

Distribución química de plomo, cromo y cadmio en lodos cloacales y sus cenizas

Rodríguez, R. A.¹, Echegaray, M.¹, Castro, R.¹ y Udaquiola, S.¹

Recibido: 14 de mayo de 2007 – Aceptado: 12 de julio de 2007

RESUMEN

Con el objeto de estudiar el uso de los lodos como acondicionadores de suelos y su incineración se aplicó un método de extracción secuencial de cinco pasos para la determinación de la distribución de Pb, Cr y Cd en lodos cloacales colectados de una planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de San Juan, Argentina y las cenizas provenientes de los mismos. Los lodos cloacales pueden contener altas concentraciones de metales pesados y la mayoría de ellos están presentes en las cenizas y polvos producidos en la incineración. Las diferentes disposiciones de los lodos cloacales son: fertilizantes, relleno sanitario, vuelco al océano teóricamente prohibido desde 1998, y la incineración. Hasta el momento, la mayoría de los municipios en Argentina están tratando de adoptar el relleno sanitario y compostaje como las principales alternativas para la disposición final de lodos cloacales. En la extracción secuencial de lodos cloacales y sus cenizas, las proporciones de Cr y Cd asociadas con la fracción soluble en agua, soluble en sustancias ácidas y fácilmente reducibles son considerablemente altas. Este aspecto debe ser considerado cuando los lodos cloacales sean usados como fuente de nutrientes para plantas y acondicionadores de suelos debido a que esta proporción de metales pesados puede ser fácilmente removible. Otro aspecto a considerar es la liberación de metales pesados durante la combustión de lodos. La misma fracción de metales pesados es fácilmente liberada durante este fenómeno y requiere un sistema de lavado de gases para ser retenida. En el caso de las cenizas, este residuo sólido debe ser categorizado como residuo peligroso y por consiguiente debe tenerse cuidado en su disposición final.

Palabras clave: barros cloacales-cenizas-extracción secuencial-metales pesados

Chemical distribution of lead, chromium and cadmium in sewage sludge and its ashes

ABSTRACT

A five-step sequential extraction method was applied to determine the distribution of Pb, Cr and Cd in sewage sludge, and ashes produced by incineration, collected at the wastewater treatment plant. Sewage sludge can contain high concentrations of heavy metals and most heavy metals are present in the ashes and dust produced by incineration. The different ways of sewage sludge disposition are: as fertilizer, landfilling, ocean dumping—theoretically forbidden since 1998, and the incineration. At the moment, most of the municipalities in Argentina are trying to adopt landfilling and biocomposting as main alternatives for the final disposition of sewage sludge. The use of sludge as soil conditioner and their incineration were studied. In the sequential extraction of sewage sludge and its ash, the rates of Cr and Cd associated with the fraction soluble in water, soluble in acidic substances and easily reducible is considerably high. This aspect must be considered when the sewage sludge is used as a source of nutrients for plants and soil conditioner because this proportion of heavy metals can be easily removed. Other aspect to consider is the release of heavy metals during sludge combustion. The same fraction of heavy metals is easily released during this phenomenon and requires a scrubber to be retained. In the case of the ashes, this type of solid waste should be categorized as hazardous waste and therefore care should be taken in its final disposition.

Keywords: sewage sludge-ash- sequential extraction -heavy metals

¹ Facultad de Ingeniería, Instituto de Ingeniería Química. Universidad Nacional de San Juan, Argentina. E-Mail: rrodri@unsj.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

Los lodos cloacales han sido usados en muchos países como fuente de nutrientes para crecimiento de plantas y como acondicionador de suelos para mejorar sus propiedades físicas. Sin embargo, la aplicación en tierra de los lodos cloacales ha sido limitada por su contenido rico en patógenos y metales pesados. Niveles excesivos de metales pesados introducidos al suelo por lodos cloacales pueden conducir a una elevada captación de metales pesados por las plantas, lo cual causará daño a las plantas y afectará la salud humana debido al consumo de cosechas provenientes del suelo.

Por otro lado, la actual tendencia indica un creciente interés en el proceso térmico de los lodos, particularmente en la incineración de los mismos, debido a sus principales ventajas: reducción de volumen, destrucción de contaminantes orgánicos y patógenos, y recuperación de energía. Las corrientes de salida que se generan en el proceso de incineración son gases, polvos y cenizas. Los principales contaminantes del residuo sólido son los metales pesados.

La concentración de metales pesados presente en la composición de los lodos cloacales depende de la actividad industrial en el área de captación, y ellos permanecen en los lodos durante el proceso de tratamiento de aguas residuales y son incorporados en su materia sólida (Werther and Ogada, 1999).

El incremento en la producción de lodos en los países en desarrollo como Argentina crea un gran motivo de preocupación relacionado con la disposición final de los mismos. En la actualidad, la mayoría de los municipios en Argentina están tratando de adoptar el relleno sanitario y el compostaje como las principales alternativas para la disposición de lodos cloacales.

Las diferentes formas de los metales pesados tienen diferente movilidad y fitodisponibilidad (Chlopecka, 1996). El conocimiento de la distribución de los metales pesados en los lodos cloacales y sus cenizas es importante para entender la biodisponibilidad y movilidad de los metales pesados en suelos.

La especiación química puede ser definida como la identificación y cuantificación de las diferentes especies, formas o fases presentes en un material, o la descripción de ellas. Sin embargo, la determinación de las especies químicas específicas o formas de unión es difícil (Loska and Wiechula, 2002). Por consiguiente, la determinación de estas formas, como por ejemplo las llamadas móviles o formas unidas a carbonatos, dependiendo de los procedimientos

operacionales, pueden ser útiles para dar información sobre los riesgos de contaminación ambiental.

Se han reportado un gran número de métodos de extracción secuencial, muchos de los cuales son variantes del procedimiento de Tessier (Tessier *et al.*, 1979) en el cual los metales intercambiables y aquellos nominalmente asociados con carbonato, óxidos de Fe-Mn, material orgánico y residuos de silicatos fueron extraídos con diferentes reactivos (Álvarez *et al.*, 2001; Sobczynski and Siepak, 2001).

La distribución de metales pesados entre fracciones intercambiables, carbonato, óxido, orgánica y residual usando análisis de extracción secuencial puede evaluar la potencial fitodisponibilidad de metales pesados en lodos cloacales y sus cenizas.

La extracción secuencial (Tessier *et al.*, 1979) puede proveer información acerca de la identificación de la fuerza de unión del metal a las partículas y las asociaciones de fases de elementos trazas en el sedimento.

La liberación de metales pesados desde las cenizas depende de las características químicas del material en la ceniza en términos de forma y solubilidad: (i) los metales pesados pueden estar presentes como sales solubles en agua donde la dilución determina las concentraciones en la solución y no hay dependencia del pH. Por ejemplo, el Cr(VI) puede ser fácilmente liberado desde las cenizas (Bolan and Thiagarajan, 2001; Pohlandt-Schwandt *et al.*, 2002). (ii) Los metales pesados pueden estar presentes como fases solubles o moderadamente solubles pero atrapadas en materiales que necesitan disolución, como por ejemplo, carbonatos y óxidos, los cuales cuando se disuelven con ácido liberan las fases solubles (Appelo and Postma, 1996; Freyssinet *et al.*, 2002). La solubilidad de los metales pesados puede no estar directamente relacionada al ingreso de protones, pero los protones se requieren para disolver la cubierta superficial. (iii) Los metales pesados pueden ser liberados siguiendo el proceso de disolución. Por ejemplo, los metales pesados pueden estar presentes como carbonatos, óxidos o hidróxidos o como complejos superficiales, adsorbidos a óxidos o hidróxidos minerales en la matriz de la ceniza (Dijkstra *et al.*, 2002). La liberación de los metales pesados en esos tres escenarios puede ser gobernada por principios de equilibrio o puede ser controlada cinéticamente (Van Sloot *et al.*, 1996).

En este trabajo, se investigaron las diferentes formas químicas de Pb, Cr y Cd presentes en lodos cloacales y sus cenizas usando un procedimiento de extracción secuencial de cinco pasos. El objetivo principal de

este trabajo es la determinación de la especiación de los metales mencionados, tanto en los barros cloacales provenientes de la planta de tratamiento de San Juan, y las cenizas de los mismos, teniendo en cuenta su uso como mejoradores de suelo y la incineración.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Lodos cloacales y sus cenizas

El lodo cloacal es colectado en la planta de tratamiento de aguas residuales del Bajo Segura, desde la ciudad de San Juan, Argentina. Esta ciudad posee una población de 120000 habitantes; en ella no existen industrias pesadas y los metales pesados que se pueden encontrar en los residuos líquidos probablemente provienen de tintorerías, pinturerías e imprentas. Los lodos son procesados mediante la adición de una sustancia catiónica polielectrolítica que permite separar los sólidos de los líquidos, una estabilización con cal y una deshidratación mecánica; estos lodos no son sometidos a tratamiento biológico. Las propiedades físico-químicas seleccionadas y el contenido de metales pesados de los lodos cloacales y sus cenizas se muestran en la Tabla 1.

Tres muestras de lodos cloacales secos del mismo lote, fueron calcinadas en una mufla durante ocho horas a 850°C para obtener sus cenizas.

Tabla 1. Propiedades físico-químicas de los lodos cloacales y sus cenizas

	Lodo Cloacal	Ceniza
% humedad	72,99	-----
% ceniza	44,13	-----
% materia orgánica	55,87	-----
Pb (mg/kg)	228	555
Cd (mg/kg)	1.4	3.5
Cr (mg/kg)	31.9	78

2.2. Análisis químico

El método usado para la digestión de lodos cloacales y sus cenizas fue la digestión vigorosa de la EPA (Environmental Protection Agency) con plato caliente para análisis de metales. Ese método fue usado para asegurar el rompimiento de todas las uniones organometálicas: la muestra fue acidificada con solución de HNO₃ 1:1 hasta pH menor que dos. La misma no debe ser filtrada antes de la digestión. Posteriormente fue colocada sobre un plato caliente y evaporada hasta casi sequedad. Luego, se adicionó HCl 1:1 y se calentó. Se adicionaron 5 ml de NaOH 5N y la muestra se transfirió cuantitativamente con agua desionizada a un vaso. El pH se ajustó a un valor de 4 con la adición de NaOH. Los extractos fueron analizados con el Espectrómetro portátil Dataloging HACH DR/2010. Este aparato trabaja en el rango visible de longitudes de onda. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

El procedimiento de extracción química secuencial propuesto por Tessier ha sido ampliamente usado para investigar las fases químicas de los metales pesados en las cenizas. En este procedimiento Tessier clasificó cinco tipos de iones para unir sobre la superficie de una matriz inorgánica: la fase intercambiable, fase de carbonatos, óxidos de Fe-Mn, fase de materia orgánica y fase residual (silicatos).

El esquema aplicado en este trabajo fue usado para investigar la partición y movilidad de Pb, Cr y Cd en el lodo cloacal seco y su ceniza en varias fracciones. En la Tabla 2 se describen los reactivos de extracción y las condiciones experimentales de cada etapa. En las etapas 1 y 2 se adicionó HNO₃ para mantener el pH constante.

Tabla 2. Reactivos usados en cada etapa de extracción y fracción de extracción en el procedimiento de extracción secuencial.

Etapas	Reactivo de Extracción	Fracción	Condiciones	Componente Extraído
1	Agua destilada	Soluble en agua	20°C, 3 h, pH 7, agitación continua	Nitratos, sulfatos y cloruros
2	CH ₃ COOH 0.5 M + Ca(NO ₃) ₂ 0.1 M	Soluble en sustancias ácidas	20°C, 3 h, pH 5, agitación continua	Carbonatos, sulfatos e hidroxidos
3	(NH ₄) ₂ C ₂ O ₄ 0.175 M + H ₂ C ₂ O ₄ 0.1 M	Fácilmente reducible	95°C, 3h, agitación intercambiabile, protegida de la luz	Sólidos Amorfos
4	Na ₂ EDTA 0.1 M + NH ₂ OH.HCl 0.3 M	Moderadamente reducible	95°C, 24 h, agitación intercambiabile	Sólidos cristalinos
5	10 mL HCl 36% + 5 mL HNO ₃ 69% + 2.5 mL HF 40% + 2.5 mL agua destilada	Residual	150°C, 48-72 h, agitación continua	Silicatos y aluminatos

h = horas

La relación entre la masa de muestra y el volumen de solución fue constante (1g/10ml) para cada etapa de extracción. Al final de cada etapa, las partículas sólidas fueron separadas por centrifugación y filtrado. La concentración de metales pesados en cada solución fue determinada por el espectrómetro portátil Dataloging HACH DR/2010. Este procedimiento permite determinar el porcentaje de masa de diferentes metales pesados en el lodo cloacal y su ceniza soluble en cada etapa de extracción.

El método de extracción secuencial permite simular diferentes condiciones ambientales a las que el lodo y sus cenizas pueden ser expuestas.

Las formas químicas fácilmente solubles pueden ser evaluadas por los resultados obtenidos de las etapas 1 y 2. Las formas químicas solubles en escaso grado o difícilmente solubles pueden ser evaluadas por los resultados obtenidos en las etapas 3 y 4.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El método de extracción secuencial de Tessier ha sido aplicado al análisis de la distribución de metales en el lodo cloacal y sus cenizas de la ciudad de San Juan, Argentina y los resultados obtenidos se detallan a continuación:

Los resultados de la extracción secuencial podrían no reflejar necesariamente las asociaciones requeridas por las fases, pero representan las diferentes condiciones de lixiviación dentro de un relleno sanitario. Los barros cloacales se caracterizan por su gran heterogeneidad, debido a esta propiedad es que las concentraciones totales de los metales pesados en

las cenizas son mayores que el doble de las concentraciones en los lodos, mientras que el peso de estos residuos se reduce a aproximadamente la mitad durante la combustión.

3.1. Lodos cloacales

Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 1 a 5. Las formas químicas de metales son afectadas por el pH, potencial redox (Eh), materia orgánica y otros factores (Chlopecka and Adriano, 1997; Chlopecka, 1996; Dudka et al, 1995).

La proporción de la fracción soluble en agua es muy pequeña para Pb (0.16%) y Cd (2.27%), y en esta fracción no está presente el Cr.

Los compuestos solubles en sustancias ácidas están presentes en todos los metales pesados analizados (Cd 1.64%, Cr 20% Pb y 0.32%), pero las proporciones para Pb y Cd son muy pequeñas.

La proporción del extracto en las etapas 3 y 4 es muy pequeña para Pb (0.67 y 0.78%). El Cr no es detectado en el extracto de la etapa 3, pero la proporción de la fracción moderadamente reducible es la mayor (80%). Para el Cd, la proporción de la fracción fácilmente reducible es la mayor (78%) pero la proporción de la fracción moderadamente reducible es pequeña (1.41%).

La fracción residual no está presente en los lodos para el Cr, pero es la mayor fracción para el Pb (98%). El porcentaje de la fracción residual, en el caso de Cd es 16.43%.

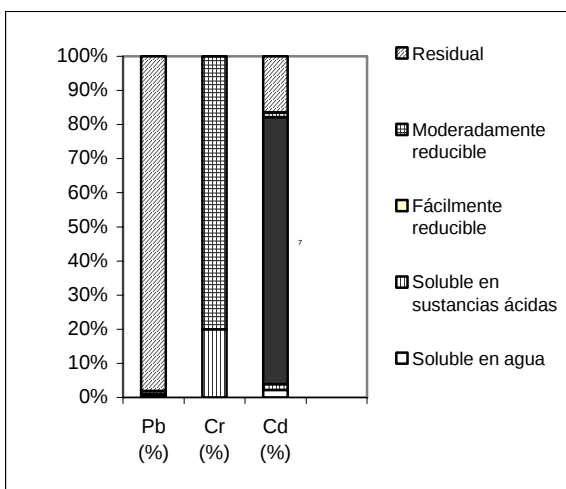


Figura 1. Resultados de la extracción secuencial. Lodo cloacal.

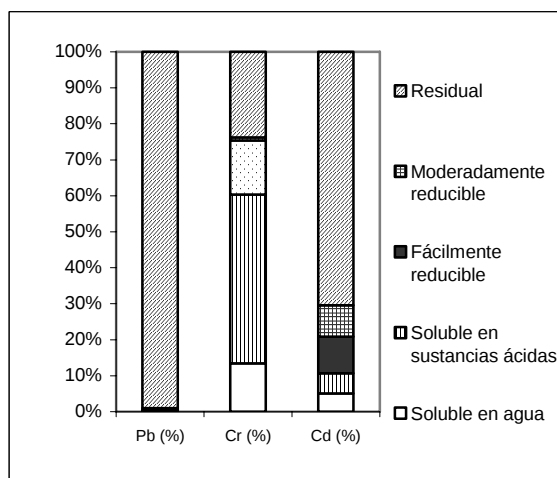


Figura 2. Resultados de la extracción secuencial. Ceniza.

3.2. Ceniza

La especiación química de Pb, Cr y Cd cambió cuando el lodo se convirtió en ceniza por combustión (Figuras 3, 4 y 5). Las proporciones de Pb de todas las fracciones en la ceniza, excepto para la fracción

residual, son muy pequeñas. Estas proporciones en el lodo cloacal son siempre mayores que las mismas proporciones en la ceniza. Casi todo el Pb (99% del Pb total) se encontró en fracción residual.

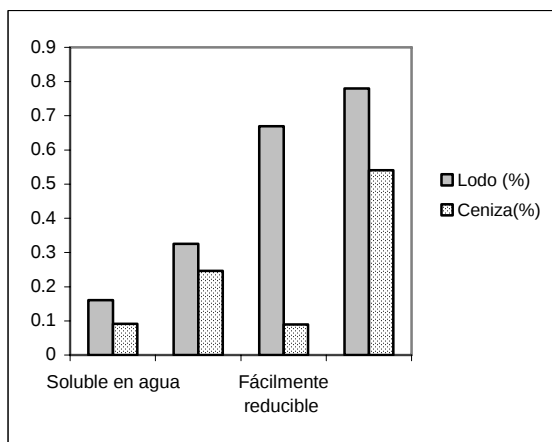


Figura 3: Resultados de la extracción secuencial. Pb en el lodo cloacal y sus cenizas sin la fracción residual.

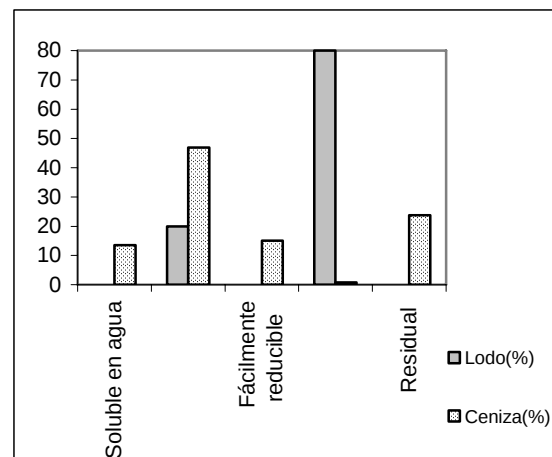


Figura 4: Resultados de la extracción secuencial. Cr en el lodo cloacal y sus cenizas.

Las distribuciones de Cd también difieren significativamente entre el lodo cloacal y la ceniza. El porcentaje de Cd en la fracción residual (70.22%) y moderadamente reducible (8.73%) aumenta en el caso de la ceniza, mientras que la fracción fácilmente reducible (10.64%) disminuye. El Cd también está presente en el extracto de la etapa 1 (5.07%) y 2 (5.63%). Las distribuciones de Cr difieren significativamente entre el lodo cloacal y la ceniza. El

Cr está presente en todas las fracciones. La proporción de Cr de la fracción moderadamente reducible es la más pequeña (0.79%) y es menos notable respecto del lodo cloacal. La mayor es la fracción soluble en sustancias ácidas (46.82%). Esta fracción es mayor con respecto al lodo cloacal. La fracción soluble en agua destilada (13.49%), fácilmente reducible (15%) y la fracción residual (23.81%) son importantes.

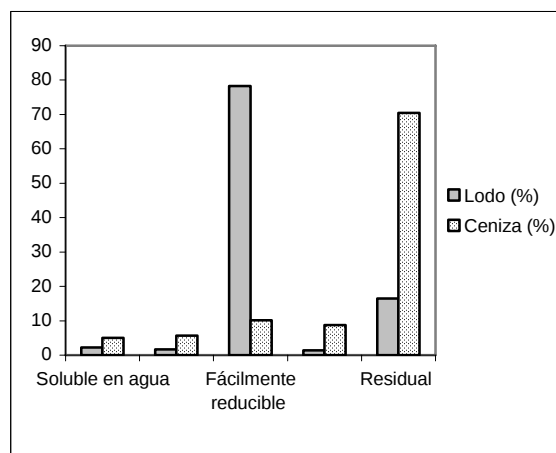


Figura 5: Resultados de la extracción secuencial. Cd en el lodo cloacal y sus cenizas.

La fracción residual en la ceniza es mayor que la misma fracción en el lodo cloacal para todos los metales pesados. El pH elevado y el contenido de CaO y MgO en la ceniza puede ser la causa de estos

resultados. Para el Pb esta influencia no es importante debido a que hay bajas concentraciones de este elemento en las fracciones no residuales provenientes de los lodos, (Tabla 3).

Tabla 3. Contenido de metales pesados en las distintas fracciones para lodos y cenizas.

Fracción	Lodos			Cenizas		
	% Pb	% Cd	% Cr	% Pb	% Cd	% Cr
Soluble en agua	0.16	2.27	0	≈ 0	5.07	13.49
Soluble en sustancias ácidas	0.32	1.64	20	≈ 0	5.63	46.82
Fácilmente reducible	0.67	>78	0	≈ 0	10.64	15
Moderadamente reducible	0.78	1.41	>80	≈ 0	8.73	0.79
Residual	98	16.43	0	99	70.22	23.81

4. CONCLUSIONES

En el caso del lodo los compuestos químicos de los tres metales pesados son muy diferentes:

1. El Pb en su mayoría (98% del Pb total) se encontró como silicatos y aluminatos, esta fracción no puede removerse en las condiciones normalmente encontradas en la naturaleza. También se encontró como nitratos, sulfatos, cloruros, carbonatos, sulfuros, hidróxidos y sólidos cristalinos y amorfos, pero en proporciones muy pequeñas.
2. El Cr fue extraído solamente en las etapas 2 y 4. Estos resultados mostraron que casi todo el Cr se encontró como sólidos cristalinos (80%) y como carbonato, sulfuros e hidróxidos (20%).
3. El Cd en su mayor parte, (78% del Cd total) se encontró como sólidos amorfos. El Cd puede estar presente como nitratos, sulfatos, cloruros, carbonatos, sulfuros, hidróxidos, sólidos cristalinos, silicatos y aluminatos pero sus proporciones son más pequeñas.

En el caso de las cenizas, los compuestos químicos de los tres metales pesados son muy diferentes también:

1. El Pb, casi totalmente, (99% del Pb total) se encontró como silicatos y aluminatos. También se encontró como nitratos, sulfatos, cloruros, carbonatos, sulfuros, hidróxidos, sólidos amorfos y cristalinos, pero en muy pequeñas proporciones.
2. El Cr fue extraído en todas las etapas. Estos resultados muestran que el Cr se encontró como nitratos, sulfatos y cloruros (13.49%), carbonatos, sulfuros e hidróxidos (46.82%), sólidos amorfos (15%) y cristalinos (0.79%), silicatos y aluminatos (23.81%).
3. La mayor proporción de Cd (70% del Cd total) se encontró como silicatos y aluminatos. El Cd puede estar presente como nitratos, sulfatos y cloruros (5.07%), carbonatos, sulfuros e

hidróxidos (5.63%), sólidos amorfos (10.64%) y cristalinos (8.73%).

Comparando los compuestos químicos de los tres metales entre lodo cloacal y sus cenizas:

1. Las diferentes fracciones de Pb son similares tanto en los lodos como en sus cenizas, sin embargo, la proporción de nitratos, sulfatos, cloruros, carbonatos, sulfuros, hidróxidos, sólidos amorfos y cristalinos en el lodo cloacal es mayor, pero no demasiado.
2. Las distribuciones de Cr y Cd difieren significativamente entre el lodo y sus cenizas. El alto pH y los contenidos de CaO y MgO en la ceniza puede incrementar las concentraciones de silicatos y aluminatos.

5. RECOMENDACIONES

La Resolución N° 97/2001 emitida por el Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente, Argentina, reglamenta el manejo sustentable de barros generados en plantas de tratamiento de efluentes líquidos. En el Anexo I de dicha resolución, Artículo 12, de este reglamento se enumeran los diferentes usos de los barros cloacales los cuales son: agrícola-ganaderos y forestal, recuperación de suelos degradados, restauración del paisaje, elaboración de abonos y enmiendas, elaboración de elementos de construcción y utilización como material combustible. También enumera las diferentes disposiciones finales, a saber: relleno sanitario en celdas separadas, incorporación a rellenos sanitarios, cobertura final de rellenos sanitarios, tratamiento biológico de suelos (landfarming) y termodestrucción.

Continuando con el mismo reglamento, el Anexo III establece que tipo de uso y disposición final son aptos para ellos de acuerdo a sus características. En el Artículo 22 de este anexo, se define la Dosis Anual Completa de Barros (DACB) y la Dosis Anual Real de Barros (DRB) como:

$$\begin{aligned} \text{DACB} &= \text{DACC} \times 1000 \times \text{C}^{-1} & (1) \\ \text{DRB} &= \text{DACB} \times 100 \times \text{MS}^{-1} & (2) \end{aligned}$$

Donde DACB está expresado en base seca en tn/ha.año; DACC es la Dosis Anual de Carga de Contaminantes para el compuesto n expresado en kg/ha.año y C es la Concentración del Contaminante n en el barro expresado en mg/kg de barro seco y MS es el porcentaje de materia seca en el barro a emplear. Estas dosis son las dosis permitidas que se pueden

adicionar en suelos, usar como fertilizantes o enviar a relleno sanitario sin perjudicar el medio ambiente.

Para destinar los barros a usos agrícolas, forestales, recuperación de suelos, restauración de paisajes y como mejoradores de suelos, esta Resolución fija valores límites de concentración de metales pesados en los barros, como así también la DACC para los mismos. Estas condiciones pueden observarse en la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones que deben cumplir los barros cloacales según Resolución N° 97/2001.

Parámetro	Valores límites en barros (mg/kg en base seca)	Carga anual (kg/ha año)
As	75	2
Cd	20-40	0.15
Cr	1000-1500	3
Cu	1000-1750	12
Hg	16-25	0.1
Ni	300-400	3
Pb	750-1200	15
Zn	2500-4000	30
Bifenilos policlorados	0.8	1.2

En la Tabla 5 se indican los valores de las dosis DACB y DRB obtenidos para los barros cloacales y

cenizas en estudio asociados a los metales Pb, Cr y Cd.

Tabla 5. Valores de dosis recomendadas DACB y DRB para barros cloacales y sus cenizas de acuerdo a al contenido de Pb, Cr y Cd.

	DACC (kg/ha.año)	C (mg/kg)	DACB (tn/ha.año)	DRB tn/ha.año) LODOS	DRB tn/ha.año) CENIZAS
Pb	15	228	66	244	27
Cr	3	31.9	94	348	38
Cd	0.51	1.4	107	397	43

De acuerdo a los datos obtenidos de los barros cloacales provenientes de la planta de tratamiento de la provincia de San Juan y en base a la normativa vigente se recomienda su uso como mejorador de suelos en una dosis máxima de 244 tn/ha.año y en el caso de las cenizas se deberían colocar en relleno sanitario.

1. Las proporciones de Cr y Cd asociadas con las primeras tres fracciones (soluble en agua, soluble en sustancias ácidas y fácilmente reducible) son importantes debido a que representan la proporción de metales pesados que pueden ser fácilmente removidos por cambios en las condiciones ambientales tales como pH, salinidad etc. Este aspecto debe ser considerado cuando el lodo cloacal será usado como fuente de nutrientes para plantas y acondicionador de suelos.

2. Otro aspecto a considerar es la liberación de los metales pesados durante la combustión. La fracción de metales pesados extraída en las etapas 1, 2 y 3 son fácilmente liberados durante este fenómeno y requieren un sistema lavador de gases para ser retenidos.

3. En el caso de las cenizas, las proporciones de Cr y Cd asociadas con las primeras tres fracciones (soluble en agua, soluble en sustancias ácidas y fácilmente reducible) deben tenerse en cuenta ya que estas fracciones representan la proporción de metales pesados que puede ser fácilmente removida por cambios en las condiciones ambientales. Considerando este aspecto la ceniza debería ser categorizada como residuo peligroso y por consiguiente deberían tomarse los recaudos necesarios en cuanto a su disposición final.

REFERENCES

- Abadanes S. (2001). Comportement des metaux lourds dans les procédés échets ménagers. Thèse, Université de Perpignan.
- Alvarez MB, Malla ME, Batistoni DA. (2001). Fresenius Journal of Analytical Chemistry; (369) 81– 90.
- Appelo, C.A.J., Postma, D. (1996). Geochemistry, Groundwater and Pollution. Balkema, Róterdam.
- Bolan, N.S., Thiagarajan, S. (2001). Retention and plant availability of chromium in soils as affected by lime and organic matter amendments. Australian Journal of Soil Research (39) 1091–1103.
- Chlopecka A. (1996). Forms of Cd, Cu, Pb, and Zn in soil and their uptake by cereal crops when applied jointly as carbonates. Water Air Soil Pollut; (45) 297– 308.
- Chlopecka A., Adriano D. (1997). Influence of zeolite, apatite and Fe-oxide on Cd and Pb uptake by crops. Science of The Total Environment (207) 1 2-3, 27: 195-206.
- Dijkstra, J., van der Sloot, H.A., Comans, R.N.J. (2002). Process identification and model development of contaminant transport in MSWI bottom ash. Waste Management (22) 531–541.
- Dudka S., Piotrowska M., Chlopecka A., Witek T. (1995). Trace metal contamination of soils and crop plants by the mining and smelting industry in Upper Silesia, South Poland. Journal of Geochemical Exploration (52) I 1-2: 237-250.
- Freyssinet, Ph., Piantone, P., Azaroual, M., Itard, Y., Clozel-Leloup, B., Guyonnet, D., Baubron, J.C. (2002). Chemical changes and leachate mass balance of municipal solid waste bottom ash
- Loska K, Wiechula D. (2002). Speciation of cadmium in the bottom sediment of Rybnik Reservoir. Water, Air and Soil Pollution; (141) 73– 89.
- Pohlandt-Schwandt, K., Salthammer, T., Marutzky, R.. (2002). Reduction of soluble chromate in wood ash by formaldehyde. Biomass and Bioenergy (22) 139–143.
- Sobczynski T, Siepak J. (2001). Speciation of heavy metals in bottom sediments of lakes in the area of Wielkopolski National Park. Polish Journal of Environmental Studies; (10) 463–74.
- Tessier A, Campbell PGC, Bisson M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical Chemistry; (51) 844– 50.
- Van der Sloot, H.A., Comans, R.N.J., Hjelmar, O. (1996). Similarities in the leaching behaviour of trace contaminants from waste, stabilized waste, construction materials and soils. Science of the Total Environment (178) 111–126.
- Werther J., Ogada T. (1999). Sewage sludge combustion. Progress in Energy and Combustion Science (25) 55-116.

Este documento se debe citar como:

Rodríguez, R. A., Echegaray, M., Castro, R. y Udaquiola, S. (2007). **Distribución química de plomo, cromo y cadmio en lodos cloacales y sus cenizas**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 11-2, pp. 31-38, ISSN: 1665-529X