
LA CONTAMINACIÓN CON CADMIO EN SUELOS AGRÍCOLAS*

Cadmium contamination in agricultural soils

Teodoro Herrera Marcano¹

¹ Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay, estado Aragua, Venezuela

*Trabajo presentado a solicitud del Comité Editorial de Venesuelos

Resumen

El cadmio es un metal pesado que se ha asociado a varios graves problemas de salud humana. La existencia en suelos agrícolas de niveles crecientes del metal genera gran preocupación ambiental debido a su movilidad y a la facilidad con que es absorbido por las plantas. En el presente trabajo se hace una revisión sobre el origen del cadmio en el suelo y los factores de suelo y planta que influyen en su absorción por los cultivos. Se revisan también las principales estrategias para reducir su biodisponibilidad y movilidad del cadmio en suelos contaminados.

Palabras claves: biodisponibilidad, cadmio, contaminación, metales pesados, suelos.

Abstract

Cadmium is a heavy metal that has been associated with a variety of severe health problems on human beings. The presence of increasing levels of the metal in agricultural soils causes a great ecological concern due to its mobility and easiness of absorption by plants. In the present work, a revision is made on the cadmium origin in soils as well as on the soil and plant factors that affect its uptake by crops. The main strategies for reducing cadmium bioavailability and mobility in contaminated soils are also examined.

Key words: Bioavailability, cadmium, contamination, heavy metals, soils.

INTRODUCCIÓN

La intoxicación con cadmio se ha asociado a varios problemas de salud humana entre los cuales se encuentran: deficiencias renales, enfisema pulmonar, osteoporosis, hipertensión arterial y algunas formas de cáncer como el prostático.

El cadmio entra al organismo principalmente por vía oral y en menor proporción mediante inhalación. El ingreso por vía oral ocurre en la mayoría de los casos a través del consumo de alimentos, bien sean de origen vegetal o animal, procedentes de zonas contaminadas. En los últimos años se ha reportado un progresivo aumento en los niveles de cadmio en algunos suelos agrícolas como consecuencia de una prolongada fertilización fosfatada, y se ha llamado la atención sobre la posibilidad de mayores incrementos en otros suelos debido al uso agrícola de lodos residuales.

La inhalación es una vía de ingreso del cadmio al organismo que tiene importancia más que todo local, cuando ocurre como inhalación de polvo en la proximidad de minas o de vapores en la cercanía de fundiciones. Otra fuente de inhalación de vapores de cadmio es el tabaco. Las plantas de tabaco tienden a acumular cadmio en las hojas y con frecuencia los cultivos de tabaco son objeto de una abundante fertilización fosfática, que puede producir un incremento en los niveles de cadmio en los suelos.

El presente trabajo tiene por objeto revisar, de forma general y tomando en cuenta los resultados de investigaciones científicas recientes, las causas que originan la contaminación con cadmio en los suelos agrícolas, el efecto de los diferentes componentes del suelo sobre la disponibilidad del elemento para las plantas y los procedimientos que es posible aplicar para disminuir la absorción del metal por los cultivos.

Características y uso del elemento

El cadmio es un elemento del Grupo II-B de la Tabla Periódica, situado entre el Zn y el Hg, y por lo tanto con características similares a éstos. Su número atómico es 48 y por su configuración electrónica terminal $4d_{10} 5s_2$, su ion monoatómico más estable es el Cd^{2+} . En la naturaleza se le encuentra asociado al cinc, cobre y plomo. Presenta gran afinidad por el azufre, de allí que su compuesto natural más común es el CdS. Otros compuestos comunes son: CdO, CdCl₂, Cd(OH)₂. Se le usa principalmente en la fabricación de baterías y pinturas, en el recubrimiento de superficies metálicas para protegerlas de la oxidación, como componente de aleaciones para soldaduras de bajo punto de fusión y en la industria química en procesos catalíticos. En el análisis cualitativo se le determina mediante precipitación como sulfuro con otros elementos del Grupo II y se le separa del cinc valiéndose de su insolubilidad en los hidróxidos de metales alcalinos.

El cadmio en los suelos

El nivel promedio de cadmio en suelos ha sido ubicado entre 0,07 y 1,1 mg.kg⁻¹, con un nivel base natural que no excedería de 0,5 mg.kg⁻¹ (Kabata-Pendías y Pendías, 1984). Algunos suelos pueden tener niveles de cadmio elevados porque las rocas de las que se formaron tenían el elemento en su composición.

Una de las vías de incorporación del cadmio a los suelos agrícolas es la fertilización fosfática. Las rocas fosfóricas, que son la materia prima de todos los fertilizantes fosfáticos, contienen niveles de metales pesados que varían según su origen geográfico, pero que generalmente son superiores al promedio de la corteza terrestre. Los metales permanecen en una proporción importante en los fertilizantes industriales y posteriormente son aplicados al suelo junto con el fósforo. (Charter *et al.*, 1993; Mermut *et al.*, 1996; Mortvedt, 1996; Gabe y Rodella, 1999).

A partir de las aguas residuales urbanas se obtienen lodos que por su contenido de nutrientes son usados en la fertilización de algunos cultivos y que debido a sus altos niveles en materia orgánica se ha comprobado que pueden ser útiles en la recuperación de suelos afectados por procesos de desertificación (García *et al.*, 1994; Ayuso *et al.*, 1996; Summer, 2000). Cuando estos lodos provienen de aguas que han recibido efluentes industriales, su aplicación continua en áreas agrícolas puede producir la acumulación de estos elementos en los suelos (Jing y Logan, 1992; Taylor *et al.*, 1995; Canet *et al.*, 1998; Krebs *et al.*, 1998; Kawasaki *et al.*, 2000). Entre los metales pesados que pueden estar presentes en los lodos, el cadmio es el que genera más riesgos ambientales por su movilidad en los suelos y la facilidad con que es absorbido por las plantas.

Fuentes de contaminación con cadmio de importancia más local y con menor incidencia en los suelos agrícolas, son los aportes aéreos, en forma de polvo y vapores, provenientes de explotaciones mineras, de fundiciones de metales y de plantas incineradoras. Los materiales fósiles o sus derivados que se usan como combustibles contienen metales pesados y éstos pasan a la atmósfera volatilizados o en cenizas para luego ser depositados en los suelos, la cubierta vegetal y las masas de agua, pudiendo producir contaminación de la cadena trófica. Los metales presentes en el carbón mineral pueden originar contaminación en áreas próximas a plantas termoeléctricas (Flores y Martins, 1997) y se han encontrado mayores niveles de cadmio en suelos urbanos y cercanos a vías de fuerte tránsito automotor. (Lavado *et al.*, 1998; Andrades Rodríguez *et al.*, 2000).

El cadmio de origen antropogénico, generalmente presente en los horizontes superficiales, será más disponible que el proveniente de la meteorización de rocas, pero su absorción por las plantas depende de factores del suelo y del cultivo. Aquellos factores y condiciones del suelo que favorezcan la movilidad del elemento también facilitarán la absorción por las plantas, mientras que los que contribuyan a su retención por la matriz del suelo disminuirán la disponibilidad del elemento.

En general, mientras mayor sea el pH del suelo, mayor será la retención del cadmio. Hay varias razones para ello, entre ellas la formación de especies con menor densidad de carga negativa por la unión del ion metálico con los iones OH⁻ y el incremento de las cargas negativas en la superficie de óxidos o de otros materiales de carga variable donde el ion metálico puede adsorberse (Pardo y Guadalix, 1995; Naidu, *et al.*, 1997; Pardo, 1997; Wu *et al.*, 2000). La presencia de carbonatos también contribuye a la retención del cadmio en formas poco disponibles para las plantas (Cala Rivero *et al.*, 1997; Hooda y Alloway, 1998; García *et al.*, 2000).

La mineralogía de los suelos también puede ser determinante en la disponibilidad de cadmio para las plantas. Los suelos que posean elevada capacidad de intercambio catiónico bien sea por su material parental o su proceso edafogénico, tendrán también una mayor capacidad para retener cadmio. La cantidad de cadmio nativo en los suelos generalmente sigue el orden natural de la evolución de éstos, con los valores más bajos en los suelos más evolucionados, de pH ácido, bajos valores de CIC y textura gruesa (Holmgren *et al.*, 1993; Ma *et al.*, 1997).

La materia orgánica puede tener efectos opuestos sobre la disponibilidad de cadmio. La fracción soluble puede acomplejar el cadmio, facilitar su movilidad en el suelo y al mineralizarse, dejar al metal más disponible para las plantas. La fracción orgánica más estabilizada, más resistente a la mineralización, puede retener los metales pesados en general, y en particular el cadmio, en formas no disponibles para las plantas. Esta ambivalencia de la materia orgánica en cuanto a la disponibilidad de los metales pesados, se refleja en la existencia de dos hipótesis, ambas sustentadas por resultados experimentales, sobre el efecto de la aplicación en suelos agrícolas de lodos residuales (McGrath *et al.*, 2000). Por una parte, hay quienes apoyan la hipótesis de que los metales pesados contenidos en los lodos pueden mantenerse en formas no disponibles mientras estén presentes en los suelos; y por otra, hay quienes consideran que una vez adsorbidos los metales por la materia orgánica la mineralización de ésta los dejaría en formas más disponibles. Adicionalmente, la aplicación a los suelos de materiales tan complejos, además de aportar diferentes elementos a éstos, puede producir efectos que difieran de un suelo a otro al modificar algunas de sus propiedades como el pH, la CIC y la conductividad eléctrica.

Reacciones en las que se originen productos ácidos en el suelo o disminuciones de pH de éste, favorecerán la disponibilidad del cadmio, como podría ocurrir con la aplicación de ciertos fertilizantes y enmiendas, con la incorporación de materia orgánica en las etapas iniciales de descomposición o en el caso de ciertas prácticas de manejo.

El cadmio en las plantas

La absorción de cadmio por las plantas puede ser facilitada por sustancias ácidas que se producen en la rizósfera. Los exudados radiculares, especialmente los ácidos carboxílicos, incrementan la absorción de cadmio (Nigam *et al.*, 2001). En las leguminosas la absorción de cadmio estaría favorecida por el carácter ácido del proceso de fijación simbiótica de nitrógeno (Iretskaya y Chien, 1999).

Entre los factores de la planta que pueden influir en la cantidad de cadmio absorbido se encuentran: la especie, la edad y el desarrollo radicular. Algunos cultivos como lechuga, espinaca y nabo han sido considerados de alta absorción, mientras que otros como trigo, arroz, avena y trébol absorberían poco cadmio (Ferguson, 1990). La concentración de cadmio en los

tejidos vegetales puede llegar a ser varias veces superior a la presente en el suelo. En plantas de lechuga (materia seca) se han determinado valores de concentración de hasta 16 veces la concentración en el suelo (Lehoczky *et al.*, 2000).

La concentración de cadmio no es la misma en las diferentes partes de la planta. Generalmente la secuencia es: raíces > tallos > hojas > frutas > semillas (Ferguson, 1990; Jinadasa, *et al.* 1997; Nigam *et al.*, 2001). No obstante, las proporciones pueden cambiar según la especie y aún la etapa de crecimiento (Cieslinski *et al.*, 1996). Los tejidos vegetativos tienen en general mayores concentraciones que los tejidos de almacenamiento, lo cual sugiere la existencia de alguna barrera fisiológica que evita la acumulación del metal en éstos últimos (McGrath *et al.*, 2000)

El cadmio no tiene ninguna función fisiológica conocida en los vegetales y su presencia en los suelos puede limitar la absorción y traslocación dentro de la planta de otros elementos que también forman iones divalentes como calcio, magnesio, cinc, hierro y manganeso (Smilde *et al.*, 1992; Oliver, *et al.*, 1994; Gupta y Gupta, 1998; Llamas *et al.*, 2000). Dentro de la planta interfiere en los procesos de respiración y fotosíntesis, se combina con el azufre presente en las enzimas que tienen este elemento en su composición y da origen a un proceso de estrés oxidativo, que produce daño celular en los tejidos y el cual se caracteriza por el incremento de las concentraciones de especies químicas como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂), iones peróxido (O₂⁻) e hidróxido (OH⁻) y radicales libres (Lagriffoul *et al.*, 1998).

Aunque el principal síntoma de contaminación de cadmio es la disminución de crecimiento de las plantas, dependiendo de la sensibilidad de la especie, también es posible la aparición de otros síntomas como clorosis, hojas arrugadas y con coloración marrón-rojiza. (Ferguson, 1990). En plantas tolerantes al cadmio, la aparición de estos síntomas sólo ocurre a muy elevadas concentraciones del elemento, por lo que es posible la comercialización de partes vegetales con concentraciones de cadmio muy superiores al máximo permitido para alimentos, como productos de aparente buena calidad (Kabata-Pendías y Pendías, 1984; Wagner, 1995).

Remediación de suelos contaminados con cadmio

En suelos agrícolas las principales estrategias dirigidas a reducir el problema de contaminación con cadmio consisten en la inmovilización del elemento en el suelo o la aplicación de otros nutrientes que puedan actuar como antagonistas en su absorción por las plantas.

El procedimiento de inmovilización más frecuentemente usado es el incremento del pH. Adicionalmente la aplicación de enmiendas que incrementen el contenido de iones calcio en el suelo puede producir un efecto de antagonismo sobre la absorción de cadmio. Es posible también reducir la absorción de cadmio haciendo uso del antagonismo con otros microelementos y para ello se han usando extensamente sales de cinc (Smilde *et al.*, 1992; Oliver *et al.*, 1994; Welch *et al.*, 1999, Cakmak *et al.*, 2000; Fontes *et al.*, 2000).

Para inmovilizar el elemento se han empleado también materiales con mucha área superficial y por tanto con gran capacidad de adsorción como las zeolitas (Tsadilas *et al.*, 1997; Singh *et al.*, 2000) y se ha propuesto el uso de mezclas de óxidos de hierro y materiales orgánicos (Vermeer *et al.*, 1999).

La biorremediación en suelos ha sido ensayada con éxito variable. Entre los procedimientos de biorremediación uno de los que es objeto de mayor investigación actualmente es el uso de plantas hiperacumuladoras, que son especies vegetales muy tolerantes a los metales y capaces de absorber grandes cantidades de metales. Una vez que la planta ha logrado cierto desarrollo que garantiza que se haya retirado del suelo una cantidad importante de metal, se procede a su corte y desecho, previo a una reducción de volumen. Se encuentran varias limitaciones en la aplicación de la técnica, algunas tienen que ver con el bajo porte de algunas plantas hiperacumuladoras, aunque también se ha propuesto el uso de especies arbóreas, en cuyo caso se requeriría hacer cosechas anuales para evitar el reciclado del cadmio presente en las hojas (Robinson *et al.*, 2000).

Para aprovechar al máximo el poder acumulador de las plantas deben crearse condiciones favorables a su desarrollo, lo cual con frecuencia requiere la aplicación de prácticas agronómicas destinadas a mejorar las condiciones del suelo, reduciendo problemas como los de salinidad y déficit de agua. A fin de aumentar la fracción de metal disponible para las plantas se han usado complejantes como EDTA (Cunningham y Ow, 1996; Ebbs *et al.*, 1997; Robinson *et al.*, 2000), pero éstos deben ser dosificados cuidadosamente para no superar el nivel de tolerancia de la planta. El uso de plantas hiperacumuladoras también requiere extremo cuidado para evitar que se convierta en un medio a través del cual puedan incorporarse los metales pesados a la cadena trófica y el incremento de su concentración en el horizonte superficial (Perronet *et al.*, 2000).

Algunos microorganismos incorporan el cadmio en su pared celular por lo que se les ha usado en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados y esto podría permitir por lo menos su fijación temporal (Mulè y Melis, 2000). Un mecanismo biológico natural mediante el cual disminuye la absorción y traslocación del cadmio se presenta en el caso de especies forestales donde se ha comprobado que las ectomicorrizas asociadas a las plantas pueden reducir la cantidad de metales pesados absorbida por las raíces y la transferida de éstas al tallo, reduciendo de esa manera la toxicidad del metal (Colpaert y Van Assche, 1992; Hartley *et al.*, 1997; Hartley-Whitaker *et al.*, 2000; Frey *et al.*, 2000).

CONCLUSIONES

El estudio de la contaminación de suelos con cadmio es de gran interés porque es en el suelo donde se inicia la incorporación del elemento a la cadena trófica y donde es más factible evitar su acumulación en los alimentos y los posteriores efectos en la salud humana. Adicionalmente, este interés se ha incrementado en los últimos años debido a varias razones:

a. Los niveles de cadmio en algunos suelos agrícolas tienden a aumentar como consecuencia de la continua fertilización fosfatada

- b. La detección de niveles relativamente altos en algunos cultivos alimenticios como hortalizas y cereales
- c. El uso agrícola de lodos residuales que pudieran aportar cantidades importantes de cadmio a los suelos
- d. La mejora en los procedimientos analíticos de detección que permiten un mejor control sobre los alimentos
- e. Normativas internacionales que exigen el cumplimiento de estándares de calidad de los alimentos
- f. El uso agrícola, mediante aplicación de riego, de suelos de zonas áridas donde pueden existir niveles importantes de cadmio y otros metales pesados.

Las razones citadas anteriormente muestran por qué el problema del cadmio es un tema de interés creciente. La contaminación con el metal ya no es un problema localizado en las inmediaciones de minas de plomo y cinc, o alrededor de algunas instalaciones industriales, sino que está presente en productos de consumo generalizado. Tampoco es un problema sólo de suelos contaminados, porque en suelos con un nivel de cadmio que podría considerarse dentro de límites normales, algunas plantas pueden concentrar el elemento y llegar a tener niveles mucho mayores que las del suelo, por lo que se requiere un mayor control de las concentraciones de cadmio en los alimentos.

LITERATURA CITADA

- Andrades Rodríguez, M.; P. Carral González; E. Martínez Villar; A. Alvarez González y J.I. Alonso Martirena.** 2000. Contenido en metales pesados y calidad de suelos en cultivos frutales de La Rioja, (España). *Edafología* 7(3):313-318.
- Ayuso, M.; J.A. Pascual; C. García y T. Hernández.** 1996. Evaluation of urban wastes for agricultural use. *Soil Sci. Plant Nutr.* 42(1):105-111.
- Cakmak, I., R.M. Welch; B. Erenoglu; V. Romheld; W.A. Norvell y L.V. Kochian.** 2000. Influence of varied zinc supply on re-translocation of cadmium (^{109}Cd) and rubidium (^{86}Rb) applied on mature leaf of durum wheat seedlings. *Plant Soil* 219:279-284.
- Cala Rivero, V. de la Flor; M. de la Villa; R.V. Mencia.** 1997. Influencia de las características fisicoquímicas y mineralógicas en la distribución de metales pesados en suelos de cultivo. *Edafología* 2:205-213.
- Canet, R.; F. Pomares; F. Tarazona y M. Estela.** 1998. Sequential fractionation and plant availability of heavy metals as affected by sewage sludge applications to soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29:697-716.
- Charter, R. A.; M.A. Tabatabai y J.W. Schafer.** 1993. Metal contents of fertilizers marketed in Iowa. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24:961-972.
- Cieslinski, G.; K.C.J. Van Rees; P.M. Huang; L.M. Kozak; H.P.W. Rostad y D.R. Knott.** 1996. Cadmium uptake and bioaccumulation in selected cultivars of durum wheat and flax as affected by soil type. *Plant Soil* 182:115-124.
- Colpaert, J.V. y J.A. Van Assche.** 1992. The effects of cadmium and the cadmium-zinc interaction on the axeme growth of ectomycorrhizal fungi. *Plant Soil* 145:237-243.
- Cunningham, S.D. y D.W. Ow.** 1996. Promise and prospect of phytoremediation. *Plant Physiol.* 110:715-719.
- Ebbs, S.D.; M.M. Lasat; D.J. Brady; J. Cornish; R. Gordon y L.V. Kochian.** 1997. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. *J. Environ. Qual.* 26:1424-1430.
- Ferguson, J.E.** 1990. The heavy metals: Chemistry, environmental impact and health effects. Pergamon Press, Sydney.
- Flores, E.M.M. y A.F. Martins.** 1997. Distribution of trace elements in eggs samples collected near coal power plants. *J. Environ. Qual.* 26:744-748.
- Fontes, M. P. F.; A.T. de Matos; L.M. da Costa y J.C.L. Neves.** 2000. Competitive adsorption of zinc, cadmium, copper and lead in three highly-weathered Brazilian soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31:2939-2958.
- Frey, B.; K. Zierold y I. Brunner.** 2000. Extracellular complexation of Cd in the Hartig net and cytosolic Zn sequestration in the fungal mantle of *Picea abies* - *Hebeloma crustuliniformae* ectomycorrhizas. *Plant, Cell Environ.* 23:1257-1265.
- Gabe U. y A.A. Rodella.** 1999. Trace elements in Brazilian agricultural limestones and mineral fertilizers. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30:605-620.
- García, C.; T. Hernández; F. Costa y B. Cecanti.** 1994. Biochemical parameters in soil regenerated by the addition of organic wastes. *Waste Manage Res.* 12:457-466.
- García, I.; M. Simón; C. Dorronsoro; J. Aguilar; F. Martín e I. Ortiz.** 2000. Contaminación de suelos por oxidación de lodos piríticos. *Edafología* 7(3):159-168.
- Gupta, U.C. y S.C. Gupta.** 1998. Trace elements toxicity relationships to crop production and livestock and human health: implication for management. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29:1491-1522.

- Hartley, J.; J.W. Cairney y A. Maharg.** 1997. Do ectomycorrhizal fungi exhibit adaptive tolerance to potential toxic metals in the environment?. *Plant Soil* 189:303-319.
- Hartley-Whitaker, J.; J.W.G. Cairney y A.A. Meharg.** 2000. Sensitivity to Cd or Zn of host and symbiont of ectomycorrhizal *Pinus Sylvestris* L. (Scots pine) seedlings. *Plant Soil* 218:31-42.
- Holmgren, G.G.S.; M.W. Meyer; R.L. Chaney y R.B. Daniels.** 1993. Cadmium, lead, zinc, copper, and nickel in agricultural soils of the United States of America. *J. Environ. Qual.* 22: 335-348.
- Hooda, P.S. y B.J. Alloway.** 1998. Cadmium and lead sorption behaviour of selected English and Indian soils. *Geoderma* 84:121-134.
- Iretskaya, S.N. y S.H. Chien.** 1999. Comparison of cadmium uptake by five different food grain crops grown on three soils of varying pH. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30:441-448.
- Jinadasa, K.B.P.N.; P.J. Milham; C.A. Hawkins; P.S. Cornish; P.A. Williams; C.J. Kaldor y J.P. Conroy.** 1997. Survey of cadmium levels in vegetables and soils of Greater Sydney, Australia. *J. Environ. Qual.* 26:924-933.
- Jing, J. y T.J Logan.** 1992. Effects of sewage sludge cadmium concentration on chemical extractability and plant uptake. *J. Environ. Qual.* 21:76-81.
- Kabata-Pendias S. y H. Pendias.** 1984. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Kawasaki A.; R. Kimura y S. Arai.** 2000. Fractionation of trace elements in wastewater treatment sludges. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31:2413-2423.
- Krebs, R.; S.K. Gupta; G. Furrer y R. Schulin.** 1998. Solubility and plant uptake of metals with and without liming of sludge-amended soils. *J. Environ. Qual.* 27:18-23.
- Lagriffoul, A.; B. Mochet; M. Mench y J. Vangronsveld.** 1998. Cadmium toxicity effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and activities of stress related enzymes in young maize plants (*Zea mays* L.). *Plant Soil* 200:241-250.
- Lavado R. S.; M.B. Rodríguez; J.D. Scheiner; M.A. Taboada; G. Rubio; R. Alvarez; M. Alconada y M.S. Zubillaga.** 1998. Heavy metals in soils of Argentina: Comparison between urban and agricultural soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29:1913-1917.
- Lehoczky, E.; P. Marth; I. Szabados; M. Palkovics y P. Lukács.** 2000. Influence of soil factors on the accumulation of cadmium by lettuce. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31:2425-2431.
- Llamas, A.; C.I. Ulrico y A. Sanz.** 2000. Cd²⁺ effects on transmembrane electrical potential difference, respiration and membrane permeability of rice (*Oriza sativa* L.) roots. *Plant Soil* 219:21-28.
- Ma, L.Q.; F. Tang y W.G. Harris.** 1997. Concentration and distribution of eleven metals in Florida soils. *J. Environ. Qual.* 26:769-775.
- McGrath, S.P.; F.J. Zhao; S.J. Dunham; A.R. Crosland y K. Coleman.** 2000. Long-term changes in the extractability and bioavailability of zinc and cadmium after sludge application. *J. Environ. Qual.* 29:875-883.
- Mermut, A. R.; J.C. Jain; L. Song; R. Kerrich; L. Kozak y S. Jana.** 1996. Trace element concentrations of selected soils and fertilizers in Saskatchewan, Canada *J. Environ. Qual.* 25:845-853.
- Mortvedt, J.J.** 1996. Heavy metals contaminants in inorganic and organic fertilizers. *Fertilizer Res.* 43:55-61.
- Mulè, P. y P. Melis.** 2000. Methods for remediation of metal-contaminated soils: Preliminary results. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 31:3193-3204.
- Naidu, R.; R.S. Kookana; M.E. Sumner; R.D. Harter y K.G. Tiller.** 1997. Cadmium sorption and transport in variable charge soils: a review. *J. Environ. Qual.* 26:602-607.
- Nigam, R.; S. Srivastava; S. Prakash y M.M. Srivastava.** 2001. Cadmium mobilisation and plant availability - the impact of organic acids commonly exuded from roots. *Plant Soil.* 230:107-113.
- Oliver, D.P.; K.G. Hannan; K.G. Tiller; N.S. Wilhem; R. H. Merry y G.D. Cozens.** 1994. The effect of zinc fertilization on cadmium concentration in wheat grain. *J. Environ. Qual.* 23:705-711.
- Pardo, M.T.** 1997. Influence of electrolyte on cadmium interaction with selected andisols and alfisols. *Soil Sci.* 162:733-740.
- Pardo, M.T. y M.E. Guadalix.** 1995. Cadmium sorption by two acid soils as affected by clearing and cultivation. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 26:289-302.
- Perronnet, K.; C. Schwartz; E. Gérard y J.L. Morel.** 2000. Availability of cadmium and zinc accumulated in the leaves of *Thlaspi caerulescens* incorporated into soil. *Plant Soil* 227:257-263.
- Robinson, B.H.; T.M. Mills; D. Petit; L.E. Fung; S.R. Green y B.E. Clothier.** 2000. Natural and induced cadmium accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation. *Plant Soil* 227:301-306.

- Singh, B.; B.J. Alloway y F.J.M. Bocheureau.** 2000. Cadmium sorption behavior of natural and synthetic zeolites. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 31:2775-2786.
- Smilde K.W.; B. Van Luit y W. Van Driel.** 1992. The extraction by soil and absorption by plants of applied zinc and cadmium. *Plant Soil* 143:233-238.
- Summer, M.** 2000. Beneficial use of effluents, wastes, and biosolids. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 31:1701-1715.
- Taylor, R.W.; H. Xiu; A.A. Mehadi; J.W. Shuford y W. Tadesse.** 1995. Fractionation of residual cadmium, copper, nickel, lead, and zinc in a previously sludge-amended soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 26:2193-2204.
- Tsadilas, C.D.; D. Dimoyiannis y V. Samaras.** 1997. Effect of zeolite application and soil pH on cadmium sorption in soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 28:1591-1602.
- Vermeer, A.W.P.; J.K. McCulloch; W.H. Van y L.K. Koopal.** 1999. Metal ion adsorption to complex of humic acid and metal oxides: Deviation from the additive rule. *Environ. Soil Technol.* 33:3892-3897.
- Wagner, G.J.** 1995. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv. Agron.* 51:173-211.
- Welch, R.M.; J.J. Hart; W.A. Norvell; L.A. Sullivan y L.V. Kochian.** 1999. Effects of nutrient solution zinc activity on net uptake, translocation, and root export of cadmium and zinc by separated sections of intact durum wheat (*Triticum durum* L. var *durum*) seedlings roots. *Plant Soil* 208:243-250.
- Wu, Q.; W.H. Hendershot; W.D. Marshall y Y. Ge.** 2000. Speciation of cadmium, copper, lead, and zinc in contaminated soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31.