

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Biodegradación de desechos de curtiduría y lodo residual por composteo y vermicomposteo.
<i>Autor / Adscripción</i>	Lina Cardoso Vigueros Esperanza Ramírez Camperos Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 21(2): 93-103
<i>Fecha de publicación</i>	2006
<i>Resumen</i>	La industria de la curtiduría genera desechos con compuestos tóxicos y materiales orgánicos de lenta degradación. El presente trabajo tuvo como propósito evaluar la biodegradación y reducción de contaminantes de estos residuos mediante un proceso de composteo aerobio termofílico, seguido de una etapa de vermicomposteo con <i>Eisenia foetida</i> . Los resultados del estudio indican que los desechos de curtiduría deben estabilizarse mediante un proceso biológico como el composteo y vermicomposteo en serie para usarlos en plantas ornamentales seleccionadas. Los residuos de curtiduría no deben disponerse en suelo debido a su alta salinidad, deben ser tratados para remover todos los contaminantes, como cromo, sulfuros y patógenos.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/843

Biodegradación de desechos de curtiduría y lodo residual por composteo y vermicomposteo

Lina Cardoso-Vigueros
Esperanza Ramírez-Camperos

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

La industria de la curtiduría genera desechos con compuestos tóxicos y materiales orgánicos de lenta degradación. El presente trabajo tuvo como propósito evaluar la biodegradación y reducción de contaminantes de estos residuos mediante un proceso de composteo aerobio termofílico, seguido de una etapa de vermicomposteo con Eisenia foetida. La composta y la vermicomposta se probaron en el crecimiento de dos plantas ornamentales, Schefflera actinophylla y Dracaena sanderiana. Los desechos estudiados fueron lodo de la planta de tratamiento de aguas residuales y pelo generado en el proceso de producción. Los lodos tienen las siguientes características: 4.1×10^2 NMP/100 ml de Escherichia coli, 3.3 huevos de helminto/g de lodo, pH de 8.4, conductividad eléctrica de 13.88 dSm^{-1} y alta concentración de cromo de 3,240 mg/kg. El pelo presentó un pH de 7.4 y alta conductividad eléctrica de 12.77 dSm^{-1} . Las pilas de composteo con baja densidad ($0.5\text{-}0.6 \text{ ton/m}^3$) lograron mayor estabilización, con una reducción de más de 50% de sólidos volátiles. En las mezclas que tuvieron un déficit en la relación C/N y alta densidad, la duración del proceso de composteo fue de ocho meses. Durante el proceso de composteo-vermicomposteo se obtuvo una disminución del 100% de la concentración de Escherichia coli y 100% de huevos de helminto. La concentración de cromo disminuyó a valores de 562 mg/kg. El valor de conductividad eléctrica disminuyó de 13.88 a 12.5 dSm^{-1} al final del vermicomposteo. Las concentraciones de nitrógeno y fósforo al final de los procesos de composteo-vermicomposteo son similares a las encontradas en los abonos orgánicos (nitrógeno, 2.0-4.5%; fósforo, 0.051-0.14%). Las plantas ornamentales en que se utilizó composta y vermicomposta tuvieron un crecimiento de 10 a 20% mayor que el control en el cual se usaba un sustrato tradicional de vivero; sin embargo, este crecimiento no es estadísticamente significativo. Los resultados del estudio indican que los desechos de curtiduría deben estabilizarse mediante un proceso biológico como el composteo y vermicomposteo en serie para usarlos en plantas ornamentales seleccionadas. Los residuos de curtiduría no deben disponerse en suelo debido a su alta salinidad, deben ser tratados para remover todos los contaminantes, como cromo, sulfuros y patógenos.

Palabras clave: biodegradación, composteo, *Eisenia foetida*, vermicomposteo, curtiduría, lodo residual, pelo.

Introducción

La industria del curtido genera desechos, entre los que se encuentran polvo o raspa de piel, desechos de descarne, pelo y lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales. Por cada 1,000 kg de piel vacuna, sólo el 26% se convierte en cuero, el resto se considera residuos. Los desechos de curtiduría tienen altas concentraciones de materia orgánica de lenta degradación, como el pelo, y dependiendo del proceso de curtido pueden tener altas concentraciones de cloruro de sodio, cromo

(III), sulfuros y microorganismos patógenos (Mijaylova et al., 2004).

Los residuos requieren de un tratamiento de estabilización y reducción de contaminantes antes de disponerlos en un relleno sanitario. Las tecnologías que se estudian en este trabajo son el composteo aerobio termofílico, seguido del vermicomposteo, que provee de una estabilización adicional del material orgánico y una reducción de contaminantes.

La experiencia en el manejo de desechos de curtiduría demuestra que pueden ser tratados y aprovechados

por medio de una estabilización en dos etapas: composteo aerobio o anaerobio, y posteriormente la composta obtenida se mezcla con sustratos orgánicos como el lirio acuático y desechos de pasto, y se trata por vermicomposteo durante 10 a 12 semanas, obteniéndose un desecho con alto contenido de materia orgánica estabilizada de acuerdo con lo reportado por Torrebiarte (1999).

Para ayudar a resolver esta problemática, el presente estudio plantea los siguientes objetivos:

- Evaluar la biodegradación de lodo residual y el desecho del pelo de las pieles por medio del composteo aerobio termofílico en pila estática, seguida de una etapa adicional de vermicomposteo con *Eisenia foetida*.
- Evaluar el comportamiento de la composta y vermicomposta en el crecimiento de las plantas ornamentales *Schefflera actinophylla* y *Dracaena sanderiana*.

Problemática

El trabajo se realizó en una industria curtidora que produce 45 toneladas de cuero por día. De este total, sólo el 26% se convierte en cuero (11.7 ton) y el resto, 74%, constituye desechos (33.3 ton). La viruta de cuero se transporta fuera de la industria para producir complemento alimenticio de pollos y el producto del descarte se vende para la elaboración de gretina; sólo el pelo, que representa el mayor volumen, se desecha.

La industria recupera el cromo de sus efluentes por medio de precipitación química con carbonato de calcio, deshidratación por medio de filtro de banda y acidificación. Las aguas residuales de la empresa se tratan en un sistema de homogeneización, zanja de oxidación biológica y sedimentación. Los lodos generados se deshidratan en un lecho de secado y se almacenan en las instalaciones de la planta. Los desechos considerados para la elaboración de este trabajo fueron el pelo y el lodo residual generado en el tratamiento biológico de agua residual.

Origen de los residuos

De acuerdo con el INE (1999), el proceso de curtido requiere de cuatro pasos:

1. Ribera en donde se efectúa la limpieza de la piel (curtida o en bruto), de todos los componentes que no se pueden curtir.
2. Curtido donde se imparte la estabilidad química y física a la piel para evitar su putrefacción y transformarla en cuero.

3. Acabado en húmedo mediante el cual se logra impartir al cuero la suavidad, el color y otras características especiales.
4. Acabado en seco donde se imparte a la piel las características de acuerdo con las exigencias del mercado (grabado, laqueado, etcétera).

El pelo es un desecho que se genera en la etapa de ribera o producción de piel. Las pieles curtidas en sal pasan por una operación de remojo, donde se hidratan y limpian con agua, bactericidas, tenso activos y carbonato de sodio. Después se realiza una operación de descarte para remover el exceso de grasa, carne y piel. Posteriormente sigue la operación del pelambre, que consiste en el encalado y depilado para hacer más eficiente la separación del pelo. En esta operación se usan varios reactivos como: sulfuro de sodio, sulfhidrato de sodio, cal hidratada, desengrasante, enzimas y tenso activos. El pelo generado, por lo tanto, tiene una cantidad considerable de cloruro de sodio y sulfuros, entre los contaminantes de mayor importancia. Otra característica que lo hace de difícil tratamiento es la naturaleza resistente de las proteínas que lo constituyen, que son de difícil degradación. Además, estos desechos tienen un fuerte y desagradable olor.

Los lodos se generan en el tratamiento biológico de las aguas residuales de la curtiduría. Las principales características presentes en el lodo residual son alta salinidad y cromo (III), que proviene de la etapa de curtido. En el sistema de tratamiento también se vierten las descargas sanitarias de la empresa, por lo que además de los contaminantes generados en el proceso productivo, se deben considerar los de origen humano (patógenos). En la curtiduría se encuentran lodos frescos que se generan diariamente y lodos almacenados, en los cuales se concentran las sales por procesos naturales de evaporación. En el cuadro 1 se describen los principales contaminantes de los desechos de la curtiduría

Tecnologías propuestas para el tratamiento de lodo residual y residuos de la curtiduría

Biodegradación por composteo termofílico

El composteo es un proceso biológico para la estabilización de desechos orgánicos. Durante éste se lleva a cabo una degradación aerobia por bacterias y hongos a una temperatura termofílica en una mezcla de lodo deshidratado y material acondicionador. Provee una destrucción significativa de patógenos con temperatura de 40 °C durante cinco días consecutivos o también puede alcanzar una destrucción adicional de patógenos con

Cuadro 1. Descripción de las características contaminantes de los desechos de curtiduría.

Contaminante	Características contaminantes
Conductividad eléctrica (C.E.) ¹	Es una medida indirecta de la concentración de sales. Para conservar las pieles, se curten con 0.5 kg de cloruro de sodio por piel. Las concentraciones de C.E. mayores a 3 dSm ⁻¹ causan problemas severos en los cultivos. Un exceso de sodio o de cloruros provoca quemaduras en los bordes exteriores o en las puntas de las hojas.
Cromo (III) ²	Elemento esencial para el ser humano, pero que en altas concentraciones resulta tóxico. La EPA establece un límite de 100 µg de cromo (III) por litro de agua potable. OSHA ha establecido límites de 500 µg de compuestos de cromo (III) solubles por metro cúbico de aire en el área de trabajo durante jornadas de ocho horas diarias, cuarenta horas a la semana. Todas las formas de cromo, incluyendo cromo (III), causan cáncer a roedores, por lo que se consideran probables cancerígenos para seres humanos. El cromo trivalente de los residuos de piel se transforma químicamente en cromo hexavalente, forma mucho más tóxica de este metal.
Sulfuros ³	Grupo formado por una serie de compuestos, como el ácido sulfhídrico, el anhídrido sulfuroso y los mercaptanos. El límite máximo tolerado en el ambiente es de 300 ppm. Concentraciones ambientales de H ₂ S de 0.025 ppm son fácilmente detectadas por el olfato; de 50 a 100 ppm causa irritación de las mucosas; de 100 a 150 ppm, anosmia; > 400 ppm, coma, y > 1,000 ppm, muerte en pocos minutos.

Fuente: ¹ ATSDR (2001). ² Sengul y Gurel (1993); OSHA, 2001; WEF, 1993. ³ Mijaylova *et al.*, 2003.

una temperatura de 55 °C durante tres días consecutivos (USEPA, 1993). El resultado del proceso de composteo es un sustrato que puede ser utilizado como fertilizante o acondicionador de suelo. Ramírez *et al.* (1993) y Mijaylova *et al.* (2002) demostraron que el composteo de lodos residuales en pila estática logra reducir en 100% la concentración de patógenos; la reducción significativa de compuestos tóxicos orgánicos como antraceno y aldrín, y la dilución de la concentración de metales pesados.

Biodegradación por medio de vermicomposteo con Eisenia foetida y microorganismos aerobios

El vermicomposteo es una tecnología basada en la cría intensiva de lombrices para la producción de humus a partir de un sustrato orgánico. El proceso es similar al composteo termofílico, pero se lleva a cabo a temperatura ambiente. En el vermicomposteo, el material orgánico, además de ser tratado por los microorganismos (hongos, bacterias, actinomicetos, levaduras, etcétera) existentes en el medio, también lo es por el sistema digestivo de la lombriz. En el intestino de la lombriz ocurren procesos de fraccionamiento, desdoblamiento, síntesis, y enriquecimiento enzimático y microbiano, lo cual tiene como consecuencia un aumento significativo en la velocidad de degradación y mineralización del residuo, obteniendo un producto de alta calidad. Esta transformación hace que los niveles de pérdida de nutrientes como nitrógeno, potasio, etcétera, sean mínimos con relación a los sistemas tradicionales de composteo. El proceso de humificación lo llevan a cabo bacterias y hongos. El vermicomposteo de lodos residuales municipales es una tecnología que se maneja en algunas plantas de Estados

Unidos, donde se ha observado que mediante este método se logra reducir hasta 100% los patógenos (*Tri-Tech Laboratories*, 1996), y recientemente en México, obteniéndose los mismos resultados (Cardoso *et al.*, 2002).

Metodología

Para la caracterización de los materiales se usaron las siguientes técnicas microbiológicas: coliformes fecales-NOM112-SSA1-1994(CAMB6-03); *Escherichia coli*, técnica de sustrato cromogénico Colilert; huevos de helminto-NOM-ECOL-001 (CATMPB6-01). Los análisis fisicoquímicos se realizaron mediante las técnicas descritas en las siguientes referencias: Tisdall, 1951; Thucker, 1985; Etchevers, 1985; Jackson, 1964; Black, 1965; Chapman, 1979, y APHA, AWWA y WPCF, 1998.

Sistema experimental de composteo

Consistió en la instalación de un sistema de ventilación por pila, integrado por difusores de PVC de cuatro pulgadas de diámetro, seis metros de largo y dos metros de ancho, conectados a un ventilador centrífugo horizontal, con una capacidad de 100 m³ de aire/hora/tonelada de lodo seco y una velocidad de 7.6 m/s, y la construcción de cuatro pilas con diferentes mezclas, con una capacidad de tratamiento entre 40 y 65 m³ de desechos. Para el manejo de materiales se usó un cargador frontal de 3 m³ y un camión de volteo de 8 m³. Para la aeración se usaron controladores de tiempo. La proporción de los materiales y las características de las mezclas utilizadas aparecen en el cuadro 2.

Cuadro 2. Proporción de materiales y características de las mezclas utilizadas.

Pila	Cantidad de materiales m ³	Tipo de ventilación	Relación C:N	Densidad ton/m ³	Sólidos y humedad %		
					ST	SV	H
1	30 lodo seco y 30 pelo	Aeración forzada	7.1	0.61	56.50	44.12	43.50
2	20 lodo seco y 20 pelo	Volteo	7.1	0.61	63.1	48.0	36.9
3	15 lodo fresco, 30 pelo y 20 cascarilla de arroz	Aeración forzada	9.1	0.515	40.44	55.37	59.56
4	15 lodo fresco y 36 de pelo	Aeración forzada	5.1	0.83	36.11	48.0	63.89

ST= sólidos totales; SV = sólidos volátiles; H= humedad; C:N = carbono:nitrógeno.

Las pilas 1 y 2 tuvieron la misma composición y se utilizó lodo seco, que fue almacenado durante dos años en las instalaciones de la empresa curtidora. En la pila 2, su aeración se hizo por volteo diario, con el propósito de evaluar si se podía prescindir del sistema de ventilación. A la pila 3 se le agregó cascarilla de arroz para aumen-

tar la porosidad en la mezcla. Tanto en la pila 3 como en la 4 se utilizó lodo fresco, que es el lodo que se genera diariamente en la planta de tratamiento de agua residual. Se llevaron a cabo los análisis de los desechos en su composición de sólidos y capacidad calorífica; con estos datos se elaboraron los balances de masa y energía con los que se obtuvo la proporción de los materiales para formar las mezclas. En la foto 1 se observa la instalación de las pilas con un cargador frontal y las pilas ya instaladas. Se obtuvo el registro diario de temperatura.

Foto 1. Instalación de pilas y pilas en composteo.



Descripción del sistema de vermicomposteo

Para las pruebas de vermicomposteo se construyó un lecho de madera de 1 x 1.5 x 0.70 m. Se mezcló la composta producida en las pilas de composteo con lirio acuático en una proporción de 39% de lirio acuático, 35% de composta de curtiduría, 21% de estiércol y 5% de desechos de café. Esta mezcla fue utilizada como alimento de lombrices, *Eisenia foetida*, las cuales tuvieron una densidad de población de 2 kg/m² (cerca de 2,000 lombrices/m²). Cada semana se alimentaba el lecho con 47 kg de mezcla.

Descripción de las pruebas de vivero

La evaluación de las compostas y vermicomposta en el crecimiento de plantas se hizo con aralia (*Schefflera actinophylla*) y sanderiana (*Dracaena sanderiana*), que son plantas ornamentales propagadas comercialmente en viveros cercanos a la curtiduría; de esta forma se pretende que la vermicomposta que se produzca se use en cultivos que se encuentran en los viveros de la región. Estas plantas fueron seleccionadas por su amplia adaptación a diferentes sustratos. Se llevó a cabo un análisis de crecimiento por medio de la medición periódica de al-

turas. Los resultados se sometieron a un análisis de varianza con un nivel de significancia de 95% y se graficaron. Los sustratos para el crecimiento de plantas fueron las siguiente: para el testigo (A-0) se usó la mezcla de vivero, formada por 35% de bagazo de caña, 35% de tierra de hoja y 30% de hoja estabilizada; para el tratamiento B-50, compuesto por 50% de mezcla de vivero y 50% de composta de curtiduría o vermicomposta; para el tratamiento C-100 se utilizó el 100% de composta de curtiduría o vermicomposta. Las mezclas se vaciaron en bolsas de polietileno, que constituyeron las unidades experimentales. Se formaron módulos de cien plantas por tratamiento. El diseño experimental usado fue una distribución completamente al azar.

Resultados y discusión

Características de los materiales utilizados

No se detectó la presencia de *E. coli* en muestras de lodo seco; sin embargo, persisten 2.0 HH/g. En el lodo fresco, la concentración de *E. coli* es típica de los lodos residuales de origen municipal (4.1×10^2 NMP/100 ml); los coliformes totales fueron de 7.0×10^8 NMP/100 ml, los coliformes fecales de 4.0×10^3 NMP/100 ml y los huevos de helminto de 3.3 HH/g, lo que indica el carácter biológico infeccioso del lodo.

Características físicoquímicas

En el cuadro 3 se presentan las características físicoquímicas de los desechos de curtiduría. El análisis del lodo y del pelo los define ligeramente alcalinos por su pH (7.4-8.4). El contenido de materia orgánica (11.12% para el lodo y 18.09% para el pelo) indica que los materiales tienen un componente orgánico que puede ser estabilizado por composteo. El contenido de nutrimentos es considerable, sobre todo de nitrógeno (3.36% en lodo, 6.29% en pelo). El fósforo y potasio se encuentran en bajas concentraciones. El contenido de micronutrimentos totales como hierro, cobre, manganeso, zinc, cobalto y níquel, se encuentran por debajo de la NOM-004-SEMARNAT-2002. El contenido de micronutrimentos extractables es adecuado para que las plantas puedan realizar sus funciones metabólicas esenciales.

A pesar de que en la industria se cuenta con un sistema de recuperación de cromo, tanto la concentración del lodo almacenado como el lodo fresco (3,250 y 3,240 mg/kg, respectivamente), rebasan la norma mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 de 3,000 mg/kg para la aplicación de biosólidos tipo bueno en suelo. El plomo y el cadmio están dentro de los límites permitidos.

Su alto contenido de sales, representado por cloruros, sulfatos, bicarbonatos y sus cationes en extracto de saturación, proporciona valores altos en la conductividad eléctrica (lodo 13.88 dSm^{-1} y pelo 12.77 dSm^{-1}), y el porcentaje de sodio intercambiable (lodo 14.0 y pelo 18.0%) indica que son desechos que si se disponen en el suelo van a provocar problemas de salinidad y sodicidad. Las concentraciones de sulfuros liberables en los materiales fueron 22 mg/kg y 72 mg/kg en el lodo almacenado y fresco, respectivamente, y de 44 mg/kg para el pelo; estas concentraciones son inferiores al límite de 500 mg/kg establecido en la NOM-052-ECOL-1993, para considerarlos como desechos peligrosos.

Sistema de composteo

Los análisis realizados para la elaboración del balance de masas y energía mostraron que son materiales con una gran capacidad calorífica (lodo 3,544 kcal/ton, pelo 302 kcal/ton). El porcentaje de sólidos volátiles (SV) también indica una alta biodegradabilidad (lodo fresco, 57.5%; pelo, 37.5%). Los balances de masas y energía de las mezclas seleccionadas muestran la necesidad de combinar materiales secos (lodo almacenado), con materiales frescos (lodo fresco, pelo), para llegar a los requerimientos de 40 a 60% de humedad en la mezcla al inicio del composteo.

Los valores de la relación carbono/nitrógeno (C/N) de las mezclas son considerablemente más bajos (pilas 1 y 2, 1.76:1; pila 3, 3.13:1; pila 4, 1.6:1), que el valor requerido para iniciar un proceso de composteo (30 a 40:1). Estos valores tan bajos en la relación C/N se deben al alto contenido de nitrógeno en los materiales de origen, principalmente al pelo, el cual presenta un valor de 6.29%; el lodo residual tiene un valor menor, aunque también se puede considerar alto (3.36%).

Comportamiento de temperaturas

El registro de temperaturas mostró que las cuatro pilas alcanzaron temperaturas termofílicas casi desde el inicio. Este comportamiento duró por varios meses, incluso en el periodo de precipitaciones pluviales. Sólo disminuyó gradualmente a través del tiempo. Las pilas 1 y 3 son las que obtuvieron los promedios más altos: 59.86 y 57.18°C (ilustración 1).

Biodegradación

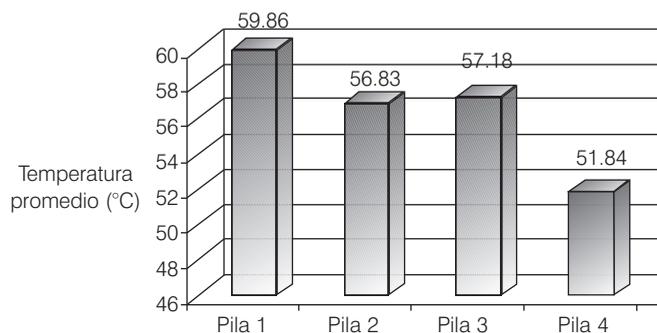
Uno de los propósitos del composteo es lograr la biodegradación del componente orgánico de una mezcla; los factores que ayudan o inhiben el proceso son la hume-

Cuadro 3. Características fisicoquímicas de los desechos de curtiduría.

Parámetro	Lodo seco	Lodo fresco	Pelo	NOM-004-SEMARNAT-2002 (mg/kg base seca)	
				Excelente	Bueno
Características fisicoquímicas del lodo residual y pelo					
pH 1:2	7.8	8.4	7.4		
%M.O.	7.90	11.12	18.09		
%N.T.K.	1.88	3.36	6.29		
%P	0.007	0.009	0.002		
%K	0.002	0.003	0.010		
Contenido de micronutrientos totales					
Fe mg/kg	291.3	137.3	165.2	—	—
Cu mg/kg	7.839	12.342	7.04	1,500	4,300
Mn mg/kg	12.28	15.04	9.98	—	—
Zn mg/kg	38.50	8.09	6.15	2,800	7,500
Co mg/kg	5.07	6.13	3.03	—	—
Ni mg/kg	2.021	1.913	0.770	420	420
Contenido de micronutrientos extractables					
Fe mg/kg	21.32	44.02	65.86		
Cu mg/kg	4.52	2.13	0.276		
Mn mg/kg	3.62	7.56	4.90		
Zn mg/kg	2.37	1.61	2.14		
Co mg/kg	0.25	4.21	1.65		
Ni mg/kg	0.88	0.67	0.36		
Contenido de elementos tóxicos					
Pb mg/kg	5.07	6.13	3.03	300	840
Cd mg/kg	0.49	0.59	0.56	39	85
Cr mg/kg	3,250	3,240	trazas	1,200	3,000
Salinidad de lodos y pelo (en extracto de saturación)					
Ca ⁺⁺ meq/l	88.54	28.92	95.63		
Mg ⁺⁺ meq/l	81.70	59.72	19.10		
Na ⁺ meq/l	46.00	51.00	30.00		
K ⁺ meq/l	0.60	2.40	0.70		
HCO ₃ ⁻ meq/l	114	66	96.00		
Cl ⁻ meq/l	87	96	37.50		
SO ₄ ⁼ meq/l	0.22	0.26	0.51		
C.E. dsm ⁻¹	18.60	13.88	12.77		
PSI%	52.0	14.0	18.0		
NOM-052-ECOL-1993 (mg/kg base seca)					
Sulfuros liberables (mg/kg)	22	72	44	500	

PSI= porcentaje de sodio intercambiable.

Ilustración 1. Temperaturas promedio de las cuatro pilas en composteo.



dad, la temperatura, la relación carbono/nitrógeno y la densidad. Durante el proceso de composteo, las cuatro pilas obtuvieron una reducción de sólidos volátiles entre 50.31 y 58.71%, que es mayor al 38% recomendado por la NOM-004-SEMARNAT-2002. El tiempo de composteo fue de tres meses en las pilas 1 y 2, que degradaron materiales almacenados y con baja densidad. La pila 3 tuvo un tiempo de degradación de cinco meses, a pesar de su baja densidad, ya que la mezcla contenía material fresco y cascarilla de arroz, que es de lenta biodegradación.

En la pila 4, el proceso tuvo una duración de ocho meses debido a que la mezcla contenía materiales frescos y alta densidad de 0.83 ton/m³, y no obtuvo una reducción de sólidos volátiles adecuada.

Calidad de composta y vermicomposta

El análisis de las compostas y vermicompostas demuestra que con el composteo el contenido de coliformes fecales representado por *Escherichia coli* disminuyó en 100%. El contenido de huevos de helminto disminuyó significativamente en las pilas 2 y 3 (< 1.0 HH/g, respectivamente); en las pilas 1 y 4, la eliminación de huevos de helminto fue de 100%, lo mismo que en la vermicomposta. En términos generales, se puede decir que los procesos de biodegradación en pila estática y vermicomposteo son capaces de remover al 100% el contenido de patógenos.

El contenido de tóxicos inorgánicos tuvo un efecto de dilución al agregar pelo al lodo residual; la concentración del cromo total disminuyó casi a la mitad de la concentración original (concentración en lodo, 3,240 mg/kg; compostas: pila 1, 1,075 ppm; pila 2, 1,070; pila 3, 520 ppm, y pila 4, 650 ppm). Estos valores están por debajo de la norma para aplicación de biosólidos tipo excelente en suelo (1,200 mg/kg). El mismo comportamiento se

Cuadro 4. Características fisicoquímicas de compostas y vermicomposta.

Elemento	Lodo seco	Lodo fresco	Pelo	Compostas				Vermicomposta	NOM-004-SEMARNAT-2002	
				Pila 1	Pila 2	Pila 3	Pila 4		Excelente	Buena
Contenido de elementos tóxicos inorgánicos totales										
Pb mg/kg	55.25	39.62	8.37				5.75	18.1	300	840
Cd mg/kg	48.75	47.70	19.87	19.15	34.90	30.40	12.25	5.7	39	85
Cr mg/kg	3,250	3,240	trazas	1,075	1,070	520	650	562	1,200	3,000
Salinidad de compostas de curtiduría (en extracto de saturación)										
C.E. dSm ⁻¹	18.60	13.88	12.77	31.46	30.25	26.01	27.22	12.5		
PSI%	52.0	14.0	18.0	30.1	18.9	11.5	33.04	11.83		
pH 1:2	7.8	8.4	7.4	7.4	7.2	7.5	7.7	8.5		
Cl ⁻ meq/l	87	96	37.50	118.50	151.83	81.47	111.10	59.66		
SO ₄ ⁼ meq/l	0.22	0.26	0.51	0.65	0.83	0.91	0.65	0.42		
Características benéficas de las compostas de curtiduría										
%M.O.	7.90	11.12	18.09	14.79	18.02	18.83	19.63	26.0		
%N.T.K.	1.88	3.36	6.29	2.68	2.37	3.59	2.0	4.5		
%P	0.007	0.009	0.002	0.12	0.13	0.14	0.12	0.051		

PSI: porcentaje de sodio intercambiable.

observó para el cadmio y el plomo. La vermicomposta presenta concentraciones de cromo, cadmio y plomo por debajo de la norma para un lodo de tipo excelente.

La concentración de sales aumentó debido al efecto de evaporación que ocurre durante el proceso de composteo. La conductividad eléctrica en las compostas se incrementó al doble de los valores de los desechos originales (lodo, 13.88 dSm⁻¹; compostas: pila 1, 31.46; pila 2, 30.25; pila 3, 26.01; y pila 4, 27.22 dSm⁻¹). El porcentaje de sodio intercambiable también presenta valores altos (pila 1, 30.1%; pila 2, 18.9%; pila 3, 11.5%, y pila 4, 33.04%). Estos valores indican que el problema de salinidad y sodicidad siguen presentes en las compostas. En cambio, los valores de conductividad eléctrica (12.5 dSm⁻¹), porcentaje de sodio intercambiable (%11.83 PSI), disminuyeron considerablemente durante el vermicomposteo.

El pH de las compostas se redujo a valores entre 7.2 y 7.7. En cambio, el pH de la vermicomposta fue de 8.5; este incremento se debió a los procesos de digestión de la lombriz.

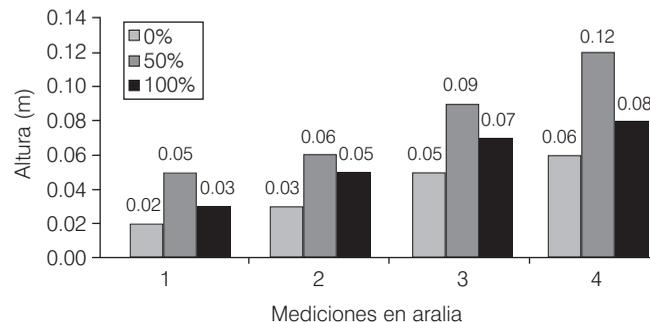
Durante el proceso de composteo y vermicomposteo se observó una transformación microbiana de sulfuros a sulfatos, contrarrestando el efecto negativo de uno de los principales contaminantes de estos desechos.

La materia orgánica se incrementó por la adición de pelo (lodo 11.12%; compostas: 14.79 a 19.63%), esto ayuda a contrarrestar los efectos nocivos de la salinidad y a incrementar la actividad de los microorganismos, favoreciendo la mineralización de los nutrientes presentes en las compostas. La concentración de nutrientes mayores en las compostas fue de 2.0 a 3.59% de nitrógeno total y de 0.12 a 0.14% de fósforo total. En el vermicomposteo, el contenido de materia orgánica aumenta a 26% y el nitrógeno total a 4.5%, debido también a la adición de materiales orgánicos. Estos valores son semejantes a un abono orgánico (Monroy y Viniegra, 1990).

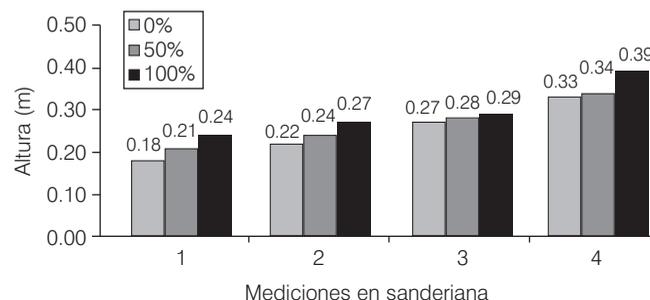
Crecimiento de plantas ornamentales con composta de curtidería

El crecimiento de aralias y sanderianas fue mayor al usarse diferentes porcentajes de composta y vermicompostas (50 y 100%), con respecto a los testigos en los que se utilizó sólo sustrato de vivero. En el caso de la aralia hubo una mejor respuesta con el uso de la dosis 50% composta o vermicomposta, y 50% de sustrato de vivero. En tanto que la sanderiana tuvo un mayor incremento de altura con el uso del 100% de composta o vermicomposta; sin embargo, los resultados del análisis de varianza indican que no hay diferencias significativas en el crecimiento. Las gráficas de crecimiento se observan en las ilustraciones 2 y 3.

Ilustración 2. Incremento en el porcentaje de crecimiento de aralia y sanderiana con composta de curtidería.



0% = Testigo, sólo sustrato de vivero.
 50% = 50% sustrato de vivero + 50% composta de curtidería.
 100% = Sólo composta de curtidería.



0% = Testigo, sólo sustrato de vivero.
 50% = 50% sustrato de vivero + 50% composta de curtidería.
 100% = Sólo composta de curtidería.

Conclusiones

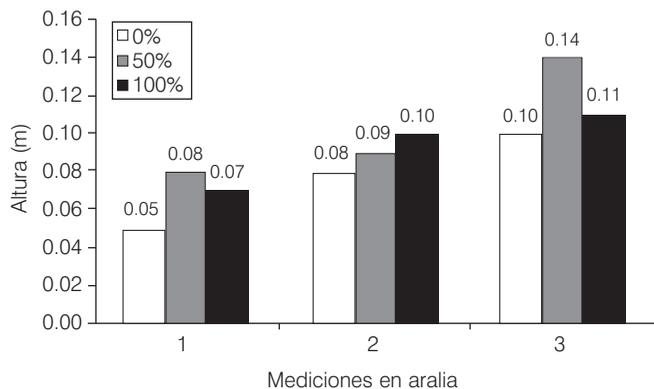
Mediante los procesos de composteo y vermicomposteo en serie se logra alcanzar la estabilización del componente orgánico de los desechos y la disminución de factores contaminantes como las características biológico infecciosas y las concentraciones de tóxicos inorgánicos. Se obtiene un biosólido tipo excelente, clase A, de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002.

La composta y vermicomposta pueden usarse como sustratos de vivero para el crecimiento de plantas ornamentales resistentes a la salinidad.

Recomendaciones

- No se deben almacenar los desechos de curtidería sin tratamiento. Es necesario estabilizar estos desechos antes de su uso o disposición final.
- Para acelerar el proceso de biodegradación por composteo y vermicomposteo se deben adicionar mate-

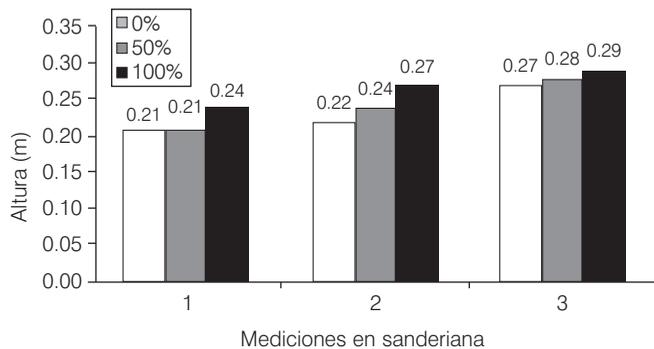
Ilustración 3. Incremento en el porcentaje de crecimiento de aralia y sanderiana con el uso de vermicomposta.



0% = Testigo, sólo sustrato de vivero.

50% = 50% sustrato de vivero + 50% vermicomposta de curtidería.

100% = Sólo composta de curtidería.



0% = Testigo, sólo sustrato de vivero.

50% = 50% sustrato de vivero + 50% vermicomposta de curtidería.

100% = Sólo composta de curtidería.

riales acondicionadores con un alto contenido de carbono, bajo contenido de nitrógeno y baja densidad como basura orgánica y de jardín.

- Durante el composteo se debe mantener la temperatura en rango termofílico (50 a 60°C), temperatura ambiente para vermicomposteo. El porcentaje de humedad, 60% para composteo y 80% para vermicomposteo, y la densidad de la mezcla (0.4–0.6 ton/m³) en ambos procesos. Durante el composteo es necesaria la inyección de aire o el volteo continuo del material con cargador frontal.
- Se recomienda hacer pruebas preliminares de resistencia con plantas ornamentales antes del uso del biosólido. No se recomienda su uso en suelos agrícolas debido a la presencia de sales y alto contenido de sodio.

Recibido: 08/11/2004
Aprobado: 20/05/2005

Referencias

- AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES. (ATSDR). *Reseña toxicológica del cromo*. [En línea] Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. Febrero 2001, modificada el 25 de octubre de 2004. Fecha de búsqueda oct. 2004. Atlanta, GA. Disponible en: http://WWW.ATSDR.CDC.GOV/ES/TOXFAQS/ES_TFACTS7.HTML.
- APHA, AWWA, WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20° Ed., Washington D.C., 1998, 1220 pp.
- BLACK, C.A. (editores). *Methods of soil analysis, Part 2*. Ed., American Society of Agronomy, 1965. Madison Wisconsin. 801 pp.
- CARDOSO, L. y RAMÍREZ, E. Vermicomposting of Sewage Sludge: A New Technology for Mexico. *Water Science and Technology*. (Vol. 46, núm. 10, 2003, 153-158 pp.).
- CHAPMAN, H.D. y PRATT, O.F. *Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas*. Ed. Edit. Trillas, México. 1979, 195 pp.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. Secretaría de Desarrollo Social. *Norma oficial mexicana, NOM-052-ECOL-1993*. Octubre de 1993.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002*. Agosto de 2003.
- ETCHEVERS, B. *Determinación de nitrógeno en suelos*. Serie de cuadernos de Edafología 5. Texcoco, México, Centro de Edafología, Colegio de Posgraduados de Chapingo, 1985.
- INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA. *Manual de procedimientos para el manejo adecuado de los residuos de la curtidería*. 1ª ed. México, D.F., SEMARNAP, 1999, 63 pp.
- JACKSON, M.L. *Análisis químico de suelo*. Ed. Omega, Barcelona, España, 1964, 662 pp.
- MIJAYLOVA, P., LÓPEZ, S., RAMÍREZ, E., y CARDOSO, L. Tecnología para la remoción y recuperación de cromo trivalente en efluentes de curtido de pieles. *Ingeniería hidráulica en México*, Vol. XVIII, núm. 1, 2003, pp. 21-37.
- MIJAYLOVA, P., MOELLER, G., RAMÍREZ, E. y CARDOSO, L. Characterization and dewaterability of raw and stabilized sludge using different treatment methods. *J. Water Science & Technology*. No. 46, núm. 10, 2002, pp. 123-130.
- MONROY, O. y VINIEGRA, G. (editores). *Bioteología para el aprovechamiento de los desperdicios orgánicos*. México D.F.: AGT Editor, S.A. 1990. 260 pp. ISBN: 968-463-000-X.
- OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION (OSHA). *Occupational safety and health guideline for chromium (iii) compound (as Cr) Chromium and Chromium Compounds Chemical Backgrounder*. [En línea]. U.S. Department of Labor. Disponible en: www.osha.gov/SLTC/healthguidelines/chromium3/recognition.html Fecha de búsqueda, 15 de octubre de 2004.

- RAMÍREZ, E., CARDOSO, L. y LÓPEZ, S. Tratamiento y disposición de lodos residuales municipales. *Revista de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería*, A.C. Vol. 3, núms. 3 y 4, 1993, pp. 82-89.
- SENGUL, F. y GUREL, O. Pollution profile of leather industries. Waste characterization and pre-treatment for pollutants. *Water Science and Technology*. Vol. 28, núm. 2, 1993, pp. 87-96.
- TISDALL, A.L. Comparison of methods for determining bulk density of soils. *Australian Journal of Agricultural Research*. Vol. 2, 1951, pp. 349-354.
- TRI-TECH LABORATORIOS. Worm Treatment Produces "Class A" Biosolids. *BioCycle*. Vol. 37, 1996, pp. 67-68.
- TORREBIARTE, J. Gerente de Industrias de Calzado Cobán, Guatemala. Comunicación personal. 1999.
- TUCKER, B.M. Laboratory procedures for soluble salts and exchangeable cations in soils. Aust. Div. Soils Tech. Rep. No. 47. CSIRO. Melbourne. 1985, pp. 1-36.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Standards for the use and disposal of sewage sludge. USEPA. 40 CFR Parts 257, 403 and 503. Fed Reg. 58 (32), 1993, pp. 9248-9415.

Abstract

CARDOSO-VIGUEROS, L. & RAMÍREZ-CAMPEROS, E. *Tannery wastes and sewage sludge biodegradation by composting and vermicomposting process*. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXI, no. 2, April-June, 2006, pp. 93-103.

The tannery industry generates waste with high concentrations of toxic compounds and organic materials with a slow biodegradation characteristics. This work studies the biodegradation and reduction of contaminants of these wastes with a thermophilic and aerobic process, followed by additional vermicomposting step with *Eisenia foetida*. The sewage sludge has the following characteristics: 4.1×10^2 MPN/100 mL of *Escherichia coli*, 3.3 helminth eggs/g. The physicochemical characteristics are for sludge, pH 8.4, electric conductivity 13.88 dSm^{-1} and high chromium concentration of 3,240 mg/kg. For hair was pH 7.4, electrical conductivity 12.77 dSm^{-1} . The composting piles that had a density ($0.5\text{-}0.6 \text{ ton/m}^3$) obtained better reductions in the volatile solids, (50%). The mixtures had a deficit in the Carbon/Nitrogen ratio and high density, increasing the composting period up to 8 months. The process removed 100% of *Escherichia coli* and 100% of helminth eggs. The chromium concentration decreased 562 mg/kg. The electric conductivity value decreased to 12.5 dSm^{-1} . The values of nitrogen and phosphorus are similar to organic manure (2.0-3.59% N, 0.12-0.14% P). The percentage of growth of ornamental plants (*Schefflera actinophylla* and *Dracaena sanderiana*), with compost and vermicompost was higher than the control (10- 20%). The tannery solid wastes should not be stored due to its high salinity. They must be treated in order to remove all the contaminants such as chromium, sulfur and pathogens. The organic matter must be stabilized with a biological process like composting and vermicomposting for landfill disposal or greenhouse use.

Keywords: biodegradability, composting, *Eisenia foetida*, vermicomposting, tannery wastes, sewage sludge, hair.

Dirección institucional de las autoras:

M. en C. Lina Cardoso-Vigueros
M. en I. Esperanza Ramírez-Camperos

Subcoordinación de Tratamiento de Aguas Residuales,
Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua,
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Paseo Cuauhnáhuac 8532,
Col. Progreso, Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550,
teléfono: + (52) (777) 329 3622 o 329 3600, extensiones 430 y 432,
fax: + (52) (777) 319 3422,
lcardoso@tlaloc.imta.mx.