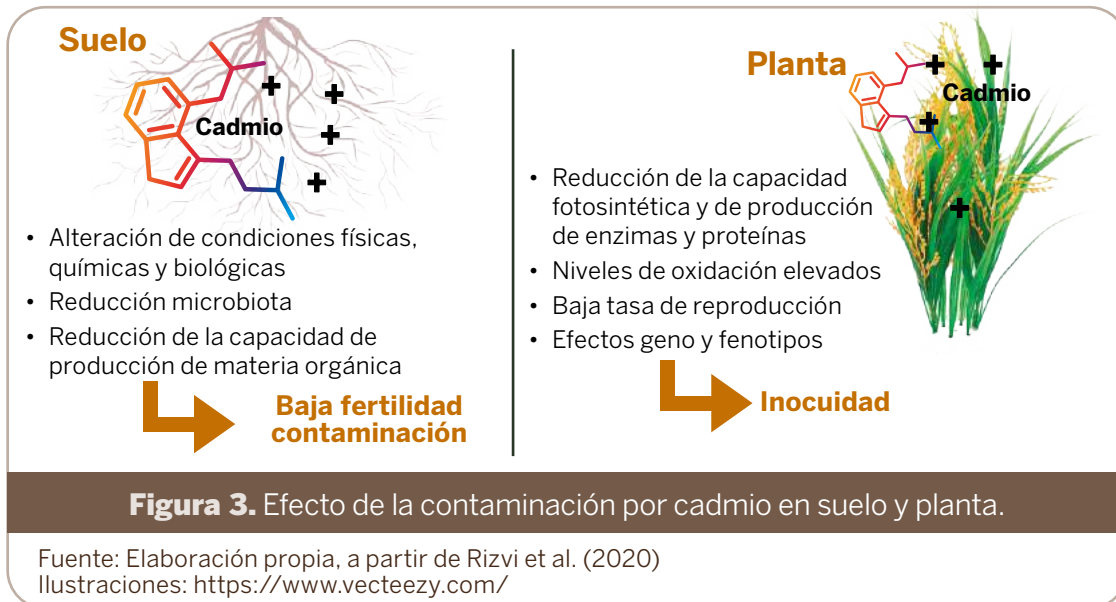
fotosíntesis, la eficiencia en uso del agua y la asimilación de nutrientes (Nazar et al., 2012). Un aspecto que se ha estudiado ampliamente está relacionado con las rutas de las enzimas antioxidantes, la síntesis de proteínas celulares como la rubisco, el fotosistema II y el efecto en el metabolismo de azúcares, que a su vez afecta las rutas de síntesis de aminoácidos y ácidos grasos (Wang et al., 2011).



Efectos de la contaminación por cadmio sobre el suelo y las plantas de arroz

En términos generales, las funciones físicas, químicas y biológicas del suelo se ven afectadas por la presencia de Cd, lo que causa una degradación del sistema y, por lo tanto, se reduce la productividad de este importante recurso natural (figura 3).

La toxicidad de Cd afecta el metabolismo y la fisiología de la planta de arroz e incluso puede causar su muerte (Raven Willwater, 2018). Los efectos fisiológicos se observan en la reducción de crecimiento y en el desarrollo de las plantas, lo que afecta la longitud de raíz, el área foliar y la biomasa, así como la reducción en producción de frutos; esto se ha observado en pimentones, rábano, soya y lechuga (Hernández-Barnada et al., 2019). En alfalfa, por ejemplo, se encuentran reducciones en crecimiento en acumulación de materia seca de raíz, parte aérea y total, de 82 % y 87 %, al aplicar 5 mg/kg de Cd (Raven Willwater, 2018). Asimismo, se ha observado una reducción en la actividad fotosintética, que se refleja en reducciones del contenido de clorofila y carotenoides, y en reducción de la tasa de fotosíntesis neta, en cultivos de tomate, arveja, papa y soya (Hernández-Baranda et al., 2019); también se presenta interferencia en absorción y transporte de nutrientes, lo cual afecta la toma de N y su fijación simbiótica en cultivos de soya (Balestrasse et al., 2003). De la misma manera, hay reducciones en K, P, Ca, Mn, Zn, S, B, en arveja y tomate; reducciones de Mn e incremento de Zn en soya, y aumento de P, K, Ca, Mg, Fe y Zn en cebolla (Hernández-Baranda et al., 2019). A nivel fisiológico, el Cd induce estrés oxidativo de manera indirecta al elevar la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) o al disminuir la defensa antioxidante, lo que posiblemente daña las macromoléculas como los lípidos.



Huybrechts et al. (2020) demostraron que las plantas de arroz expuestas a Cd bajo condiciones controladas, en Bélgica, presentaron una reducción en la producción de biomasa del 24 % al 39 % en 10 y 50 $\mu\text{m Cd}$, así como hojas más cortas y una afectación mayor en la biomasa radicular. Los principales efectos de la acumulación de Cd, específicamente en plantas de arroz, están representados por una disminución en el rendimiento del grano, dado por un menor llenado, debido a la baja fertilidad del polen y la inmovilización del almidón; de igual forma, la calidad del grano se ve afectada por la alteración de algunas propiedades como la producción de amilasa, la dureza, la gelatinización, la forma y el tamaño del grano.

Además, las plantas expuestas a niveles tóxicos de Cd tienen complicaciones en los procesos fotosintéticos por alteraciones en la antena colectora lumínica (Raven Willwater, 2018). También se evidencia una reducción en el tamaño y tiempo de aparición de la hoja, siendo mayor en plantas expuestas a niveles de 50 μm de Cd (figura 4). En cuanto a los elevados contenidos de Cd, estos inhiben la germinación de la semilla por reducción de la absorción de agua (imbibición) y nutrientes; asimismo, se alteran los procesos de respiración, diferenciación celular y metabolismo del N, que inciden en la emisión de macollas (Raven Willwater, 2018).

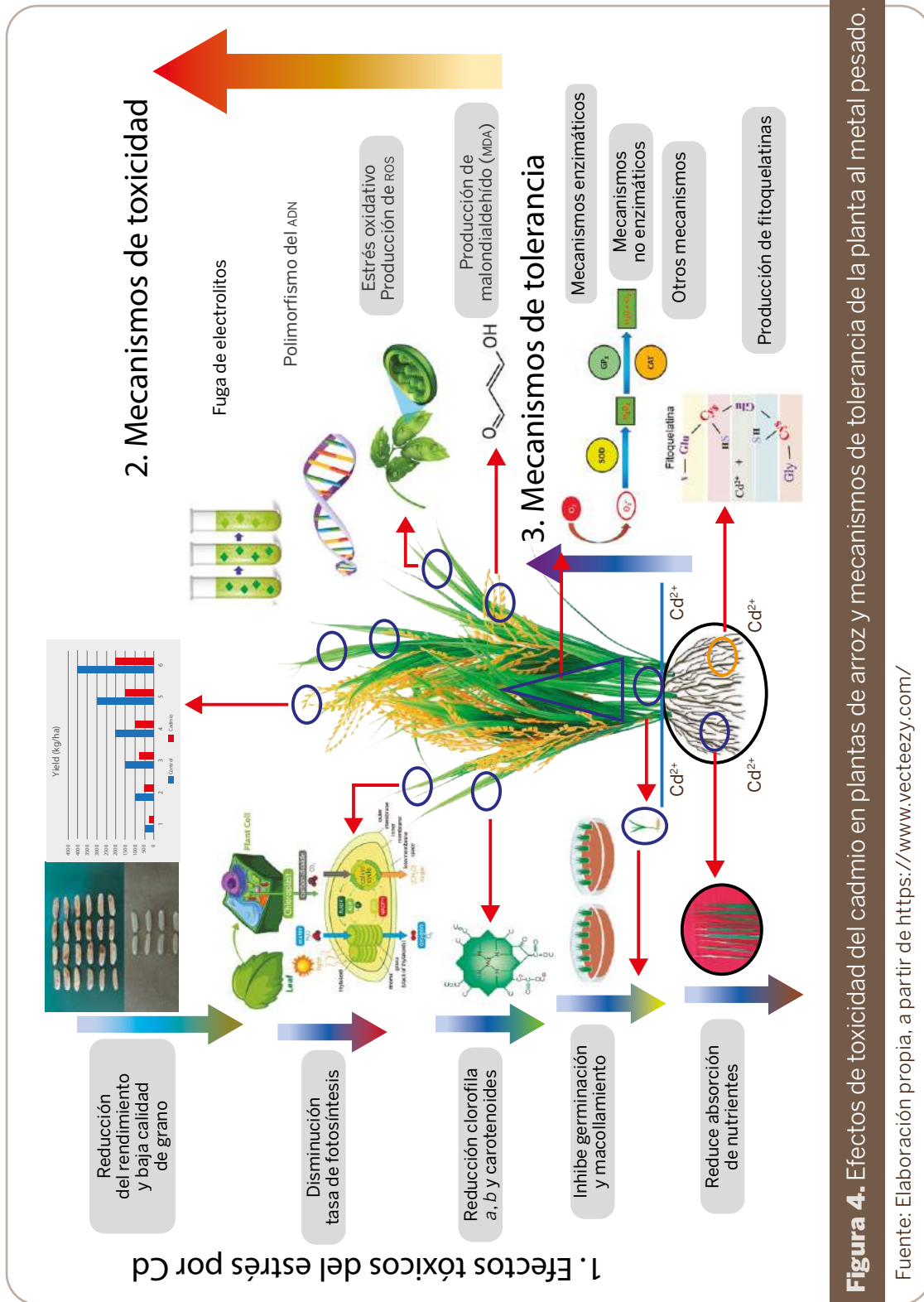


Figura 4. Efectos de toxicidad del cadmio en plantas de arroz y mecanismos de tolerancia de la planta al metal pesado.

Fuente: Elaboración propia, a partir de <https://www.vecteezy.com/>

Mecanismos de toxicidad de cadmio en plantas de arroz

Existen mecanismos de toxicidad relacionados con el estrés por altos contenidos de Cd a nivel de planta; por ejemplo, la fuga de electrolitos, que es la permeabilidad generada por pérdida de la estructura de la membrana y de las paredes celulares que alteran las relaciones hídricas y la distribución de los micro y macronutrientes, el polimorfismo del ADN, generado por las roturas en las cadenas de ADN, la formación de micronúcleos y las aberraciones cromosómicas (Rahman et al., 2021). Igualmente, se reporta estrés oxidativo por producción de especies reactivas de oxígeno “ROS” ($O_2^{\bullet-}$, $HO^{\bullet-}$ y H_2O_2) que se generan por la producción indirecta, debido al debilitamiento de barreras enzimáticas y no enzimáticas de los cloroplastos, peroxisomas y mitocondrias. Incluso, se genera una sobreproducción de malondialdehído (MDA) producto de la peroxidación lipídica, que expresa el daño oxidativo, y su concentración indica el grado y la duración del estrés.

Mecanismos de tolerancia del arroz a la presencia de cadmio

Los mecanismos de tolerancia al estrés por Cd más comunes en plantas de arroz son los enzimáticos, los cuales generan producción de las enzimas superóxido (dismutasa [SOD], catalasa [CAT], ascorbato peroxidasa [APX] y glutatión reductasa [GR]), y los no enzimáticos, que estimulan la producción de ascorbato y glutatión (antioxidantes del ciclo del ascorbato-glutatión), así como la producción de carotenoides y α -tocoferol (Sohag et al., 2020). De igual forma, existen otros mecanismos que estimulan el sistema de defensa antioxidante, como la osmorregulación, la homeostasis iónica, la sobreproducción de moléculas de señalización y la regulación de crecimiento (PGR) (Lakaew et al., 2021). Lo anterior genera una producción de fitoquelatinas que participan en la retención del Cd en las raíces a través de la quelación con compuestos tioles no proteicos (NPT) (Pál et al., 2017).