

Fitotoxicidad del Mercurio en las Plantas: reseña

Con el advenimiento de la revolución industrial, la contaminación con metales pesados se volvió una preocupación cada vez mayor. Por eso, es de vital importancia entender el grado de la toxicidad en plantas y animales y las consecuencias que trae la ingestión de alimentos contaminados. El mercurio (Hg) se modifica fácilmente adoptando varios estados de oxidación y puede estar disperso en muchos ecosistemas. Debido a la reaparición de la contaminación por mercurio y a la falta de conocimientos sobre el efecto de este metal pesado en las plantas, el propósito del presente texto es proporcionar una reseña amplia de la bibliografía relativa a la fitotoxicidad por mercurio.

Contaminación con metales pesados: un problema ambiental

La agricultura tuvo un efecto de enorme importancia sobre los seres humanos, al ser la fuerza principal que estaba atrás del pasaje de sociedad buscadora de comida a través de la reunión de cazadores, a sociedad sedentaria, convirtiéndose en herramienta crucial para la sustentabilidad humana y el desarrollo de la economía en todo el mundo. Sin embargo, ese pasaje a sociedad sedentaria y en permanente desarrollo estuvo acompañado por una transformación drástica del ambiente y la consecuente exposición a riesgos nuevos causados directa o indirectamente por esas transformaciones [1].

Uno de los muchos riesgos nuevos que pudieron haber afectado a esas primeras sociedades fue la exposición continua a contaminantes, concretamente a metales pesados. Los primeros casos de exposición humana, además de los fenómenos naturales se producen en la Tierra (por ejemplo, volcanes y constituyentes de las rocas) pronto se vieron reforzados por la descarga inadvertida de estos elementos en el ambiente, como consecuencia de las actividades humanas como, por ejemplo, la extracción y la fundición de minerales [2, 3]. Desde entonces, y con el advenimiento de la revolución industrial, la contaminación con estos metales se convirtió en una preocupación cada vez mayor [4, 5]. Por añadidura, debido a la estabilidad que tienen y a que no se los puede degradar, los metales pesados tienen tendencia a acumularse y a diseminarse con facilidad en una amplia variedad de ecosistemas [6]. En la mayoría de los casos la contaminación es resultado de aplicaciones industriales, la minería, la fundición de metales, la combustión y sus subproductos. A partir de estas fuentes, en el ecosistema pueden estar presentes contaminantes en forma de partículas que viajan

por Raquel Azevedo y
Eleazar Rodríguez

Traducción:
Daniel Yagolkowski
dyagol@yahoo.com.ar

(*) Este artículo es una traducción del artículo: Phytotoxicity of Mercury in Plants: A Review. Autor Raquel Azevedo & Eleazar Rodríguez, publicado en *Journal of Botany*, 2012, Vol. 2012: 6 pags.

por el aire, aguas servidas y fango [7], que no sólo contaminan los terrenos próximos a la fuente, sino sitios ubicados a miles de kilómetros de distancia.

Dentro de los muchos sucesos de polución de ecosistemas ocasionada por metales pesados, prontamente viene a la memoria la magnitud y el alcance del desastre de Minamata (1950), que tomó por sorpresa al mundo respecto de los daños que la exposición prolongada a ellos puede inducir en el organismo. El mercurio (Hg) fue el principal contaminante y las enfermedades relacionadas ulteriores produjeron 2.265 muertos, nada más que por la exposición directa al Hg [8].

La liberación descontrolada de sustancias sumamente contaminantes que provienen de desechos de minería (por ejemplo, cianuro, arsénico, Hg y sulfuros) en la región de Oruro (Bolivia) transformó un ecosistema singular en un desierto. Casi 53.000 habitantes padecen la contaminación del agua, la salinización y la desertificación de miles de metros cuadrados de tierra, además de las enfermedades y la muerte de seres humanos y ganado que se relacionan con la exposición a esos contaminantes [9].

A mediados de la década de 1980, en el valle superior del Rin, para extinguir un enorme incendio se utilizó agua que llevaba 30 toneladas de un fungicida que contenía Hg: el considerable aumento de los niveles de Hg condujo a la mortandad de peces en una superficie de más de 100 km² [10].

En 1998, se contaminó una reserva natural de España, después de la ruptura de una represa, lo que liberó fango y aguas servidas contaminadas. Las aguas servidas ingresaron en el río Guadiana, contaminándolo con metales pesados tales como cadmio, plomo, zinc y cobre. Afectó una superficie de 4.634 hectáreas, afectando 2.703 ha. con fango y 1.931 ha. con agua ácida. Los expertos estimaron que el santuario de aves más grande de Europa, así como la agricultura y las pesquerías de España, sufrirían un daño permanente por la contaminación que se había acumulado en el ecosistema.

Debido a los peligros críticos para la salud humana y el ambiente que se relacionan con los metales pesados [11, 12], los científicos estuvieron estudiando sus efectos, haciendo más hincapié sobre la bioremediación/quelación de los iones metálicos por parte de organismos [13] y el grave efecto sobre los seres humanos [3].

Entre los diferentes modelos de que se dispone para estudiar la toxicidad con metales pesados, las plantas presentan algunos rasgos únicos que las convierten en sujetos interesantes para este tipo de ensayos. En primer lugar, en su carácter de productores primarios de la cadena alimentaria, es de suma importancia comprender el efecto tóxico de este metal en el estado de las plantas, así como los peligros que las biomagnificaciones que estos tóxicos plantean

para los consumidores. Asimismo, debido a que las plantas carecen de la capacidad de escapar de sitios contaminados, estos organismos desarrollaron mecanismos para enfrentar la exposición a los tóxicos [14]. Por ejemplo, algunas especies pueden regular la cantidad de contaminantes que se toma del ambiente circundante, recurrir a la secuestración y la inactivación en compartimientos subcelulares [15] o tolerar el efecto dañino de los metales pesados. Baker, en 1981 [16] propuso la clasificación de las plantas, en función de su capacidad para acumular tóxicos, en tres categorías: exclusoras, acumuladoras e indicadoras. Las exclusoras son todas aquellas que pueden crecer en suelos contaminados, al tiempo que mantienen la concentración de tóxicos en niveles bajos, en comparación con las concentraciones que hay en el suelo. Las acumuladoras son aquellas especies que pueden sobrevivir a pesar de concentrar, en la parte aérea, contaminantes en altas dosis. Las plantas a las que se considera indicadoras pueden regular la captación y el transporte del contaminante hacia la parte aérea, siendo la concentración interna, a menudo, similar a la que se observa en el suelo [17].

Entre los metales pesados a los que la Unión Europea considera de máxima preocupación, algunos fueron blanco de muchas investigaciones (por ejemplo, el cadmio (Cd)), en tanto que, para otros metales, el nivel de comprensión de su mecanismo y de su grado de fitotoxicidad (por ejemplo, el Hg) es insuficiente.

La toxicidad de los metales y sus compuestos depende en gran medida de su bioasequibilidad, es decir, de los mecanismos de captación a través de la membrana celular, de distribución intracelular y de unión con macromoléculas celulares [18]. Sobre la base de la bibliografía disponible se coincide, en general, en que a la mecánica que desarrolla la toxicidad de los metales pesados la origina un patrón complejo de interacciones entre macromoléculas celulares y los iones metálicos. El ingreso del metal en la célula puede movilizar varios senderos metabólicos y de transducción de señales, así como procesos genéticos, para neutralizar la fuente de toxicidad [18]. Aunque la toxicidad relativa de diferentes metales para las plantas puede variar en función del genotipo y de las condiciones de experimentación, la mayoría de los metales pesados actúa a través de uno de las siguientes maneras: cambios en la permeabilidad de la membrana celular, reacciones de grupos sulfhidrilo (-SH) con cationes, afinidad para reaccionar con grupos fosfato y grupos activos de ADP o ATP, reemplazo de iones esenciales y estrés oxidativo [13, 19].

En consecuencia, en varios laboratorios se ha prestado considerable atención a la comprensión de los detalles estructurales, cinéticos y termodinámicos de estas interacciones, como requisito clave para desentrañar, y discurrir sobre, los mecanismos de

acción y el papel fisiológico que desempeñan los iones metálicos en los sistemas vivos (por ejemplo, [20, 21]).

En el caso del Hg se sabe que este metal se modifica fácilmente adoptando varios estados de oxidación y también que se esparce a través de muchos ecosistemas [22, 23]. Estas modificaciones se pueden resumir en dos ciclos principales, uno que tiene lugar en grado global y que entraña la circulación de mercurio como elemento (Hg^0) en la atmósfera. La otra, con un alcance bajo, depende de la intervención de organismos que pueden metilar el mercurio inorgánico, convirtiéndolo en compuestos orgánicos, estos últimos siendo los más tóxicos para los organismos vivos [22].

Debido a la repetición de la contaminación con Hg y también debido a la carencia de conocimientos sobre el efecto de este metal pesado en las plantas, es urgente evaluar y entender el grado de fitotoxicidad inducida por el Hg. En el pasado, las respuestas de manejo y regulatorias del problema de la bioacumulación se vieron constreñidas por la falta de información sobre fuentes, métodos de transporte, interacción química y trascendencia biológica del Hg en el ambiente. Para abarcar el alcance de la toxicidad y las propiedades que vuelven a este metal pesado tan interesante para estudiarlo, las secciones que siguen de la introducción se han de dedicar a ilustrar al lector respecto del Hg, principalmente su forma inorgánica (Hg^{2+}), que es la forma predominante en los suelos dedicados a la agricultura y, por eso, el más interesante para el presente trabajo de investigación.

Formas Químicas del Hg

Entre los metales, el Hg es singular por el hecho de que en el ambiente se lo encuentra en varias formas físicas y químicas como, por ejemplo, Hg elemental (Hg^0), Hg inorgánico (Hg^{2+}), asociado con iones (SHg , $ClHg_2$), cloruro de mercurio o calomel (Hg_2Cl_2) y Hg orgánico (por ejemplo, CH_3-Hg) [8, 23, 24].

El Hg es un metal con propiedades diferentes y singulares respecto de las de otros metales de transición y es el único que, en condiciones ambientales normales, existe en forma líquida. Es buen conductor de la electricidad, por lo que encuentra aplicación en muchos campos tecnológicos tales como informática, fabricación de baterías y de lámparas.

La elevada solubilidad en agua y la facilidad con la que el Hg pasa a la fase gaseosa [23] son dos de las propiedades más importantes de este metal pesado. Estas propiedades explican la capacidad y la eficacia del Hg para entrar en varios ecosistemas y permanecer en la atmósfera durante lapsos prolongados, depositándose más tarde en el suelo o en cuerpos de agua [25].

El Hg puede formar sales con oxígeno, azufre, cloro, y amalgamas (aleaciones) con la mayoría de los metales, con la salvedad del hierro y del platino. Las formas inorgánicas de Hg pueden comprender el vapor de Hg y la forma líquida y el Hg mercurio. El líquido es volátil y libera un gas monoatómico al que, por lo usual, se denomina vapor de Hg. Esta especie desempeña un papel clave en la circulación global del metal pesado, porque puede existir como catión con un estado de oxidación de 1^+ (mercurioso) o 2^+ (mercúrico) [22, 23].

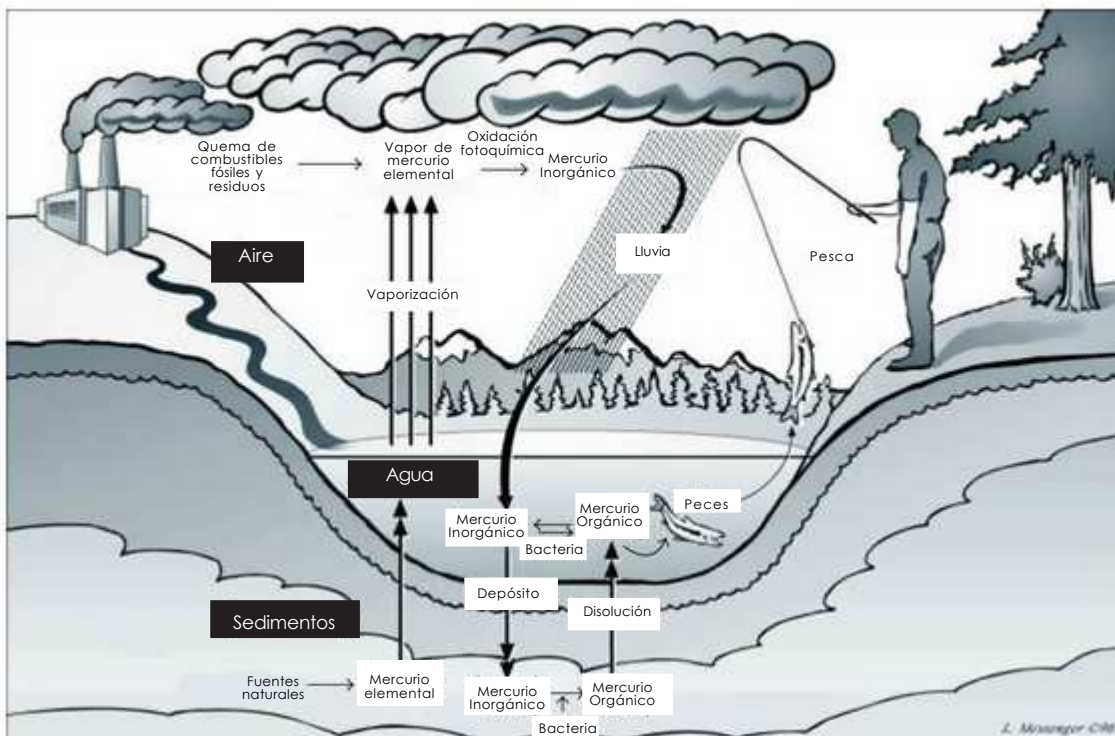


Figura 1. El ciclo biogeoquímico del Hg. Dicho brevemente, empieza con la evaporación de Hg desde fuentes naturales y antropogénicas; después se oxida a Hg inorgánico. A este elemento lo dispersa la lluvia. Una vez en el suelo, las bacterias lo pueden transformar en compuestos orgánicos.

Imagen modificada a partir de: http://www.mercury.utah.gov/atmospheric_transport.htm

El primer estado de oxidación (Hg^+) es la forma de Hg mercurioso y se lo encuentra en la forma de calomel y cloruro mercurioso (Hg_2Cl_2). Tal como se muestra en la Figura 1, el mercurio mercúrico (Hg^{2+}) forma el estado bivalente del ciclo del Hg y es responsable de la formación de prácticamente todas las formas inorgánicas y orgánicas que se encuentran en el ambiente y los seres vivos. El Hg^{2+} es producto del metabolismo del vapor de Hg, así como del de los compuestos orgánicos de Hg. Debido a estas propiedades, esta forma desempeña un papel clave en el ciclo del Hg y en la toxicología de este metal pesado en los organismos vivos [23].

Niveles altos de esta forma tienen poderosos efectos fitotóxicos. Cuando están presentes en concentraciones tóxicas pueden inducir lesiones visibles y perturbaciones fisiológicas en las células vegetales, al disparar la producción de EOR (especies de oxígeno reactivo), lo que genera trastornos celulares. El Hg mercúrico tiene una gran afinidad por los grupos tiol, en especial por los aniones R-S. La facilidad del desplazamiento entre los grupos tiol y de ingreso en las células se debe a la alta velocidad a la que tienen lugar las reacciones reversibles entre las formas iónicas del Hg. Cuando el Hg mercúrico está en forma de sales solubles en agua, como el cloruro de Hg, puede ser un veneno muy poderoso: por cierto, las leyendas dicen que el emperador chino Qin Shi Huang, el primero que unificó China, murió después de ingerir pastillas preparadas por sus médicos en un intento por obtener la inmortalidad.

Los estudios relativos a la toxicidad del Hg se hicieron mayormente en animales y seres humanos, pues se sabe que el Hg está conectado con enfermedades autoinmunitarias [26]. La toxicidad de las formas de Hg inorgánico (por ejemplo $HgCl_2$) se explica, por lo menos en parte, por la gran afinidad de este elemento por las biomoléculas que contienen grupos sulfhidrilo (SH) [27] y por una menor afinidad por los grupos carboxilo, amida y amina [27]. El Hg inorgánico llega a los ecosistemas como resultado de la circulación de Hg y, cuando están presentes las condiciones adecuadas, el Hg^{2+} se puede transformar en las formas de Hg orgánico.

Algunos organismos, como las bacterias o los hongos, pueden modificar de manera natural el Hg que hay disponible en el ambiente (Hg^{2+}) mediante la metilación de este ion, lo que hace que el producto final sea más peligroso y tóxico que su precursor [5, 22, 23]. Las formas orgánicas más comunes son el metilo-Hg (CH_3-Hg^+) y el etilo-Hg que, a pesar de las diferencias químicas, tienen propiedades similares. El metilo-Hg es el más tóxico de los organocompuestos [23, 28]. Se lo produce por biometilación y se lo puede incorporar a las cadenas tróficas, principalmente a las acuáticas. Se cree que el catione organomercurial intacto es el agente tóxico responsable del daño que se provoca en las células: por ejemplo, en los seres humanos el Hg se puede modificar a metilo-Hg, que tiene la

capacidad de ocasionar daños en el sistema nervioso, el hígado y, en última instancia, producir la muerte por falla de muchos órganos [29].

Aplicaciones Antiguas y Modernas del Hg

El Hg y sus compuestos han sido utilizados por la humanidad desde la época de las civilizaciones más antiguas de que se tenga registro. Al Hg se lo extrajo de minas durante siglos. Almadén (término que proviene del árabe y significa «el metal») es una de las minas más grandes del mundo y se la utilizó para extraer Hg desde la época del imperio romano, para la producción de explosivos [23]. Los egipcios empleaban este metal pesado como compuesto medicinal y, en las tumbas, como conservador. En medicina, la utilización de productos basados sobre mercurio abarcó tanto como los tratamientos para la sífilis y diversas afecciones de la piel; se lo empleó como antiséptico o para tratar problemas diuréticos y quimioterapéuticos. Componentes de Hg también se emplearon para producir sombreros de alta calidad: al nitrato de Hg se lo aplicó para tratar las pieles que se usaba para fabricar sombreros.

Desde la era de la industrialización, al Hg se lo usó como compuesto de equipos eléctricos, baterías y explosivos. También se lo empleó en medicina, cosmetología y para aplicaciones agrícolas [19]. Actividades como la fundición de cobre y plomo y la extracción de metales preciosos (por ejemplo, oro y plata) aportan un elevado porcentaje de la contaminación con Hg de los sistemas acuáticos [30]. La combustión de combustibles fósiles, las industrias clorocalcina, de producción de equipos eléctricos y de fabricación de pintura son las principales consumidoras de Hg [19, 31].

Todas estas actividades antropogénicas fomentan la acumulación de este metal pesado en ecosistemas terrestres y acuáticos, la que puede perdurar en estos sitios y en los organismos vivos durante más de cien años posteriores al cierre de la fuente de contaminación [23, 31].

Es comprensible que el Hg y sus compuestos planteen un gran dilema para quienes se interesan en hacer uso de las muchas propiedades de ese metal: si, por un lado, el Hg tiene ventajas importante y útiles, por el otro tiene su gran toxicidad y su fácil dispersión en el seno de diferentes ecosistemas.

Incorporación del Hg por las Plantas

A menudo, la contaminación de los suelos con Hg se debe al agregado de este metal pesado como parte de los fertilizantes, de la cal, de los lodos y del estiércol. La dinámica entre la cantidad de Hg que existe en el suelo y su incorporación por las plantas no es lineal y depende de varias variables (por ejemplo, la

capacidad de intercambio catiónico, el Ph del suelo, la aereación del suelo y la especie de planta). La incorporación se puede reducir cuando el pH del suelo es alto o cuando hay abundancia de cal y sales, o cuando se dan estas dos situaciones a un mismo tiempo [13,19].

De hecho, otro factor que afecta el nivel de acumulación de Hg es la especie y la variedad [32]: por lo menos 45 familias de plantas comprenden especies que acumulan metales [33]. La mayoría de las plantas que incorporan Hg tienden a acumularlo en las raíces [31] y algunas hasta tienen la capacidad de acumular cantidades moderadas en los brotes [34, 35], ya fuere debido a la translocación o bien a la absorción directa de la forma de vapor. El trabajo hecho por Suszcynsky y Shann [36] demostró que las plantas expuestas a Hg⁰ pueden incorporarlo y acumularlo en los brotes, pero no hay translocación a las raíces.

Se cree que los iones de metales tóxicos ingresan en las células de las plantas según el mismo proceso de incorporación que el de los micronutrientes y que compiten con estos elementos por la absorción. El Hg, que es un metal de clase B [14], se liga, de preferencia, con ligandos azufre y nitrógeno y se piensa que entra en la célula a través de canales iónicos que compiten con otros metales pesados como cadmio o con metales esenciales como cinc, cobre y hierro [37]. Sin embargo, esta información se basa principalmente sobre experimentos hechos con células animales y los autores del presente trabajo tienen la convicción de que la incorporación de Hg puede tener lugar a través de otros procesos que aún no están claros.

Fitotoxicidad Inducida por el Hg

Efectos Generales. La interacción entre el Hg y los sistemas vegetales tiene una importancia especial, debido a la gran utilización en los desinfectantes de semillas, los fertilizantes y los herbicidas [38]. Ross y Stewart, 1962 [39] demostraron que algunos de los compuestos de Hg que se utiliza sobre el follaje en carácter de fungicidas se pueden translocar y redistribuir en las plantas.

En el nivel celular, los posibles mecanismos que los metales pesados pueden dañar comprenden el bloqueo de moléculas importantes (por ejemplo, enzimas y polinucleótidos), el transporte de iones esenciales, el desplazamiento o la sustitución de iones metálicos de las moléculas (tales como el Mg de la clorofila), la desnaturalización o la inactivación de proteínas y la perturbación de las membranas celulares o de las organelas [13]. Con respecto al Hg, los mecanismos posibles de su fitotoxicidad pueden ser a través del cambio de la permeabilidad de la membrana celular, la elevada afinidad para reaccionar con los grupos sulfhidrilo (SH), la afinidad para reaccionar con los grupos fosfato y el remplazo de iones esenciales, y la capacidad del Hg para

perturbar funciones que comprendan proteínas cruciales o no protegidas [13, 19].

Se sabe que el Hg afecta el sistema de defensa por antioxidantes, al interferir con la modulación de los antioxidantes no enzimáticos como el glutatión (GSH) y los tioles no proteínicos (NPSH) y de los antioxidantes enzimáticos superóxido dismutasa (SOD), ascorbato peroxidasa (APX) y la glutatión reductasa (GR) [2, 40, 41].

A muchas formas del Hg se las relacionó con lesiones en las semillas y la reducción de la viabilidad de las semillas. Cuando el Hg interactúa con los grupos SH para formar el puente S-Hg-S, perturbando la estabilidad del grupo, puede afectar la germinación de las semillas y el crecimiento del embrión (tejidos ricos en ligandos SH). Se demostró que el cloruro de Hg reduce el alargamiento de las raíces primarias de *Zea mays*, así como la inhibición de la respuesta gravimétrica de las plántulas [13]. Ese mismo autor también discurre que, a medida que aumentaba la concentración de este metal pesado, disminuían las tasas de respiración celular de las plántulas de *Vigna radiata*, al igual que el contenido total de nitrógeno y azúcares y el contenido de ADN y ARN.

La exposición al Hg también puede reducir la fotosíntesis, la velocidad de la transpiración y la incorporación de agua y la síntesis de clorofila. Se demostró que tanto el Hg orgánico como el inorgánico causan la pérdida de potasio, magnesio y manganeso, y la acumulación de hierro [22]. Estas disminuciones explican los cambios de permeabilidad de la membrana celular, al comprometer su integridad. El Hg²⁺ es una de las formas del Hg que pueden afectar la membrana plasmática y que podrían explicar la toxicidad que se provoca en la parte aérea de la planta. Sin embargo, algunos autores creen que es el daño en las raíces lo que explica la toxicidad que se observa en los brotes.

Genotoxicidad. Los estudios que toman en cuenta la genotoxicidad del Hg son escasos y la mecánica celular y molecular que interviene en la toxicidad de este metal es prácticamente desconocida. Sin embargo se demostró que este metal pesado puede introducir errores letales en el material genético de las especies de plantas de cultivo para cosecha.

Dentro de las células, los iones Hg tienden a formar uniones covalentes, debido a sus fácilmente deformables capas de electrones externas. En el ADN se presentan varios sitios potencialmente reactivos para el enlace con Hg, que dependen de condiciones externas tales como la fuerza iónica, la presencia de diferentes iones competidores y la composición de la base [13].

Los efectos de las formas del Hg dependen de la concentración y del tiempo de exposición de las plantas, existiendo un efecto muy señalado en la fase S, que es cuando puede

inducir daños conducentes a una grave clastogenicidad [13].

La unión del Hg al ADN da por resultado efectos tóxicos potenciales; la incorporación crónica de metilo-Hg²⁺ en niveles subtóxicos da por resultado la destrucción de cromosomas en los seres humanos debido, presuntamente, a la interacción directa de esa molécula con el ADN [8]. En las plantas se demostró que dosis bajas de Hg pueden provocar la c-mitosis, intercambios entre cromátidas hermanas, aberraciones cromosómicas y alteraciones del huso [13].

A pesar de que la interacción de los iones metálicos con los átomos de azufre de los nucleósidos y los aminoácidos que llevan el grupo tiol proporcionó el mecanismo dominante para explicar la toxicidad del Hg, algunos efectos (por ejemplo, los efectos mutagénicos) no se pueden explicar por completo con este proceso. Los grupos ribosa/ribofosfato y las bases purina/pirimidina presentan varios átomos de N y O, que podrían ser sitios de unión potencial para el Hg. La ligazón del Hg a las nucleobases puede conducir a deficiencias de esas nucleobases; se sugirió que este fenómeno es pertinente para el potencial mutagénico del Hg: de esta manera, el Hg puede inducir la alteración de las secuencias de aminoácidos de las proteínas que se ha de sintetizar [29].

A pesar de todos estos aspectos, todavía hay muchos que se desconoce en cuanto a la genotoxicidad del Hg: concretamente, la

mecánica, el blanco y el grado de los efectos del Hg en las plantas.

Comentarios Finales

Tal como se lo exploró en todo este trabajo, el Hg es un contaminante crítico que se puede difundir con facilidad a través de muchos ecosistemas, produciendo varios efectos tóxicos en muchos procesos biológicos. Por desgracia se sabe muy poco sobre la fitotoxicidad inducida por el Hg, aun cuando las plantas adoptan un papel fundamental como base de muchas cadenas tróficas y, en particular, en la subsistencia y la economía humanas. Por consiguiente es necesario aumentar el nivel de conocimientos sobre los mecanismos mediante los cuales el Hg es incorporado a las plantas y sobre cuáles procesos son el blanco de este contaminante.

Lo poco que se conoce sobre la toxicidad de Hg se presenta en este trabajo, del que los autores tienen la esperanza de que pueda ser una fuente valiosa para otros investigadores que trabajen con la fitotoxicidad del Hg y que, posiblemente, persuada para la realización de ulteriores investigaciones en este campo de estudio.

Bibliografía

Nota: la bibliografía de la sección «Traducciones» es citada y reproducida tal cual figura en el artículo original.

1- A. R. Shetty, Metal anion removal from wastewater using Chi-tosan in a polymer enhanced diafiltration system, Master thesis in sciences, 2006.

2- D. L. Sparks, «Toxic metals in the environment: the role of sur-faces,» *Elements*, vol. 1, no. 4, pp. 193-197, 2005.

3- J. O. Duruibe, M. O. C. Ogwuegbu, and J. N. Egwurugwu, «Heavy metal pollution and human biotoxic effects,» *International Journal of Physical Sciences*, vol. 2, pp. 112-118, 2007.

4- S. C. Dunagan, M. S. Gilmore, and J. C. Varekamp, «Effects of mercury on visible/near-infrared reflectance spectra of mustard spinach plants (*Brassica rapa* P.)» *Environmental Pollution*, vol. 148, no. 1, pp. 301-311, 2007.

5- L. Zhang and M. H. Wong, «Environmental mercury contamination in China: sources and impacts,» *Environment International*, vol. 33, no. 1, pp. 108-121, 2007.

6- V. K. Gupta, P. Singh, and N. Rahman, «Adsorption behavior of Hg(II), Pb(II), and Cd(II) from aqueous solution on Duolite C-433: a synthetic resin,» *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 275, no. 2, pp. 398-402, 2004.

7- M. Farrell and D. L. Jones, «Critical evaluation of municipal solid waste composting and potential compost markets,» *Bio-resource Technology*, vol. 100, no. 19, pp. 4301-4310, 2009.

8- F. Zahir, S. J. Rizwi, S. K. Haq, and R. H. Khan, «Low dose mercury toxicity and human health,» *Environmental Toxicology and Pharmacology*, vol. 20, no. 2, pp. 351-360, 2005.

9- L. Selander, P. Svan et al., *Occurrence and distribution of heavy metals in lake Poopo, Bolivia*, Master of Science Thesis in Environmental Engineering, 2007.

10- W. Giger, «The Rhine red, the fish dead—the 1986 Schweizer-halle disaster, a retrospect and long-term impact assessment,» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 16, supplement 1, pp. 98-111, 2009.

11- J. O. Nriagu, «A silent epidemic of environmental metal poisoning?» *Environmental Pollution*, vol. 50, no. 1-2, pp. 139—161, 1988.

12- M. J. McLaughlin, D. R. Parker, and J. M. Clarke, «Metals and micronutrients—food safety issues,» *Field Crops Research*, vol. 60, no. 1-2, pp. 143-163, 1999.

13- M. Patra, N. Bhowmik, B. Bandopadhyay, and A. Sharma, «Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance,» *Environmental and Experimental Botany*, vol. 52, no. 3, pp. 199-223, 2004.

- 14- P. C. Nagajyoti, K. D. Lee, and T. V. M. Sreekanth, «Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review,» *Environment-mental Chemistry Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 199-216, 2010.
- 15- G. Sarret, E. Harada, Y.-E. Choi et al., «Trichomes of tobacco excrete zinc as zinc-substituted calcium carbonate and other zinc-containing compounds,» *Plant Physiology*, vol. 141, no. 3, pp. 1021-1034, 2006.
- 16- A. J. M. Baker, «Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals,» *Journal of Plant Nutrition*, vol. 3, pp. 643-654, 1981.
- 17- J. R. Peralta-Videa, M. L. Lopez, M. Narayan, G. Saube, and J. Gardea-Torresdey, «The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain,» *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, vol. 41, no. 8-9, pp. 1665-1677, 2009.
- 18- D. Beyersmann and A. Hartwig, «Carcinogenic metal com-pounds: recent insight into molecular and cellular mecha-nisms,» *Archives of Toxicology*, vol. 82, no. 8, pp. 493-512, 2008.
- 19- M. Patra and A. Sharma, «Mercury toxicity in plants,» *Botani-cal Review*, vol. 66, no. 3, pp. 379-422, 2000.
- 20- E. Rodriguez, R. Azevedo, P. Fernandes, and C. Santos, «Cr(VI) induces DNA damage, cell cycle arrest and poly-ploidization: a flow cytometric and comet assay study in *Pisum sativum*,» *Chemical Research in Toxicology*, vol. 24, no. 7, pp. 1040-1047, 2011.
- 21- E. Rodriguez, C. Santos, R. Azevedo, J. Moutinho-Pereira, C. Correia, and M. C. Dias, «Chromium (VI) induces toxicity at different photosynthetic levels in pea,» *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 53, pp. 94-100, 2012.
- 22- D. W. Boening, «Ecological effects, transport, and fate of mer-cury: a general review,» *Chemosphere*, vol. 40, no. 12, pp. 1335— 1351, 2000.
- 23- T. W. Clarkson and L. Magos, «The toxicology of mercury and its chemical compounds,» *Critical Reviews in Toxicology*, vol. 36, no. 8, pp. 609-662, 2006.
- 24- T. W. Clarkson, J. B. Vyas, and N. Ballatori, «Mechanisms of mercury disposition in the body,» *American Journal ofIndu- trial Medicine*, vol. 50, no. 10, pp. 757-764, 2007.
- 25- D. Y. Yang, Y. W. Chen, J. M. Gunn, and N. Belzile, «Selenium and mercury in organisms: interactions and mechanisms,» *Environmental Reviews*, vol. 16, pp. 71-92, 2008.
- 26- S. R. Pheng, C. Auger, S. Chakrabarti, E. Massicotte, and L. Lamontagne, «Sensitivity to methylmercury-induced autoim-mune disease in mice correlates with resistance to apoptosis of activated CD4+ lymphocytes,» *Journal of Autoimmunity*, vol. 20, no. 2, pp. 147-160, 2003.
- 27- S. Iglesia-Turino, A. Febrero, O. Jauregui, C. Caldela, J. L. Araus, and J. Bort, «Detection and quantification of unbound phytochelatin 2 in plant extracts of *Brassica napus* grown with different levels of mercury,» *Plant Physiology*, vol. 142, no. 2, pp. 742-749, 2006.
- 28- J. J. Berzas Nevado, R. C. Rodriguez Martin-Doimeadios, F. J. Guzman Bernardo et al., «Mercury in the Tapajos River basin, Brazilian Amazon: a review,» *Environment International*, vol. 36, no. 6, pp. 593-608, 2010.
- 29- R. K. Zalups, «Molecular interactions with mercury in the kidney,» *Pharmacological Reviews*, vol. 52, no. 1, pp. 113-143, 2000.
- 30- D. Cargnelutti, L. A. Tabaldi, R. M. Spanevello et al., «Mer-cury toxicity induces oxidative stress in growing cucumber seedlings,» *Chemosphere*, vol. 65, no. 6, pp. 999-1006, 2006.
- 31- M. Lenka, K. K. Panda, and B. B. Panda, «Monitoring and assessment of mercury pollution in the vicinity of a chloralkali plant—4. Bioconcentration of mercury in situ aquatic and terrestrial plants at Ganjam, India,» *Archives ofEnvironmental Contamination and Toxicology*, vol. 22, no. 2, pp. 195-202, 1992.
- 32- S. P. McGrath, F. J. Zhao, and E. Lombi, «Plant and rhi-zosphere processes involved in phytoremediation of metal-contaminated soils,» *Plant and Soil*, vol. 232, no. 1-2, pp. 207-214, 2001.
- 33- R. D. Reeves and A. J. M. Baker, «Metal-accumulating plants,» in *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment*, I. Raskin and B. D. Ensley, Eds., pp. 193-229, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2000.
- 34- V. Dushenkov, P. B. A. N. Kumar, H. Motto, and I. Raskin, «Rhizofiltration: the use ofplants to remove heavy metals from aqueous streams,» *Environmental Science & Technology*, vol. 29, pp. 1239-1245, 1995.
- 35- P. B. A. N. Kumar, V. Dushenkov, H. Motto, and I. Raskin, «Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils,» *Environmental Science & Technology*, vol. 29, pp. 1232-1238, 1995.
- 36- E. M. Suszcynsky and J. R. Shann, «Phytotoxicity and accumu-lation of mercury in tobacco subjected to different exposure routes,» *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 14, no. 1, pp. 61-67, 1995.
- 37- M. E. Blazka and Z. A. Shaikh, «Cadmium and mercury accu-mulation in rat hepatocytes: interactions with other metal ions,» *Toxicology and Applied Pharmacology*, vol. 113, no. 1, pp. 118-125, 1992.
- 38- A. Cavallini, L. Natali, M. Durante, and B. Maserti, «Mercury uptake, distribution and DNA affinity in durum wheat (*Trit- icum durum* Desf.) plants,» *Science of the Total Environment*, vol. 243-244, pp. 119-127, 1999.
- 39- R. G. Ross and D. K. R. Stewart, «Movement and accumulation of in apple tree and soil,» *Canadian Journal of Plant Science* , vol. 42, pp. 280-285, 1962.
- 40- C. Ortega-Villasante, R. Rellain-Alvarez, F. F. del Campo, R. O. Carpena-Ruiz, and L. E. Hernandez, «Cellular damage induced by cadmium and mercury in *Medicago sativa*,» *Jour-nal of Experimental Botany*, vol. 56, no. 418, pp. 2239-2251, 2005.
- 41- M. Israr, S. Sahi, R. Datta, and D. Sarkar, «Bioaccumulation and physiological effects of mercury in *Sesbania drummondii*,» *Chemosphere*, vol. 65, no. 4, pp. 591-598, 2006.

Traducción y adaptación:

Daniel Yagolkowski
 Traductor Público Nacional
<http://www.danielyagolkowski.com.ar>
dyagol@yahoo.com.ar