



FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

TRABAJO FIN DE GRADO

ECOTOXICOLOGÍA DEL CADMIO

**RIESGO PARA LA SALUD DE LA UTILIZACIÓN DE
SUELOS RICOS EN CADMIO**

Autor: Gara Sánchez Barrón

Tutor: Miguel Ángel Casermeiro Martínez

Convocatoria: Junio 2016

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1
2. OBJETIVOS	2
3. MÉTODOS	2
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	2
4.1. Propiedades químicas y movilidad en el medio	2
4.1.1. Atmósfera	3
4.1.2. Medio acuático	4
4.1.3. Suelos	5
4.2. Origen del cadmio en el ambiente	7
4.2.1. Fuentes naturales	7
4.2.2. Fuentes antropogénicas	7
4.3. Aspectos toxicológicos del cadmio	9
4.3.1. Exposición y vías de entrada	9
4.3.2. Comportamiento en el organismo	11
4.4. Regulación	12
4.5. Panorama actual del cadmio en los suelos	13
4.5.1. Aportes de cadmio	13
4.5.2. Salidas de cadmio	15
4.5.3. Previsiones futuras respecto al cadmio en suelos	16
4.5.4. Análisis del riesgo	17
5. CONCLUSIONES	19
BIBLIOGRAFÍA	19

RESUMEN

El cadmio es un metal pesado considerado como uno de los elementos más tóxicos. Se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, asociado principalmente a los depósitos de zinc. Su movilidad en el medio depende de varios factores tales como el pH, el potencial redox, la cantidad de materia orgánica y la presencia de arcillas y óxidos de hierro. El cadmio emitido al medio procede mayoritariamente de actividades industriales, minería, metalurgia, fabricación y aplicación de fertilizantes de fosfato y de la incineración de residuos urbanos. Aunque tiene numerosas industriales, su uso ha decrecido en las últimas décadas debido al peligro para la salud que supone.

La exposición al cadmio tiene lugar principalmente a través de la dieta, y en segundo lugar por la inhalación de aerosoles de compuestos de cadmio. Algunos de los efectos en la salud producidos por dicha exposición son daño renal, osteoporosis y cáncer. Es importante el cumplimiento de las normativa referente al el cadmio en cuanto a sus emisiones, niveles en el medio y niveles en alimentos y agua así como realizar controles de dichos niveles para estimar el riesgo para la salud de aquellas poblaciones expuestas al cadmio.

Se prevé que el Cd en suelos de cultivo europeos disminuya en un promedio de 15% en los próximos 100 años. El balance de masa de Cd actual de la UE es negativo, lo cual supone la inversión de la tendencia obtenida en estimaciones anteriores.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El cadmio es un metal pesado considerado como uno de los elementos más tóxicos, junto con el mercurio y el plomo. Se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza asociado a distintos minerales. A su vez, el hombre ha contribuido enormemente a su dispersión desde los inicios de la actividad minero-metalúrgica de otros metales, y más tarde, al descubrirse la gran utilidad del cadmio en el ámbito industrial. La problemática del cadmio radica, además de en su elevada toxicidad, en su larga vida media y en la capacidad para ser acumulado por los seres vivos (Capó, 2007). El cadmio fue el causante de uno de los mayores desastres medioambientales conocidos, que afectó gravemente a los habitantes de la cuenca del río Jinzū, en la prefectura de Toyama (Japón). El riego de los campos de arroz desde 1910 hasta 1960 con aguas contaminadas con metales pesados procedentes de minas cercanas supuso la intoxicación grave de parte de la población, en particular mujeres mayores de 50 años. La enfermedad,

bautizada como *itai-itai*, cursaba con dolor en las articulaciones, osteomalacia y deterioro de la función renal.

El Gobierno japonés llevó a cabo un programa (1980- 2011) para la sustitución del suelo contaminado de los arrozales. Como resultado, la concentración de cadmio en arroz disminuyó notablemente. Pese a ello, el informe de la Agencia del Medio Ambiente de Japón (2009) reveló que todavía hay una alta prevalencia de β 2-microglobulinuria (indicador de daño renal) entre los habitantes de la cuenca del río Jinzū (Aoshima, 2012).

Al igual que ocurre con otros contaminantes, es importante el cumplimiento de las normas que regulen el cadmio en cuanto a sus emisiones, niveles en el medio y niveles en alimentos y agua. Es necesario también realizar determinaciones periódicas de dichos niveles para estimar así el riesgo para la salud de aquellas poblaciones expuestas al cadmio, así como estudios epidemiológicos sobre dichas poblaciones.

2. OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es conocer la ecotoxicología del cadmio como contaminante en la naturaleza, y más particularmente en los suelos, para lo cual es necesario describir su comportamiento químico y las fuentes de las que procede. También se pretende exponer sus efectos sobre la salud del ser humano y analizar el panorama actual del cadmio como elemento presente en suelos del entorno europeo.

3. MÉTODOS

Se ha realizado una revisión bibliográfica a través de la búsqueda y análisis de artículos científicos, libros de texto, monografías y documentos legales, en revistas científicas especializadas, bases de datos (ScienceDirect, PubMed, BUCea...) así como sitios web de instituciones y organismos oficiales (OMS, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Propiedades químicas y movilidad en el medio

El cadmio es un elemento químico que se encuentra en el grupo 12 de la tabla periódica, junto con el mercurio y el zinc. En su forma de metal puro es blando, dúctil y maleable, de color plateado claro. Al ser calentado se combina con oxígeno, azufre, fósforo y halógenos, y es fácilmente disuelto por ácidos. Se conoce la existencia en la naturaleza de ocho isótopos

estables de cadmio, y se han descrito once radioisótopos inestables de tipo artificial (Greenwood & Earnshaw, 2012; PRTR).

El comportamiento químico del cadmio se asemeja al del zinc, pero es mucho más afín al azufre y más móvil en ambientes ácidos. En el medio natural el cadmio se encuentra con valencia 2+, por lo que en solución forma especies químicas tales como CdCl^+ , CdOH^+ , CdHCO_3^+ , CdCl_3^- , CdCl_4^{2-} , $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ y $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$ y quelatos orgánicos (Kabata-Pendias, 2000). La solubilidad de las sales de cadmio en agua es muy variable; los halogenuros, el sulfato y el nitrato son solubles mientras que el óxido, el hidróxido y el carbonato son prácticamente insolubles (Badillo, 1985). A continuación (Fig.1) se ilustra la circulación de cadmio en el medio.

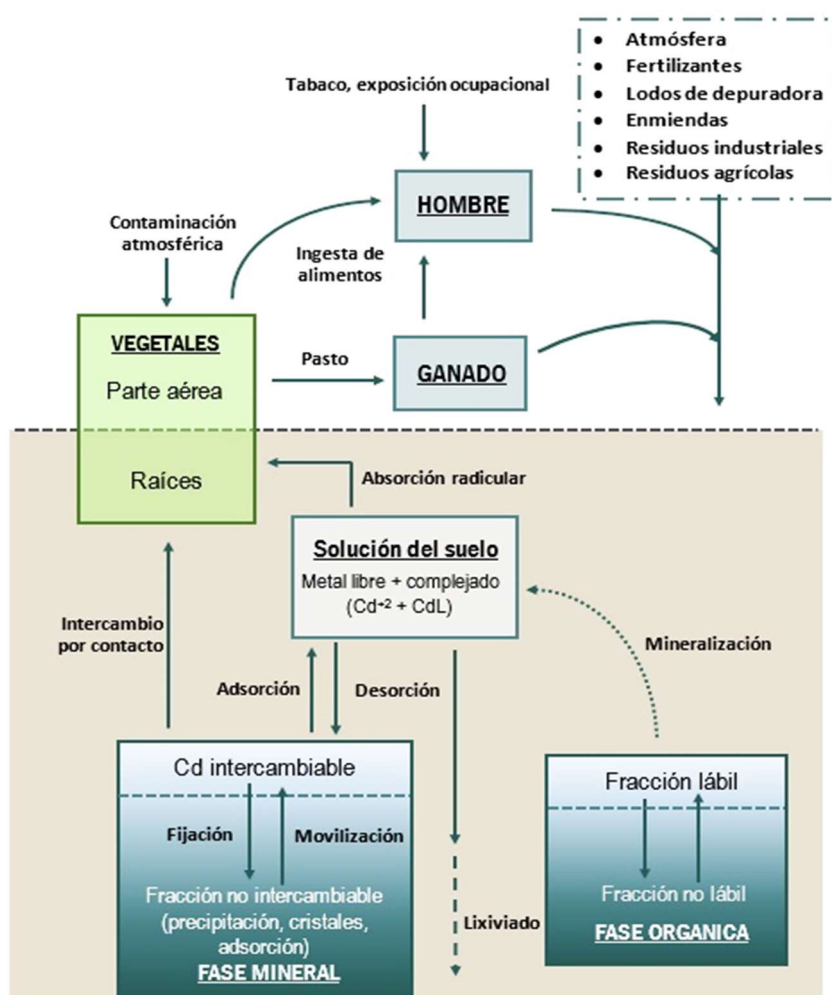


Figura 1. Flujo del cadmio en el medio (modificado de McLaughlin & Singh, 1999)

4.1.1. Atmósfera

Bajo condiciones extremas de oxidación, o durante su refinado y fundición, el cadmio da lugar a óxido de cadmio (CdO), que también constituye un peligro para la salud. (Badillo, 1985) También puede encontrarse en el aire como cloruro o sulfato en forma de partículas o vapores,

como resultado de procesos a altas temperaturas. Dichos compuestos pueden recorrer grandes distancias en la atmósfera para ser depositados sobre la superficie del suelo o de las masas de agua (Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR), 2012).

Las concentraciones típicas de cadmio en aire de zonas rurales son de 0.001-0,005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y de 0,050 a 0,060 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en áreas urbanas (Osorio *et al.*, 1997), mientras que en aire de áreas industriales puede llegar a alcanzar valores de 9,1 a 26,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ramírez, 2002).

4.1.2. Medio acuático

El cadmio existe en forma de ion libre o como complejo iónico asociado a otras sustancias inorgánicas u orgánicas. Los compuestos de cadmio solubles se movilizan en el agua, mientras que los insolubles se depositan en el sedimento (ATSDR, 2012).

En el transporte y la distribución de un contaminante en un sistema acuático están involucrados factores hidráulicos, químicos y microbiológicos que interaccionan de forma compleja. La solubilidad del cadmio se ve i

nfluída por la dureza del agua, el pH y la presencia de sulfuros coloidales. Cuando las aguas procedentes de los ríos llegan al mar, el ion Cd^{2+} tiende a unirse partículas en suspensión y a depositarse en los sedimentos; de esta forma queda localizado en las zonas más cercanas a la costa y en estuarios. Ante un descenso del pH de las aguas, el cadmio puede volver a movilizarse de nuevo. Es habitual que durante los periodos de calma, cuando el agua se estanca, la capa anaerobia de agua presente en el fondo de los puertos tenga una concentración baja de Cd soluble; esto se debe a la reducción microbiana del sulfato a sulfuros, que precipitan el cadmio como sulfuro de cadmio insoluble:



La mezcla de agua del mar (aerobia) con la del puerto en épocas de viento resulta en la desorción del cadmio de los sedimentos del puerto. Este cadmio disuelto se transporta a zonas más alejadas de la costa, donde es adsorbido por materiales sólidos en suspensión, incorporándose nuevamente a los sedimentos.

Por lo general, las concentraciones de este elemento en el agua potable son menores a 5 $\mu\text{g}/\text{L}$, mientras que en los océanos oscilan entre 0,04 y 0,03 $\mu\text{g}/\text{L}$. La presencia de cadmio como contaminante en agua potable puede proceder de las tuberías galvanizadas de zinc soldaduras, calentadores de agua, grifos, etc, o bien por la filtración de cadmio a las aguas

subterráneas a partir de los lodos que contengan óxidos de cadmio (Badillo, 1985; Manahan, 2006).

4.1.3. Suelos

La movilidad depende de varios factores tales como el pH, el potencial redox (Eh) (Fig. 2 y 3) y la cantidad de materia orgánica, los que varían según el ambiente local. Generalmente, el cadmio se une fuertemente a la materia orgánica en el suelo; en esta forma puede ser absorbido por las plantas e incorporarse entrando a las cadenas tróficas (ATSDR, 2012).

De distintas investigaciones realizadas acerca de la movilidad del cadmio en este medio se puede concluir que:

- En todos los suelos la dinámica del Cd está fuertemente afectada por el pH.
- En suelos ácidos, la materia orgánica y los sesquióxidos controlan la solubilidad del metal.
- En suelos alcalinos el cadmio no es móvil ya que precipita en forma de carbonatos y fosfatos insolubles. Se favorece también la formación de especies hidroxilo monovalentes como CdOH^+ , que no pueden ocupar fácilmente los sitios de unión en los complejos de intercambio catiónico.
- La fijación de Cd es mayor en los suelos con contenidos más elevados de materia orgánica, textura más fina, mayor capacidad de intercambio catiónico y menor saturación de aluminio intercambiable.

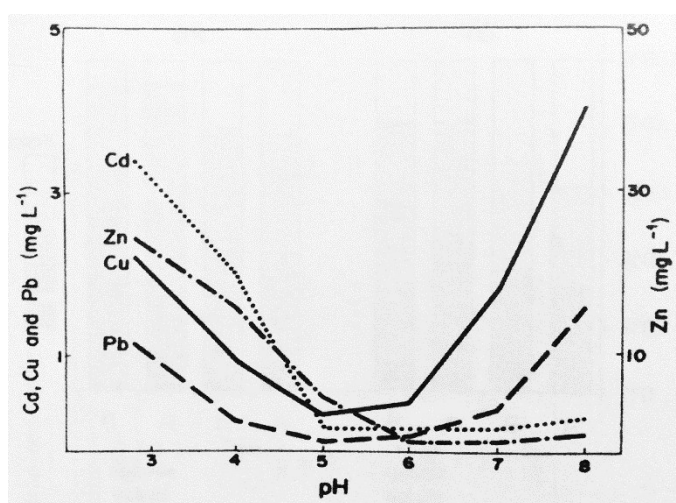


Figura 2. Influencia del pH en la concentración de distintos metales en la solución del suelo (Kabata-Pendias, 2000).

En los suelos ácidos, el cadmio se intercambia fácilmente, lo que lo hace disponible para las plantas. La naturaleza de las superficies de adsorción y de los ligandos orgánicos es también importante. Se ha observado que la energía de enlace es mayor en la unión del cadmio con materia orgánica que con arcillas. Cabe mencionar también la alta afinidad del cadmio por oxihidróxidos de hierro y silicatos de aluminio como alofana e imogolita. Teniendo esto en cuenta, se puede afirmar que en ambientes ácidos la solubilidad del cadmio está modulada por

dichos compuestos y por la materia orgánica (Bautista, 1999; Badillo, 1985; Kabata-Pendias, 2000).

En cuanto a la influencia del Eh, algunos autores afirman que la solubilidad del cadmio aumenta en suelos con bajo potencial redox (Chuan *et al.*, 1996) posiblemente debido a la disolución de los oxihidróxidos de Fe-Mn, resultando en la liberación del Cd; esto difiere de los resultados obtenidos por Xiong y Lu (1993), que observaron que en ambientes reductores como suelos anegados se reduce la biodisponibilidad del metal debido a la formación de sulfuro de cadmio (CdS), cuyo mecanismo de describe en el apartado anterior (Rieuwerts *et al.*, 1998).

La cantidad de cadmio unido a materia orgánica y la fracción residual (inmóvil) parecen ser relativamente estables en el suelo, mientras que sus formas intercambiables aumentan significativamente tras la aplicación de lodos (Fig.4). Sin embargo, el movimiento de metales pesados incluso tras las aplicaciones de lodo al suelo sigue siendo limitado y es más probable en suelos arenosos, ácidos, bajos en materia orgánica, acompañados con elevada precipitación o irrigación. También se ha

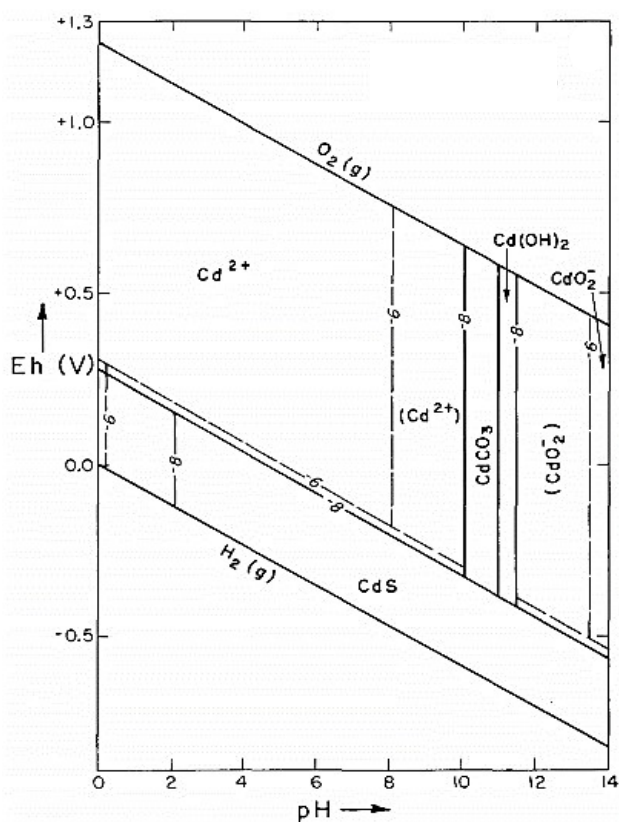


Figura 3. Diagrama Eh-pH para el cadmio (Brookins, 1985).

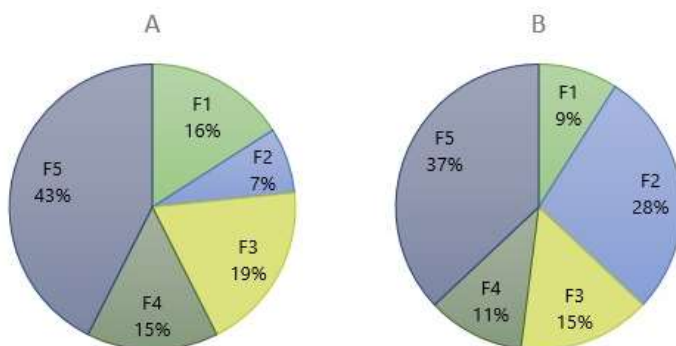


Figura 4. Variación de las especies de Cd en suelos antes (A) y tras la aplicación de lodos (B). F1: soluble; F2: intercambiable; F3: asociado a oxihidróxidos; F4: unido a materia orgánica; F5: residual (modificado de Kabata-Pendias, 2000).

observado que la degradación de la materia orgánica en compuestos de bajo peso molecular puede favorecer el desplazamiento del Cd hacia las aguas de lavado (Jordán *et al.*, 2006).

La adición conjunta de Cd y Zn muestra efectos sinérgicos entre ambos metales; elevadas concentraciones de Zn favorecen la movilidad e inhiben la retención del Cd y viceversa (Estévez *et al.*, 2000).

La concentración habitual de cadmio en los suelos es de 0,07 a 1,1 mg/kg. En áreas contaminadas, como por ejemplo campos de arroz en ciertas regiones de Japón, se han detectado concentraciones entre 1 a 69 mg/kg en los suelos. Por otro lado, la concentración de Cd en la solución del suelo es relativamente baja y ronda 0,2-6 µg/L. Valores de 300-400 µg/L se corresponden con suelos contaminados.

Debido a la importancia ambiental de la acumulación de cadmio en el suelo, se han investigado varias técnicas para el manejo de suelos ricos en cadmio. Estas técnicas se basan en la realización de lavados en suelos ácidos, o bien en el aumento del pH (por ejemplo el encalado) y la capacidad de intercambio de cationes. Algunos autores (Kitagishi & Yamane, 1981) observaron que los mejores resultados en reducir la disponibilidad del cadmio se consiguieron disponiendo capas de suelo no contaminado sobre suelo contaminado hasta una profundidad de 30 cm (Bautista, 1999; Badillo, 1985; Kabata-Pendias, 2000).

4.2. Origen del cadmio en el ambiente

4.2.1. Fuentes naturales

El cadmio se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre en una concentración media de 0,1 mg/kg. (Osorio *et al.*, 1997). La abundancia de Cd en rocas sedimentarias e ígneas no excede de 0,3 mg/kg y las concentraciones son parecidas en depósitos arcillosos y en rocas metamórficas. (Bautista, 1999). Aunque los niveles altos de Cd en suelos se relacionan principalmente con la contaminación, pueden ser también de origen litológico; por ejemplo, existen hallazgos de cantidades anormalmente altas de cadmio en roca caliza de algunas zonas de Francia, originarias del Jurásico y el Cretácico (Kabata-Pendias, 2000). El cadmio es un constituyente muy habitual en casi todos los compuestos de zinc, que pueden llegar a contener un 0,1-0,3% de cadmio. También puede encontrarse en minerales de plomo y cobre, si bien en este caso las concentraciones de cadmio son considerablemente más bajas.

Uno de los depósitos de zinc más asociado al cadmio es la esfalerita o blenda de zinc (ZnS). Algunos minerales de baja importancia económica que contienen cadmio son el sulfuro

de cadmio o greenockita (CdS), el óxido de cadmio (CdO) y el carbonato de cadmio u otavita (CdCO₃) (Badillo, 1985).

Gran parte de la dispersión del cadmio al ambiente tiene como causa del desgaste y erosión de las rocas, y el posterior transporte de grandes cantidades del metal a los océanos, cuyo contenido de cadmio es de alrededor de 0,1 µg/kg. Sin embargo, la actividad volcánica (incluyendo el vulcanismo subterráneo) es considerada la mayor fuente natural de liberación de cadmio a la atmósfera.

4.2.2. Fuentes antropogénicas

El cadmio continúa siendo un elemento relativamente raro en la litosfera. Sin embargo, a mediados del siglo XX la emisión antropogénica de cadmio comenzó a incrementarse notablemente; se puede afirmar que los procesos naturales por los cuales se libera cadmio son insignificantes como fuente de contaminación en comparación las actividades antrópicas.

- Minería y metalurgia: las actividades mineras de metales no ferrosos son la principal fuente de liberación de cadmio (subproducto de la obtención de zinc, por ejemplo), sobre todo al medio acuático. La contaminación puede provenir del agua de drenado de las minas, aguas residuales del procesamiento de los minerales, derrames de los depósitos de desechos, etc.
- Industria: fabricación de baterías y acumuladores, cables, células fotoeléctricas, PVC, colorantes de cadmio, fusibles, soldadura, etc.
- Producción y uso de fertilizantes fosfatados: el contenido de cadmio en los fertilizantes es muy variable y depende la procedencia geográfica de las rocas empleadas para su fabricación. El Cd se encuentra sustituyendo al Ca en las rocas de tipo apatita.
- Otras fuentes: incineración de residuos de madera y plásticos, combustión de carburantes fósiles, fabricación de cementos, disposición de residuos sólidos en terraplenes. El cadmio y sus compuestos emitidos se distribuyen y presentan de modo diferente según las características del medio (Gálvao *et al*, 1987).

Aplicaciones del cadmio

- Galvanizado del acero, por sus propiedades anticorrosivas. Componente de diversas aleaciones.
- Estabilizadores de PVC y otros plásticos.
- Pigmentos (sulfuros y sulfoseleniuros de Cd) en plásticos y vidrios, esmaltes, tintas de impresión, textiles, etc. Joyería.

- Material de electrodos en baterías cadmio-níquel. Fabricación de fotoconductores y células solares fotoeléctricas.
- Fotografía, litografía, procesos de grabado.
- Barras de control de reactores nucleares.

(Osorio *et al.*, 1997; Badillo, 1985)

Los principales productores de cadmio son los países europeos, Japón, Estados Unidos y Canadá. La mayor parte de la producción se emplea en Estados Unidos y en Europa. Su tiempo de utilización en términos históricos se considera relativamente corto en comparación con otros metales como el plomo, ya que su uso extensivo se desarrolló hacia la mitad del siglo XX.

En las últimas décadas las tendencias de uso del cadmio y sus compuestos se han visto sujetas a variaciones, debido a la incorporación de reglamentos más estrictos en materia ambiental y sanitaria, ya que el peligro que el cadmio supone para la salud es ampliamente conocido. Por tanto no es de extrañar que se haya notado el descenso de las emisiones de cadmio en algunos países; un ejemplo de ello es Finlandia, que pasó de emitir 6,3 ton a 1 ton entre 1990 y 1997 (Kabata-Pendias, 2000).

4.3. Aspectos toxicológicos del cadmio

4.3.1. Exposición y vías de entrada

Exposición general

La población general está expuesta al cadmio a través de la contaminación del aire, agua, suelos, alimentos y el tabaco, siendo la dieta la principal fuente de exposición al cadmio para no fumadores. La deposición atmosférica de cadmio, las actividades mineras y la aplicación de fertilizantes y enmiendas en los campos pueden conducir a la contaminación de suelos y a la absorción de cadmio por los cultivos para el consumo humano. Se han determinado altas concentraciones de cadmio en mariscos, productos de casquería como el hígado y el riñón, en semillas oleaginosas, granos de cacao y en ciertas setas. Cereales como el arroz y el trigo, vegetales de hoja verde, patatas y hortalizas de raíz como la zanahoria contienen las concentraciones más altas de cadmio, y se estima que más de 80% de la ingesta del metal procede de este tipo de alimentos. Según una recopilación de datos a nivel internacional realizada por Järup y Åkesson (2009) la ingesta de cadmio con los alimentos varía entre 8 y 25 µg por día, lo cual es significativamente mayor que los valores recomendados por algunos organismos internacionales, que se mencionan más adelante. El consumo puede ser mayor en

países asiáticos como Japón, o en ciertos grupos de la población con hábitos dietéticos específicos, como por ejemplo los vegetarianos.

La absorción intestinal de cadmio es del 1-5 % del total ingerido, y depende de factores como la ingesta de proteínas o la presencia de vitamina D y otras moléculas como ácido fítico. Aquellos individuos con dietas pobres en calcio o proteínas, o bien con déficit de hierro, presentan una absorción de cadmio mayor (hasta del 10-20%).

El consumo de tabaco es otra fuente importante de exposición al cadmio. La planta del tabaco acumula de forma natural concentraciones relativamente altas de cadmio en sus hojas, y un cigarrillo puede contener más o menos 1-2 µg de cadmio. Se estima que una persona que fuma 20 cigarrillos al día absorberá en torno a 1µg de cadmio (Järup & Åkesson, 2009; WHO, 2010).

Exposición ocupacional

La principal vía de exposición en este caso es la inhalatoria, siendo posible también la cutánea (aunque la absorción a través de la piel es mínima y solo tendría importancia en caso de producirse contacto prolongado con soluciones concentradas). El tamaño y la solubilidad de las partículas inhaladas (comúnmente de óxido de cadmio en forma de humo o polvo) determinan posibilidad de difusión del cadmio de los pulmones hacia la sangre, además de las condiciones fisiológicas del sistema respiratorio. El cadmio se encuentra en porcentajes variables en distintos materiales, y numerosas actividades profesionales pueden representar un riesgo para la salud. Existe una clasificación de las ocupaciones en función a la exposición al cadmio, compuesta de cuatro categorías: riesgo alto, medio, bajo y muy bajo/nulo. Las actividades con riesgo más alto son la minería, fundición y soldadura de cadmio o aleaciones, seguidas de algunos procesos industriales como la fabricación de baterías y células fotoeléctricas (Gálvao *et al*, 1987).

Poblaciones en riesgo

Algunos sectores de la población tienen una mayor probabilidad de sufrir exposiciones a niveles peligrosos de cadmio, o son propensos a padecer efectos más graves para la salud derivados de la intoxicación. Entre ellos se encuentran:

- Trabajadores en actividades donde esté presente el cadmio.
- Habitantes de áreas urbanas con alto nivel de industrialización, o bien de regiones donde haya contaminación del ambiente por cadmio, o donde exista minería de cadmio o zinc.
- Personas con enfermedades renales, pulmonares u óseas, fumadores crónicos, personas anémicas o con nutrición deficiente.

(Gálvao *et al.*, 1987)

4.3.2. Comportamiento en el organismo

El cadmio puede detectarse en prácticamente todos los tejidos de personas adultas de países industrializados. Una vez absorbido es transportado por la sangre a distintos tejidos y órganos, entre los que destacan riñones e hígado ya que retienen cerca del 30-50 % de la carga corporal total de cadmio, cuya semivida es de aproximadamente 10-30 años. También tiene importancia el tejido óseo como lugar de acumulación del metal.

El cadmio es capaz de inducir la síntesis de proteínas ricas en cistina denominadas metalotioneínas en hígado y riñones. Las metalotioneínas son responsables de la retención del cadmio en dichos órganos, y ejercen una acción protectora al facilitar la eliminación del metal: el complejo cadmio-metalotioneína puede ser filtrado por el glomérulo y excretado en orina. (Osorio *et al.*, 1997; WHO, 1992).

Aunque su mecanismo de acción tóxica no está completamente dilucidado, se cree que el cadmio tiene gran afinidad por radicales nucleofílicos presentes en las proteínas; de esta forma se produciría la inhibición de numerosas enzimas debido a la fuerte unión del Cd a los grupos -SH de las mismas. Por otro lado compite con otros metales esenciales como Zn, Cu, Fe y Ca, desplazándolos de sus sitios de unión a enzimas y alterando distintas rutas bioquímicas. Algunos de los procesos afectados son el transporte de cobre al interior de las células, o el metabolismo del calcio por la unión del cadmio a la calmodulina (Capó, 2007; Ramírez, 2002; Klaasen *et al.*, 2009; WHO, 1992).

4.3.3. Consecuencias de la exposición de cadmio: patologías asociadas

- Ingerir alimentos con niveles muy altos de cadmio produce irritación grave del estómago, vómitos y diarrea, pudiendo causar la muerte en algunas ocasiones. (ATSDR, 2012).
- Tras la exposición crónica a niveles más bajos del metal el riñón es el órgano más afectado, ya que la acumulación de cadmio mantenida durante varias décadas provoca el fallo de la función renal por daño en los túbulos (generalmente irreversible). Esto trae como consecuencia la eliminación de proteínas de bajo peso molecular en orina, cuya detección es útil para determinar el daño renal (Ej. microglobulina β_2).
- También puede verse alterado el metabolismo del calcio y la resorción ósea, lo que favorece situaciones de osteomalacia u osteoporosis, fracturas óseas, dolor en las articulaciones y formación de cálculos renales.
- La inhalación de grandes cantidades de aerosoles de óxido de cadmio puede producir neumonitis aguda y edema pulmonar. Tras la exposición prolongada en el tiempo, como

sucede en el ámbito laboral, puede desencadenar cambios estructurales en los pulmones y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC).

- El cadmio ha sido calificado como agente carcinógeno de tipo I por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), lo cual implica que existe suficiente evidencia de su carcinogenicidad en humanos. Su papel en el cáncer de pulmón ha sido más descrito y comprobado; aunque hay indicios *in vitro* que señalan la relación del cadmio con el cáncer de próstata no se ha conseguido suficiente evidencia mediante estudios epidemiológicos sobre poblaciones expuestas al cadmio.
- Se ha observado que el cadmio se comporta como una metalohormona y disruptor endocrino. Se ha comprobado *in vivo* que el cadmio puede inducir respuestas estrogénicas como la hiperplasia e hipertrofia del endometrio, así como aumentar el riesgo de cáncer de este tejido tras la ingesta mantenida en la dieta durante varios años.

(Nordic Council of Ministers, 2003; WHO, 2010; Järup & Åkesson, 2009)

4.4. Regulación

Directrices de la OMS:

- El Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA) estableció en 2010 un valor de ingesta máxima tolerable mensual para el cadmio de 25 µg/kg de peso.
- Cadmio en agua para consumo humano: 5 µg/L (coincide con el valor paramétrico en España, indicado en el Real Decreto-ley 140/2003 por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano).
- Aire: 5 ng/m³.

(WHO, 2010; BOE, 2003)

La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) realizó en el año 2009 un meta-análisis de un gran número de estudios analizando la relación entre concentraciones de cadmio en orina y la aparición de proteinuria. Relacionando los valores de cadmio en orina con los de exposición a través de la dieta, estableció una ingesta tolerable semanal de 2,5 µg/kg (equivalente a 10 µg/kg/mes). Dicha cifra es considerablemente menor que la recomendada por el JECFA. Por otra parte, los contenidos máximos de cadmio en distintos tipos de alimentos vienen recogidos en el Reglamento 1881/2006, modificado por el 420/2011.

La Directiva 83/513/CEE relativa a los valores límite y a los objetivos de calidad para los vertidos de cadmio declara que no existen métodos que permitan extraer sistemáticamente el

cadmio de los vertidos resultantes de la producción de ácido fosfórico y/o de abonos fosfatados. No se ha fijado, pues, ningún límite para dichos vertidos. La ausencia de dichos valores límite no libera a los Estados miembros de su obligación, en virtud de la Directiva 76/464/CEE, de fijar normas de emisión para dichos vertidos.

El Real Decreto 1310/1990 por el que se regula la utilización de los lodos de depuradora en el sector agrario recoge los límites que se reflejan en la tabla 1. La legislación española también establece umbrales de emisión al medio: 10 kg/año a la atmósfera y 5 kg/año a suelos y aguas (RD 508/2007). Por otro lado, el Real Decreto 9/2005 por el que

mg Cd/kg de materia seca		
pH del suelo	Suelos	Lodos
<7	1	20
>7	3,0	40

Tabla 1. Límites de cadmio en suelos y lodos (RD 1310/1990).

se indica la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelo contaminado, deja en competencia de las Comunidades Autónomas los niveles y criterios en relación con los elementos traza. Por ejemplo, en la Comunidad de Madrid existe la Orden 2770/2006 que establece los siguientes valores de referencia en suelos contaminados (mg Cd/kg): uso industrial, 300; urbano, 30; otros usos, 3.

4.5. Panorama actual del cadmio en suelos

El aumento gradual de la concentración de cadmio en los suelos europeos durante el siglo XX impulsó la legislación ambiental para limitar la acumulación de cadmio del suelo. Los balances de masa (entrada-salida) para ilustrar el período 1980-1995 predijeron entradas Cd de mayor tamaño a través de fertilizantes de fosfato y la deposición atmosférica de salidas mediante absorción por el cultivo y la lixiviación. Debido al continuo aumento de cadmio en suelos y a la disminución del pH, la transferencia de cadmio a la cadena alimentaria aumentaría significativamente con el tiempo. Para 2010 se predijeron dosis de ingesta semanal de 1200 µg, muy superior a la ingesta máxima tolerable actual (Kabata-Pendias, 2000).

En un estudio llevado a cabo por Smolders y Six (2014) se actualiza el balance de masa de Cd para los principales suelos agrícolas de la UE-27 + Noruega. Las concentraciones totales de Cd del suelo suelen oscilar entre 0,1 y 1 mg Cd/kg de suelo, y un programa de muestreo a gran escala realizado en 2006 por el Foro de Servicios Geológicos Europeos (FOREGS) del que se valieron para su investigación determinó que la concentración media de Cd en Europa es de 0,28 mg Cd/kg.

4.5.1. Aportes de cadmio

Deposición atmosférica

Se ha observado que las emisiones más altas de Cd en Europa tuvieron lugar a mediados de 1960, cuando la producción de metales no ferrosos crecía rápidamente. Las emisiones actuales de Cd son cinco veces menores a las de entonces.

Los metales traza se incluyen en el Programa Europeo de Monitorización y Evaluación (EMEP). La medida del cadmio atmosférico se calcula gracias a la recogida de muestras de agua de lluvia, teniendo en cuenta la superficie de precipitación (mm) y la concentración de Cd en el agua ($\mu\text{g Cd/L}$). Se calcula de esta forma la deposición Cd (mg Cd/m^2) por cada precipitación. Sumando todas las precipitaciones se obtuvo una estimación para la deposición total de Cd por cada estación de recogida; la deposición de Cd media fue de $0,35 \text{ g /ha/año}$. Esta cifra es unas 8 veces menor que los valores utilizados en los últimos balances de masa de la UE ($\sim 3 \text{ g Cd/ha/año}$).

Aporte a partir de fertilizantes fosfatados

Este tipo de fertilizantes son generalmente la principal fuente de Cd en los suelos agrícolas. La entrada de Cd a través de fertilizantes depende, por un lado, del consumo del fertilizante, y por otro de la proporción Cd: P_2O_5 en el mismo.

El consumo medio actual europeo de P_2O_5 en tierra cultivable es de $22 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$, con una aplicación media de $21 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ en cereales y $45 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$ en patatas. En estudios anteriores se investigó la concentración de cadmio de numerosos fertilizantes fosfatados de uso extensivo en Europa. Las concentraciones de Cd oscilaron entre $<0,1$ a $120 \text{ mg Cd/kg P}_2\text{O}_5$, con una media de $36 \text{ mg Cd/kg P}_2\text{O}_5$. Empleando esta cifra media, el aporte anual de Cd a los suelos cultivables se estima en alrededor de $0,8 \text{ g Cd/ha/año}$ para el consumo medio europeo, también $0,8 \text{ g Cd/ha/año}$ para la producción de cereales y $1,6 \text{ g Cd/ha/año}$ para la producción de patata.

Desde 1980, el consumo de fertilizantes fosfatados en Europa ha decrecido significativamente (Fig. 3). El aporte de Cd a través de fertilizantes ha disminuido principalmente gracias a la reducción del uso de dichos fertilizantes.

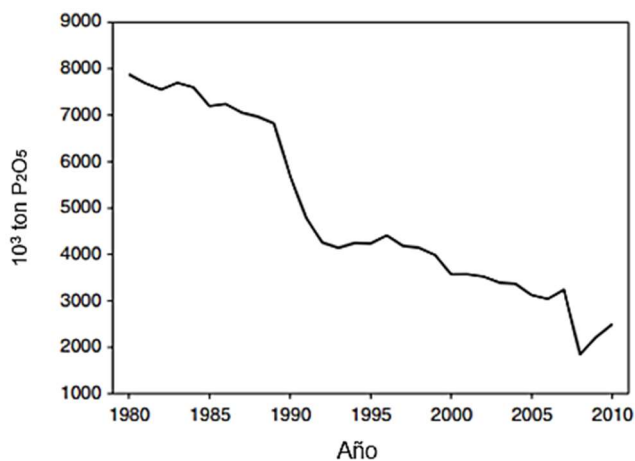


Figura 3. Evaluación del consumo de fertilizantes fosfatados en la UE+Noruega en el período 1980-2010.

Otros balances de cadmio anteriores al año 2005 estimaron ritmos de adición de Cd a través de fertilizantes de 0,5-4,4 g Cd/ha/año, lo cual probablemente refleja la mayor tendencia al uso de fertilizantes en Europa de hace dos o tres décadas.

Aporte a partir lodos

Actualmente, se estima que la concentración media de Cd de la de los lodos de depuradora UE es de 1,8 mg Cd por kg de materia seca. Los aportes totales de Cd a las tierras de cultivo a través de la aplicación de lodos se calcularon a partir de las cantidades de lodos utilizados en agricultura (unas $3.900 \cdot 10^3$ ton/año, aproximadamente el 40% de una producción total de lodos de $9.860 \cdot 10^3$ ton/año) (Milieu, 2008) y la concentración Cd media de los lodos producidos en Europa.

Para realizar el cálculo se asume que todo el lodo se distribuye uniformemente la superficie total de cultivo de los países estudiados (UE-27 + Noruega) que es de 103×10^6 ha. De media, el aporte de Cd a través de la aplicación de lodos es de 0,05 g Cd/ha/año. Se puede afirmar la aplicación de los lodos puede ser una fuente significativa de Cd, pero no en comparación a los fertilizantes y deposición atmosférica a nivel nacional o regional. Sin embargo, la alta utilización de los lodos podría constituir un aporte importante de Cd a nivel local y la causa un aumento en las concentraciones de Cd del suelo. De hecho, al calcular al aporte medio se ha subestimado la cantidad real de lodos aplicados en algunas áreas, y por tanto es necesario realizar estudios de campo a pequeña escala cuando se evalúa la probabilidad de que los cultivos locales excedan los límites de cadmio en alimentos.

4.5.2. Salidas de cadmio

Salida a través de extracción por parte de los cultivos

El Cd es retirado de suelo por medio de la cosecha es producto del rendimiento de los cultivos recolectados y la concentración de Cd en dichos cultivos. El Cd absorbido por las plantas depende de las propiedades del suelo (pH, contenido en materia orgánica) y de las especies vegetales. Para simplificar el análisis se puede suponer que la concentración de Cd los cultivos varía proporcionalmente con la concentración de Cd en el suelo. Esta relación se describe típicamente mediante una función de transferencia (TF): relación de la concentración de Cd en el cultivo y la concentración de Cd suelo, expresadas en mg /kg de suelo seco:

$$TF = \frac{[Cd]_{cultivo}}{[Cd]_{suelo}}$$

La concentración de Cd en los cultivos por lo tanto se puede deducir a partir de la concentración de Cd del suelo. El rendimiento medio europeo de cereales es de 5,1 ton de grano/ha y 25,9 ton de patatas/ha. Considerando la concentración media Cd suelo de 0,28 270mg Cd/kg, Esto resulta en una extracción de cadmio mediante la cosecha de 0,2 g Cd/ha/año para los cereales, 0,44 g Cd/ha/año para patatas.

Salida a través de la lixiviación

La lixiviación, expresada en g /ha/año, representa la pérdida de Cd de la parte superficial del suelo. Para su determinación a gran escala, normalmente se simplifica el cálculo y se estima a partir del exceso de precipitación o escorrentía (F, en m/año) y de la concentración de Cd en la solución del suelo ($[Cd]_{solución}$, en mg Cd/L):

$$Lixiviación = 10.000 \times F \times [Cd]_{solución}$$

El exceso de precipitación media en Europa está estimado en 0,2 m/año. Para la región mediterránea la cifra se reduce a 0,05 m/año, y para aquellas zonas con precipitaciones abundantes se aumenta hasta 0,3 m/año. El coeficiente de reparto (K_D , en L/kg) representa cómo se distribuye el cadmio entre la fase sólida y la solución del suelo.

$$K_D = \frac{[Cd]_{suelo}}{[Cd]_{solución}}$$

Las concentraciones de Cd en los suelos agrícolas europeos son típicamente <1 mg Cd/kg, intervalo en el cual se considera que la adsorción sigue un comportamiento lineal. Por tanto, se puede calcular el K_D mediante una regresión, en la que también se incluyen algunas propiedades del suelo como el pH y el porcentaje de carbono orgánico. La lixiviación promedio obtenida es de 2,56 g Cd/ha/año considerando un ritmo de drenaje del suelo de 0,2 m/año. Esta estimación es muy susceptible a las variaciones del pH del suelo y al contenido en carbono orgánico, lo que da lugar a cierta incertidumbre estadística en el valor de K_D .

4.5.3. Previsiones futuras respecto al cadmio en los suelos

El modelo empleado por Six y Smolders (2014) para predecir las concentraciones de cadmio futuras asume un aporte constante durante los 100 años siguientes. La variación de Cd a largo plazo se calcula desde la concentración de Cd a tiempo 0, y la concentración tras 100 años de aplicación de lodos, fertilizantes, etc.:

$$\%variación = \frac{[Cd]_{suelo,0} - [Cd]_{suelo,100}}{[Cd]_{suelo,0}} \times 100$$

El balance de materia conlleva también la realización de un análisis factorial completo, teniendo en cuenta los parámetros descritos en apartados anteriores (deposición atmosférica, pH, materia orgánica, Cd presente en fertilizantes y su tasa de aplicación, exceso de precipitación...).

Los resultados globales se representan en la tabla 2. De los cinco tipos de escenarios regionales, solo en uno se predice el incremento de cadmio en suelos (España, como representativa de la zona mediterránea). Este incremento es consecuencia de bajos niveles de lixiviación (por precipitaciones escasas), elevado pH del suelo y aplicación de fertilizantes relativamente alta en relación a la media. En conclusión, se puede decir que el balance de masa de Cd actual de la UE es negativo, lo cual supone la inversión de la tendencia obtenida en estimaciones anteriores. Se prevé que el Cd del suelo en cultivos de cereales y patata disminuya en un promedio de 15% en los próximos 100 años.

País	Propiedades suelo			Dep. atm. (g Cd/ha)	Fertilizantes		Lodos (g Cd/ha)	Variación (%)
	pH	Carbono orgánico (%)	[Cd] _{suelo} (mg Cd/kg)		Aplicación (kg P ₂ O ₅ /ha)	mg Cd/kg P ₂ O ₅		
Suecia	5,8	4,1	0,25	0,35	11	4,5	0,02	-15
Alemania	6,1	1,7	0,34	0,25	19	38,9	0,05	-18
España	6,4	1,7	0,26	0,30	28	40,6	0,17	+15
Reino Unido	6,6	2,8	0,30	0,35	30	22,2	0,14	0
Rep. Checa	5,9	1,9	0,24	0,40	14	-	0,06	-12
EU	5,8	2,5	0,28	0,35	21	36,0	0,05	-15

Tabla 2. Variación de la cantidad de Cd en suelos tras la aplicación de fertilizantes durante 100 años, para distintos escenarios de Europa.

4.5.4. Análisis del riesgo

El análisis de riesgos constituye una herramienta de evaluación de la probabilidad y magnitud de las consecuencias de la contaminación del suelo, que facilita la toma de decisiones para su adecuada gestión. Debe contemplar tanto la situación actual del mismo como cualquier situación futura previsible que pueda diferir de la actual, teniendo en cuenta que la consideración de escenarios futuros requiere un ejercicio de predicción con las consiguientes incertidumbres.

La evaluación de riesgos ambientales suele constar de cuatro etapas fundamentales:

- Determinación del peligro: identificación de los efectos en la salud que pueden producirse tras la exposición al tóxico, basándose en datos obtenidos en estudios epidemiológicos o de laboratorio.
- Evaluación de la relación dosis-respuesta: describe la probabilidad y severidad de ciertos efectos adversos en la con la dosis de tóxico recibida o la magnitud de la exposición.
- Evaluación de la exposición: estima la magnitud, frecuencia y duración de la exposición al agente tóxico. Para ello se requiere información acerca de su distribución y concentración en el ambiente, así como de los patrones de actividad de los individuos expuestos (ej. Datos de ingesta de alimentos).
- Caracterización del riesgo: integra los resultados obtenidos en las actividades anteriores para finalmente cuantificar los índices de riesgo para la salud de la población expuesta al tóxico, y establecer su alcance y significado. Para valorar los niveles de riesgo que representan los índices calculados, deben establecerse previamente rangos dentro de los cuales el riesgo es admisible (criterios de aceptabilidad), así como los umbrales a partir de los cuales el riesgo es inaceptable. No es posible asegurar que un suelo está contaminado sin hacer un análisis de riesgo, aunque los niveles de la sustancia de interés superen los niveles genéricos de referencia.

(Comunidad de Madrid, 2004; WHO, 2002)

Los análisis de riesgo se realizan frecuentemente empleando algún tipo de software que permita evaluación de las rutas de exposición y la aplicación de distintos modelos de transporte y transformación de sustancias tóxicas, así como gran cantidad de datos sobre las mismas (físicoquímicos, toxicológicos, legislación...). Un ejemplo es el programa RBCA Tool Kit for Chemical Releases.

Existen publicaciones en las que se realiza una revisión de la contaminación de los suelos que a su vez incluyen un análisis del riesgo; algunas de ellas tienen como objeto de estudio los metales pesados en China. Los altos niveles de Cd en la superficie de los suelos en varias regiones chinas son resultado del rápido crecimiento industrial ocurrido en las últimas décadas. Las concentraciones de metales en zonas mineras representan los mayores niveles de contaminación. El índice de peligro (HI) en dichas áreas es >1 (considerado inaceptable) y pone de manifiesto la necesidad de reforzar la regulación de la actividad minera para proteger a la población (Li, 2014). Por otro lado, el análisis de suelos no contaminados indica que las provincias con mayor índice de peligro presentan valores en torno a 0,25; pese a no superior a 1 los autores lo consideran suficientemente preocupante para la salud de los habitantes de estas

provincias (Xinjiang, Hunan), en algunas de las cuales se da el cultivo intensivo de arroz (Wang, 2015).

5. CONCLUSIONES

- En la actualidad el cadmio sigue siendo un elemento frecuente en nuestro medio, al que toda la población está expuesta en mayor o menor medida, especialmente en ambientes urbanos. Sus emisiones al ambiente son debidas principalmente a la actividad del ser humano y la mayor parte de la exposición al cadmio se produce a través de la dieta.
 - En Europa, la perspectiva actual relativa a la presencia de cadmio en el medio es optimista, ya que se han reducido sus fuentes de emisión en los últimos años. Asimismo ha descendido el uso de fertilizantes fosfatados, lo que se traduce en un menor aporte de cadmio a los suelos, y por tanto en menores niveles del metal en alimentos.
 - En algunas zonas del planeta con alto nivel de industrialización, pero con una legislación poco desarrollada en materia ambiental, el cadmio supone un problema aún más grave. Se deberían pues, tomar las medidas necesarias para tratar de revertir esta situación, así como monitorizar las poblaciones afectadas con el fin de asegurar su salud.
-

BIBLIOGRAFÍA

- Agency for Toxic Substances & Disease Registry (ATSDR). Public Health Statement for Cadmium, 2012.
<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp.asp?id=48&tid=15>
- Aoshima K., Itai-itai disease: cadmium-induced renal tubular osteomalacia. *Nihon Eiseigaku Zasshi*. 2012;67(4):455-63.
- Badillo Germán, J.F., Curso básico de toxicología ambiental. p. 205-29. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Metepec; ECO; 1985. Tab.
- Bautista Zúñiga F. *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales* Vol.1. UADY, 1999.
- Brookins D. Geochemical behavior of antimony, arsenic, cadmium and thallium: Eh-pH diagrams for 25°C, 1-bar pressure. *Chemical Geology*, 54 (1986) 271--278 Elsevier Science Publishers.
- Capó Martí M.A., *Principios de ecotoxicología: diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente*. Editorial Tebar, 2007.

- Comunidad de Madrid, Consejería de Medio Ambiente. Guía de análisis de riesgos para la salud humana y los ecosistemas. 2004.
- Directiva 83/513/CEE del Consejo, de 26 de septiembre de 1983, relativa a los valores límite y a los objetivos de calidad para los vertidos de cadmio.
www.madrid.org/rlma_web/html/web/Descarga.icm?ver=S&idLegislacion=1175&idDocumento=1
- España. Orden 2770/2006 de 11 de agosto, de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, por la que se procede al establecimiento de niveles genéricos de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos contaminados de la Comunidad de Madrid. BOE, núm. 204
www.madrid.org/rlma_web/html/web/Descarga.icm?ver=S&idLegislacion=1073&idDocumento=1
- España. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. BOE núm. 262
<https://www.boe.es/boe/dias/1990/11/01/pdfs/A32339-32340.pdf>
- España. Real Decreto-ley 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. BOE, núm. 45
<https://www.boe.es/boe/dias/2003/02/21/pdfs/A07228-07245.pdf>
- Estévez J, Andrade M L, Marcet P, Montero M J. Fijación y movilidad de cadmio y zinc en tres tipos de suelos ácidos de Galicia, España. *Ciencia del suelo*, Vol. 18, Nº. 1, 2000, págs. 28-35
http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_18n1/estevez_28-35.pdf
- Galvão, L. A. C., Corey, G. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud. Metepec; 1987. 75 p. Tab. (ECO serie Vigilancia, 4).
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/eco/004663.pdf>
- Greenwood N.N., Earnshaw A. *Chemistry of the Elements* 2nd ed. Elsevier Science, 2002
- Järup L.; Åkesson A. Current status of cadmium as an environmental health problem. *Toxicology and Applied Pharmacology* 238 (2009) 201–208
- Jordán M.M.; Almendro-Candel M.B., Navarro-Pedreño J. Ensayos de movilidad de cadmio, cromo y níquel en un suelo de la provincia de Alicante tratado con lodo de depuradora. *Macla. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía* (6): 273-276, 2006
http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla6/Macla6_273.pdf
- Kabata-Pendias, A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 3rd ed., CRC Press, 2000.
- Kitagashi K., Yamane I., Heavy Metal pollution in Soils of Japan, Japan Science society press Tokyo, 302, 1981.
- Klaassen C, Liu J., Diwan B., Metallothionein protection of cadmium toxicity. *Toxicology and Applied Pharmacology* 238 (2009) 215–220
- Li Z, Ma Z, van der Kuijp TJ, Yuan Z, Huang L (2014) A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment. *Sci Total Environ* 468–469:843–53
- Manahan S., *Introducción a la química ambiental*. Reverte, 2006.
- McLaughlin M.J., Singh B.R. *Cadmium in Soils and Plants*. Springer Science & Business Media, 1999
- Metallothionein protection of cadmium toxicity. Klaassen C, Jie L, Bhalchandra A. Diwan. *Toxicology and Applied Pharmacology* 238 (2009) 215–220
- Milieu, WRc, RPA. Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land—final report; 2008
- Nordic Council of Ministers. Cadmium Review, January 2003.
http://www.who.int/ifcs/documents/forums/forum5/nmr_cadmium.pdf

- Osorio Saldivar, L.; Tovar Tovar, A.; Fortoul van der Goes, T. En: Albert Palacios, Lilia América. *Introducción a la toxicología ambiental*. Capítulo 13 p. 211-26. Metepec; ECO; 1997.
- Ramírez A., Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de la Facultad de Medicina*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Vol. 63, N° 1 - 2002 Págs. 51 – 64
http://sisbib.unmsm.edu.pe/bvrevistas/anales/v63_n1/pdf/toxicologia_cadmio.pdf
- Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR). Cadmio y compuestos.
<http://www.prtr-es.es/Cd-Cadmio-y-compuestos,15605,11,2007.html>
- Reglamento (CE) n° 1881/2006 de la Comisión, de 19 de diciembre de 2006, por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios. DOUE núm. 364, 20 de diciembre de 2006, pág. 5-24.
<https://www.boe.es/doue/2006/364/L00005-00024.pdf>
- Reglamento (UE) n° 420/2011 de la Comisión, de 29 de abril de 2011, que modifica el Reglamento (CE) n° 1881/2006, por el que se fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios. DOUE núm. 111, 30 de abril de 2011, pág. 3-6.
<https://www.boe.es/boe/dias/2003/02/21/pdfs/A07228-07245.pdf>
- Rieuwerts J.S., Thornton I., Farago M.E. Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 10:2, 61-75 (1998)
- Six L., Smolders E., Future trends in soil cadmium concentration under current cadmium fluxes to European agricultural soils. *Science of the Total Environment* 485–486 (2014) 319–328
- US Environmental Protection Agency. Conducting a Human Health Risk Assessment.
<https://www.epa.gov/risk/conducting-human-health-risk-assessment>
- Wang L., Cheng H., A review of soil cadmium contamination in China including a health risk assessment. *Environ Sci Pollut Res* (2015) 22:16441–16452
- WHO. Environmental Health Criteria 134: Cadmium, International Programme on Chemical Safety (IPCS), Geneva, Switzerland. 1992
- WHO. Exposure to cadmium: a major public health concern (2010)
<http://www.who.int/ipcs/features/cadmium.pdf>
- WHO. Informe sobre la salud en el mundo, 2002. Cap. 2. Definición y evaluación de los riesgos para la salud.