

COMPOSTAJE DE MATERIAL DE DESCARNE Y AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE CURTIDURÍA

Gilberto ÍÑIGUEZ¹, Ramón RODRÍGUEZ² y Gil VIRGEN³

¹Universidad de Guadalajara, Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Km. 15.5 carretera Guadalajara-Nogales. Las Agujas, Mpio. de Zapopan, Jalisco. Apartado Postal 52-93. C.P. 45020, Guadalajara, Jalisco

²Universidad de Guadalajara, Departamento de Botánica y Zoología, km. 15.5 carretera Guadalajara-Nogales. Las Agujas, Mpio. de Zapopan, Jalisco. Apartado Postal 39-82. C.P. 45110, Guadalajara, Jalisco

³Universidad de Guadalajara, Departamento de Producción Agrícola, CUCBA, km. 15.5 carretera Guadalajara-Nogales, Las Agujas, Mpio. de Zapopan, Jalisco, Apartado Postal 110, C.P. 44110 Guadalajara, Jalisco

(Recibido junio 2006, aceptado octubre 2006)

Palabras clave: bagazo de agave, biodegradación, compostaje

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un estudio de compostaje en dos etapas. En la primera permanecieron dos pilas sin movimiento durante 239 días, una formada con 4,580 kg de material de descarnado y 1,320 kg de bagazo de agave y otra con 4,770 kg de "material de descarnado" y 1,440 kg de bagazo de agave. En la segunda etapa de 204 días, las pilas se movieron periódicamente para facilitar la aireación y el riego con agua de la llave y aguas residuales de curtidería para mantener la humedad de las pilas entre 40 y 60 %. En ambas etapas se tomó la temperatura de las pilas. Al final de la segunda etapa, las compostas fueron sujetas a una prueba de campo para su evaluación desde el punto de vista de rendimiento y calidad, así como la incidencia del hongo *Rhizoctonia solani* en tubérculos de papa. En el laboratorio fueron evaluadas las compostas por su fitotoxicidad en semillas de pepino y toxicidad con la lombriz *Eisenia foetida*. Aguas residuales de la industria de curtidería utilizadas para el riego de las pilas, fueron evaluadas en la germinación de semillas de rábano, trébol y pepino. Al inicio del compostaje, el bagazo de agave y el material de descarnado fueron analizados por su contenido de humedad, materia seca, materia orgánica, cenizas, carbono orgánico total y nitrógeno total Kjeldahl. Al final del compostaje, el material de ambas pilas fue sujeto al análisis de esos mismos parámetros, más pH, conductividad, P, K, Ca, Mg, Na, Zn, Mg, Fe y Cu. A las aguas residuales se les determinó: demanda química de oxígeno, pH, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos sedimentables y nitrógeno total. En la primera etapa de compostaje se alcanzaron temperaturas máximas de 56 °C y en la segunda de 65 °C. En las pruebas de campo, el tratamiento con composta fue similar al tratamiento con fertilización convencional en cuanto al daño por *R. solani*, como por la cantidad y calidad de papas ($p < 0.05$). Los resultados de los bioensayos en laboratorio en cuanto a brote y vigor relativo, indicaron que a la composta le podía haber faltado tiempo de maduración, pero según el análisis químico, el problema más que de maduración pudo haber sido el de concentraciones altas de sodio. En el análisis de toxicidad con *Eisenia foetida*, las lombrices murieron en los primeros días de prueba, probablemente por las altas concentraciones de sodio en la composta. El proceso de compostaje demostró ser una alternativa viable para el manejo, la degradación y por ende la estabilización del material de descarnado y aguas residuales de la industria de curtidería, aunque el producto obtenido debe utilizarse bajo las recomendaciones de algún especialista por su alto contenido de cenizas y sales sobre todo de sodio.

Key words: composting, leather processing, tanneries

ABSTRACT

In the present work the composting process of fleshing materials from tanneries was studied in two phases. In the first phase, two piles formed with flesh material and agave bagasse were composted during 239 days without any turning. In the second phase of 204 days, piles were turned periodically to facilitate the aeration and irrigation with tap water and wastewater from the tanneries. In both phases piles temperature readings were done and 5 average readings were graphed for each day. At the end of the second phase, the compost was evaluated in a field study determining the yield and quality as well as the incidence of *Rhizoctonia solani* in potatoes. In the laboratory, compost was also subjected to qualitative bioassays to screen for the presence of toxicity against *Eisenia foetida* and seedling emergency and relative growth of cucumber seeds was determined. Tannery wastewaters used for irrigation of the composting piles, were evaluated for their toxicity against germinating seeds of radish, clover and cucumber. At the beginning of the composting process, agave bagasse and flesh materials were analyzed for water, dry matter, ash, organic matter, total organic carbon and total Kjeldahl nitrogen content. Compost was analyzed for the same parameters, besides of pH, conductivity, and contents of P, K, Ca, Mg, Na, Zn, Mg, Fe and Cu. Chemical oxygen demand, pH, settleable solids, total nitrogen, total solids, total suspended solids and total dissolved solids were determined in tanneries wastewater. In the first and second composting phase temperatures of 56 °C and 65 °C were reached respectively. In the field study, compost treatment was similar to conventional fertilization treatment. Disease severity caused by *R. solani*, and quantity and quality of potatoes were also similar ($p < 0.05$) after compost treatment. The high phytotoxicity and worms death could be more related to the high compost sodium concentrations than to compost maturity. The composting process showed to be a good alternative for treating the flesh materials and improved wastewater management. The obtained final product with its high ash and sodium content should be utilized taking into account the recommendations of an agronomist.

INTRODUCCIÓN

La mayor parte de las curtidurías en México se encuentran localizadas en la Zona Metropolitana de la ciudad de México y en los estados de Nuevo León, Jalisco y Guanajuato. Este último el mayor productor a nivel nacional ya que genera alrededor del 65 % del curtido y acabado de cuero. En la ciudad de León existen más de 500 tenerías y constituyen la principal actividad económica (INE 1999). En cuanto a los desechos de esta actividad industrial, aparecen listados en su totalidad como residuos peligrosos, en la Norma Oficial Mexicana (NOM-052 1993), lo cual obliga a acopiarlos, almacenarlos, transportarlos, reciclarlos, tratarlos o confinarlos a través de empresas autorizadas. Sin embargo estas obligaciones no se cumplen cabalmente y la mayoría de los desechos van a dar al drenaje municipal, o a tiraderos clandestinos o particulares. Por las razones anteriores, es importante promover la investigación,

el desarrollo tecnológico y la realización de estudios de casos, que permitan determinar la factibilidad técnica y económica de distintas opciones de manejo. Desde el punto de vista de la generación de residuos sólidos y aguas residuales con mayor carga orgánica, la etapa de “rivera” es la que genera mayor impacto ambiental negativo. Por regla general una vez recibidas las pieles, estas se someten en tambores rotatorios a una fase de prerremojado con agua para generar un primer residuo líquido salino. Enseguida se tiene una fase de remojo con agua, bactericida, tensoactivo y álcali para arrojar un segundo residuo líquido con valor alto de pH. Posteriormente viene el “pelambre” donde se utiliza sulfuro de sodio, sulfhidrato de sodio, cal hidratada, tensoactivo derivado del petróleo para eliminar el pelo y la epidermis, aumentar la separación entre las fibras de colágeno de la piel, destruir proteínas no estructurales así como nervios, vasos sanguíneos, etc. De esta fase resulta el residuo líquido

con la mayor carga orgánica de todo el proceso de curtido. De aquí las pieles pasan al “descarne” que consiste en una operación mecánica para separar la endodermis, básicamente constituida por proteínas y grasas. Este desecho sólido puede llegar a representar hasta el 30 % del peso del cuero. De esta etapa las pieles van a los siguientes pasos del proceso de curtido como curtido, recurtido, teñido, engrase y acabado. El manejo del desecho líquido del pelambre así como del material sólido del descarnado es un aspecto importante para este sector industrial ya que si no son manejados adecuadamente pueden causar graves problemas de contaminación ambiental. El material de descarnado dado su origen orgánico, puede ser manejado mediante el compostaje (Íñiguez *et al.* 2003). El compostaje, conocido en inglés como “compost” (sustantivo que proviene del latín composite y que significa mezcla para fertilizar o renovar la tierra) es un proceso natural aerobio donde los microorganismos convierten el material orgánico en un producto estable llamado composta, es un proceso noble que puede llevarse a cabo desde la formación de una simple pila con costos mínimos de construcción y operación hasta grandes instalaciones con equipo sofisticado y altos costos de operación y mantenimiento, dependiendo de lo atractivo del mercado de compostas y de las exigencias de las autoridades correspondientes para el manejo de materiales de desecho. Dado el incipiente mercado de compostas y la poca atención que han puesto nuestras autoridades sobre alternativas de tratamiento de desechos cárnicos, es conveniente realizar estudios de bajo costo y operación sobre el tratamiento de esos desechos. El objetivo del presente trabajo fue evaluar en un primer período la conveniencia de degradar material de descarnado en un sistema de compostaje sin movimiento de pilas, para después utilizar como humectante aguas residuales del proceso del pelambre para lograr una completa estabilización del bagazo de agave utilizado como agente de relleno y de ambos residuos de tenerías. Sin un material de relleno no es posible someter a compostaje el material de descarnado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Formación de pilas

Para la realización del presente trabajo se utilizó material de descarnado proveniente de una tenería dedicada al procesamiento de cueros de animales vacunos. Como material lignocelulósico para facilitar el compostaje, se utilizó bagazo de agave proveniente

de una fábrica de tequila que extrae con agua caliente los azúcares fermentables de cabezas de agave previamente destrozadas en equipos especiales. El agua residual utilizada para el riego de las pilas fue proporcionada por una curtiduría, del proceso de pelambre de pieles de cabra y de borrego. En una primera pila se pusieron en proceso de compostaje sobre piso de tierra, 4,580 kg de descarnado y 1,320 kg de bagazo de agave y en una segunda pila 4,770 kg de descarnado y 1,440 kg de bagazo. Al terminar de formar las pilas, se colocaron permanentemente y al azar en cada una de ellas en lugares diferentes 5 termómetros de carátula de 13.5 cm con varilla de 60 cm de largo. El promedio de los cambios de temperatura de los 5 termómetros se graficó para cada día. Las pilas no se movieron y permanecieron la mayor parte del tiempo tapadas con un plástico negro para evitar problemas por lluvia durante los primeros 239 días de compostaje. En este tiempo no hubo adición de agua para controlar la humedad. La agitación mecánica de las compostas se eliminó durante la primera etapa pensando en la economía del proceso, ya que esto implica un gasto energético en maquinaria especializada.

En un segundo período de compostaje de 204 días, las pilas 1 y 2 se movieron periódicamente para facilitar la aireación y el riego con agua de la llave o con aguas residuales para mantener la humedad de las pilas entre 40 y 60 %. Se tomó la temperatura de las pilas colocando al azar un termómetro en 5 lugares diferentes. El promedio de los cambios de temperatura se graficó para cada día.

Al inicio del compostaje, el bagazo de agave y el material de descarnado fueron analizados por su contenido de humedad, materia seca, materia orgánica, cenizas, carbono orgánico total y nitrógeno total Kjeldahl. Al final del tiempo de compostaje, el material de ambas pilas fue sujeto al análisis de esos mismos parámetros, además de pH, conductividad, P, K, Ca, Mg, Na, Zn, Mg, Fe y Cu. A las aguas residuales se les determinó: demanda química de oxígeno, pH, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos sedimentables y nitrógeno total.

Bioensayos con semillas

Se realizó un análisis de germinación de semillas en muestras de agua residual, consistiendo de 10 tratamientos (agua residual diluida con agua desionizada al 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 %) y 3 repeticiones por tratamiento con semillas de rábano, trébol y pepino (30 semillas por repetición), colocadas en cajas de Petri (diámetro de 10 cm) con papel filtro (Whatman No. 1) humedecido con 10 mL de cada una de las diluciones del agua residual. Para el

testigo se utilizaron semillas colocadas en papel filtro humedecido sólo con agua desionizada. Las semillas se dejaron germinar a temperatura de laboratorio y los porcentajes de germinación se registraron hasta el sexto día. Después de ese día ya no se observó germinación alguna de semillas. El porcentaje de reducción en la germinación de semillas (R %, cambió en la germinación con referencia al testigo) por acción del agua residual se calculó de acuerdo a la ecuación 1 descrita por Czabator (1962):

$$R(\%) = \left(\frac{100 \times T_i}{T_o} - 100 \right); \quad (1)$$

donde:

T_o = % de germinación real en el testigo.

T_i = % de germinación por el efecto del tratamiento.

100* = germinación hipotética en el testigo.

100 = factor de conversión para el %.

La ecuación facilita una comparación de la germinación en el tratamiento con respecto a la del testigo. Un valor positivo indica una germinación mayor en respuesta al tratamiento en comparación al control, mientras que un valor negativo indica lo contrario.

Pruebas biológicas

Brote y vigor relativo de pepino

Al final del período de compostaje a la composta se le realizaron estudios de brote y vigor relativo de acuerdo con la técnica descrita por el TMECC (2002, Método 05.05-A). El brote o emergencia, se refiere a la relación de semillas emergidas y al número de semillas sembradas en un tiempo determinado. El vigor relativo, se refiere al número de plantas que se desarrollaron en determinado sustrato en forma fuerte y vigorosa con una altura igual o mayor al promedio de plantas que se desarrollaron en turba como testigo positivo. Para esto se utilizaron 2 charolas de poliestireno de 34 x 34 cm con 100 celdas (2.5 x 2.5 x 7 cm) cada una, utilizando una charola por pila. En cada una de las charolas, se llenaron tres hileras adyacentes con la combinación composta-vermiculita procurando que el medio de cultivo no se perdiera en los orificios de drenado. Como testigo positivo se llenaron con turba dos hileras de 10 celdas cada una sin que estas hileras quedaran pegadas a la muestra de composta. Como testigo negativo se llenó al azar una hilera de 10 celdas de vermiculita. Cada hilera de vermiculita representaba una réplica del testigo negativo. Se colocaron dos semillas de pepino por celda, cubriéndolas con aproximadamente 1 cm de material. Cada charola se colocó bajo la influencia de luz fluorescente en una jaula forrada con plástico

traslúcido (50 x 50 x 24.5 cm) para conservar la humedad del material durante el tiempo que duró el experimento. La temperatura dentro de las cámaras se mantuvo en aproximadamente 27 °C. Después de 12 días, se removieron las plantas de cada charola, registrándose el número de plantas con cotiledones e hipocotiledones totalmente expuestos, para evaluar el brote y el vigor relativo.

Bioensayo con Eisenia foetida

Para determinar el grado de madurez de las compostas después del período de compostaje, se les practicó otro bioensayo, pero esta vez con lombrices de tierra (*Eisenia foetida*) de acuerdo con la técnica descrita por el TMECC (2002 Método 05.05-C). Para esto, a 25 g de muestra de composta se les adicionó y mezcló con 125 g de arena lavada y seca al aire, más agua hasta un contenido de humedad de 80 %. Para cada muestra analizada se consideró un testigo positivo. A la muestra de testigo positivo además de la muestra y la arena, se le adicionaron 10 g de polvo de celulosa y 30 mL adicionales de agua, de tal manera que la mezcla tuviera al menos 80 % de humedad. A cada muestra de análisis y testigo positivo se le añadieron 3 lombrices (*Eisenia foetida*) con un peso entre 100 a 200 mg, registrando el peso inicial de la suma de las tres lombrices. Una vez preparadas las muestras, los recipientes se colocaron bajo luz fluorescente constante a temperatura ambiente de laboratorio de 23 °C aproximadamente. Después de 7 días se removieron y pesaron las lombrices, regresándolas luego a sus respectivas muestras por otro período de 7 días. A los 14 días se volvieron a remover y pesar las lombrices.

Pruebas de campo

Se realizó una prueba de campo para evaluar la composta (mezcla de las dos pilas al 50-50 % en volumen) desde el punto de vista de rendimiento y calidad, así como la incidencia (porcentaje de daño sobre tubérculo) de *Rhizoctonia solani* en tubérculos de papa. Para esto se estableció un experimento de bloques al azar con tres tratamientos y cuatro repeticiones por tratamiento en un terreno comercial para el cultivo de papa en la zona de Tapalpa, Jalisco, México. Los tratamientos fueron los siguientes: a) aplicación de composta en una proporción de 20 ton ha⁻¹, b) aplicación de fertilización convencional (250-340-380 de N-P-K respectivamente) y c) testigo sin composta ni fertilización. Cada repetición consistió de un área de 10 m² (dos surcos de 5 m de largo cada uno). La composta y el fertilizante se aplicaron antes de la siembra de papa. El rendimien-

to de papa se determinó tomando en cuenta el total de kg ha⁻¹ obtenidos en cada tratamiento, La calidad se determinó de acuerdo con los estándares usados por el agricultor como papas de primera, segunda, tercera y cuarta. La incidencia de *Rhizoctonia solani* sobre los tubérculos de papa fue evaluada de acuerdo con la propuesta de Virgen-Calleros *et al.* (2000).

Análisis químico

Para las compostas, el contenido de nitrógeno total fue determinado por el procedimiento macroKjeldahl (AOAC 1984) y la materia seca o húmeda, al secar 2 g de muestra por 24 h a 105 °C. Para el análisis de cenizas, esta misma muestra se puso en una mufla a 550 °C por 2 h. El material volátil fue considerado como materia orgánica (AOAC 1984). El pH y la conductividad fueron determinados en extractos en agua en una relación peso/volumen de 1:5 (<http://compost.css.cornell.edu/monitor/monitorph.html>). El carbono orgánico total (COT) fue calculado mediante la siguiente ecuación (Golueke 1977):

$$\% \text{ COT} = (100 - \% \text{ cenizas})/1.8$$

La relación C:N fue calculada con base en el análisis anterior de carbono y en el análisis de nitrógeno total Kjeldahl.

El total Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, Na, Zn y K se determinó por espectroscopia de absorción atómica previa digestión de las muestras en parrilla y con HNO₃ concentrado según el método de la Norma Mexicana (051-2001). El fósforo total fue determinado mediante espectrofotometría visible previa digestión de las muestras en HCl/HNO₃ y extracción en benceno/isobutanol según el método de la Norma Mexicana (029-2001).

Para las aguas residuales, los sólidos sedimentables, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, demanda química de oxígeno y nitrógeno total, fueron analizados de acuerdo con el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA 1992). El pH fue determinado utilizando un potenciómetro HANNA modelo 211 (Hanna Instruments, Portugal).

Análisis estadístico

Los resultados se sometieron a un análisis de varianza para un experimento de bloques al azar de tres tratamientos con cuatro repeticiones por tratamiento seguido de un análisis de medias mediante la prueba de la mínima diferencia significativa a $p < 0.05$ (Montgomery 1991).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El **cuadro I** presenta algunas características del bagazo de agave y del material de descarnado utilizado en el estudio. Con base en esas características, la humedad y la relación C:N para la pila 1 fue de 64.6 % y 13.1 y para la pila 2 de 64.2 % y 13.2, respectivamente. El contenido de humedad de la mezcla no fue limitante para iniciar el proceso de compostaje ya que estaba en el rango recomendado (40-65 %, NRAES 1992). Por otro lado, la relación C:N de la mezcla inicial puesta en compostaje, aunque diferente a la recomendada para el proceso (25: 1-30-1, NRAES, 1992), no fue un factor inhibitorio pero sí puede presentar algunos inconvenientes. Zhu (2006) al someter a compostaje mezclas de estiércol de cerdo con paja de trigo, encontró que en una mezcla con relación C:N de 20 en comparación a una de 25, la pérdida de nitrógeno fue mayor en 8 % y que la fase termofílica fue más corta con dos semanas más de maduración. El **cuadro II** presenta algunas características del agua residual utilizada para la riego de las pilas. Como era de esperarse el pH (12) del agua residual fue muy alcalino debido a la adición de cal hidratada, además de sulfuro de sodio, para ayudar a eliminar el pelo y la epidermis, aumentar la separación entre las fibras de colágeno de la piel, destruir proteínas no estructurales así como nervios y vasos sanguíneos, razón por la cual también se encontraron valores altos de DQO, nitrógeno total y sólidos en varias de sus formas. La misma información mostrada en el **cuadro II** confirma el alto riesgo de contaminación ambiental al ser vertido este tipo de aguas residuales en algún cuerpo de agua. El agua residual doméstica catalogada como muy contaminante tiene los siguientes valores: promedio en mg⁻¹: DQO 1,000,

CUADRO I. CARACTERÍSTICAS DEL BAGAZO DE AGAVE Y EL MATERIAL DE DESCARNE UTILIZADOS EN EL COMPOSTAJE

Análisis	Bagazo de agave	Material de descarnado
Humedad (%)	24.3	76.3
Materia seca (%)	75.7	23.7
Materia orgánica (%) ^a	54.6	84.6
Cenizas (%) ^a	45.4	15.4
Carbono orgánico total (%) ^a	30.3	47.0
Nitrógeno total Kjeldahl (%) ^a	1.4	4.4
Relación C:N	21.6	10.7

^aBase seca

CUADRO II. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL UTILIZADA PARA EL RIEGO DE LAS PILAS

Análisis	Valores		
Demanda química oxígeno (mg L ⁻¹)	24,785 ^{a,1}	38,852 ²	30,250 ³
pH	12.0	12.2	12.0
Sólidos totales (mg L ⁻¹)	31,533	64,016	50,304
Sólidos suspendidos (mg L ⁻¹)	9,889	34,277	12,410
Sólidos disueltos (mg L ⁻¹)	21,644	29,739	37,894
Sólidos sedimentables (mL L ⁻¹)	250	200	300
Nitrógeno total (mg L ⁻¹)	1,306	2,576	1,610

^aAgua residual utilizada en las pruebas de germinación

^{1,2,3}Características del agua residual utilizada para el primero, segundo y tercer riego de las pilas

sólidos totales 1,200, sólidos suspendidos totales 350, sólidos disueltos totales 850 y nitrógeno total 85 y sólidos sedimentables 20 mL L⁻¹. (Metcalf y Eddy 1996).

La **figura 1** muestra los cambios de temperatura durante la biodegradación del material de descarte en un primer ciclo. Al momento de iniciar el compostaje, la temperatura promedio para las pilas 1 y 2 fue de 24 °C, incrementándose paulatinamente hasta llegar a una máxima promedio de 56.5 °C el día 24 en la primera pila y de 56 °C el día 22 en la segunda pila. Después de esos días las temperaturas comenzaron a disminuir paulatinamente. Como se observa en la misma **figura 1**, desde los días 22-24, se registraron temperaturas de los 56 a los 52 °C hasta

el día 59, después de ese día y hasta el día 126, las temperaturas en las dos pilas permanecieron en 52 °C y de ese día hasta el final del primer período de compostaje de 239 días, las temperaturas bajaron de 52 a 46.7 °C para la pila 1 y de 52 a 48.3 °C para la pila 2. El valor de estas temperaturas estuvo en el rango recomendado por la mayoría de los expertos en compostaje (43.5-65.5 °C) (NRAES 1992). Al igual que en experiencias anteriores (Íñiguez y Vaca 2001, Íñiguez *et al.* 2003), con este trabajo queda demostrado que cuando se inicia el compostaje con material cárnico (descarte o tripas de cerdo) y bagazo de agave, en las primeras tres o cuatro semanas las temperaturas máximas que se alcanzan fluctúan entre 54 y 57.5 °C, supuestamente por ser entre otros factores el oxígeno el factor limitante, al estar siendo utilizado por los microorganismos y al dificultarse su difusión a través de las pilas ya que con el transcurso de los días estas se compactan. Al remover las pilas y facilitar la aireación, se pueden alcanzar temperaturas hasta de 70 °C en los siguientes 7 días. Con base en estos resultados, en conjunción con otros anteriores (Íñiguez *et al.* 2003), por cuestión de tiempo y calidad del producto es conveniente mover las pilas al menos cada 2 semanas desde el inicio del compostaje.

La **figura 2** muestra los cambios de temperatura durante la biodegradación del material de descarte con la adición de agua de la llave y agua residual en un segundo período de 204 días. Las flechas delgadas indican el día en que movieron las pilas y se añadió agua de la llave, mientras que las flechas gruesas, indican el día que se movieron las pilas y se añadió

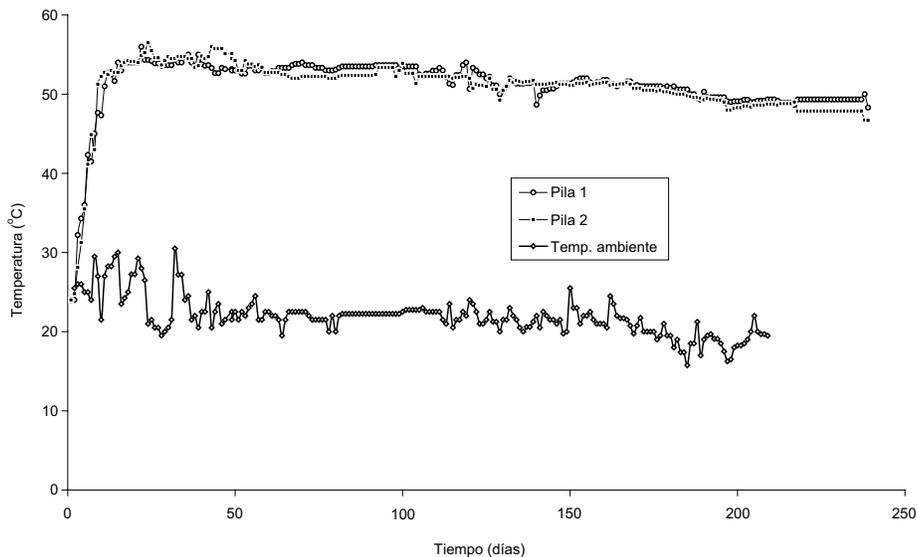


Fig.1. Cambios de temperatura durante la biodegradación de material de descarte en una primera etapa

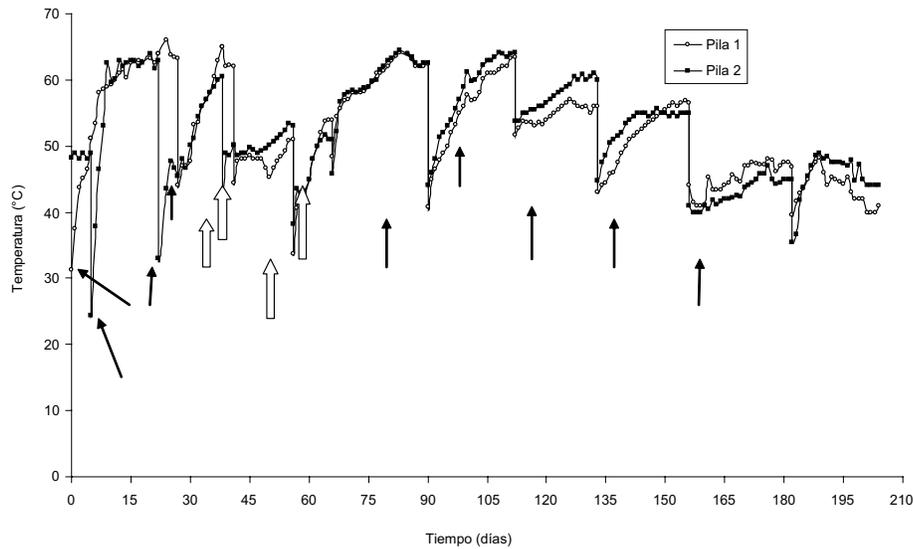


Fig.2. Cambios de temperatura durante la biodegradación de material de desecho con adición de agua residual. Las flechas delgadas indican el día en que se movieron las pilas y se añadió agua de la lluvia, mientras que las flechas gruesas, indican el día en que se movieron las pilas y se añadió agua residual

agua residual. Como puede observarse en esta figura, en los primeros días al remover las pilas y añadir agua en la pila 1, se tuvo una temperatura de 66 °C en el día 24 mientras que en la pila 2 la temperatura máxima alcanzada fue de 64 °C en el día 20. En un segundo ciclo de añadir agua residual, en la pila 1 la temperatura máxima fue de 65 °C en el día 38 mientras que en la pila 2 de 60 °C para ese día. En esta misma figura puede apreciarse también cómo afectó la adición de agua residual en la temperatura máxima alcanzada en las pilas. Por ejemplo, después de la primera adición de agua residual en la pila 1 se llegó a una temperatura máxima de 51 °C mientras que en la pila 2 a 53 °C. Después de 10 días de una segunda adición de agua residual en la pila 1 se alcanzó una temperatura máxima de 54 °C y en la pila 2 de 51 °C. En la tercera adición de agua residual ya no se notó el efecto tan marcado en la temperatura máxima de las pilas, ya que después de esta tercera adición de agua residual, la temperatura fue aumentando paulatinamente hasta alcanzar temperaturas similares a las logradas hasta antes de añadir agua residual (64 °C). Después de la tercera adición de agua residual (día 66) no se consideró conveniente seguir añadiendo más agua residual para dar oportunidad a la degradación de los compuestos orgánicos del agua residual, la completa degradación del bagazo de agave y a que se podría acumular una concentración tal de sales que pudiera ir en detrimento de la calidad del producto final. Después del sexto ciclo (sexto movimiento de las pilas

en la segunda etapa) en el que todavía se alcanzaron temperaturas de 63-64 °C esta empezó a disminuir paulatinamente hasta 41 °C para la pila 1 y 44 °C para la pila 2 en el día 204 en el que se decidió dar por terminado el segundo período de compostaje. El **cuadro III** presenta algunas características químicas de las compostas de las pilas 1 y 2. La relación C: N para la pila 1 fue de 13.1 y de 12.4 para la 2, un valor menor a 20 de acuerdo con lo recomendado para compostas maduras (Mayer y Hofer 1987). El alto contenido de cenizas (71.5 para la pila 1 y 69.5 % para la 2) y bajo porcentaje de materia orgánica (28.5 y 30.5 % para las pilas 1 y 2, respectivamente) indica el grado de mineralización que sufrió el material en compostaje, de manera que este alto contenido de cenizas puede ser un factor limitante en la aplicación de compostas en ciertos cultivos agrícolas.

Brote y vigor relativo

De acuerdo con la metodología de bioensayos cualitativos para la evaluación de madurez de compostas, en términos de brote, para la composta de la pila 1 se tuvo un valor de 82 % mientras que para la composta de la pila 2 fue de 74 %. Según los datos de referencia del TMECC (2002 Método 05.05-A) valores de brote mayores al 90 % indican una composta muy madura, valores entre el 90-80 % una composta madura y valores menores al 80 % una composta inmadura. En cuanto a los análisis de vigor relativo, los resultados indicaron que se trataba de compostas

CUADRO III. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA COMPOSTA DE MATERIAL DE DESCARNE CON AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA DE CURTIDURÍA

Análisis	Composta	
	Pila 1	Pila 2
pH	8.5	8.3
Cenizas (%) ^a	71.5	69.5
Materia orgánica (%)	28.5	30.5
Conductividad (mmhos cm ⁻¹)	4.06	4.49
N total (%) ^a	1.20	1.36
COT (%) ^{ab}	15.72	16.94
Relación C/N	13.10	12.45
P total (%) ^a	0.001	0.001
K total (%) ^a	0.238	0.229
Ca total (%) ^a	8.53	7.40
Mg total (%) ^a	0.095	0.073
Na total (mg kg ⁻¹) ^a	10775.4	12066.20
Zn total (mg kg ⁻¹) ^a	70.51	83.08
Mn total (mg kg ⁻¹) ^a	238.66	228.20
Fe total (mg kg ⁻¹) ^a	4459.17	4228.54
Cu total (mg kg ⁻¹) ^a	36.61	34.26

^aBase seca

^bCarbono orgánico total

inmaduras, ya que el dato de vigor relativo para la pila 1 fue de 31 % y para la pila 2 de 33 %. Según los datos de referencia del TMECC (2002 Método 05.05-A) valores de vigor relativo, mayores al 95 %, indican compostas muy maduras, valores entre 85 y 95 % compostas maduras y valores menores al 85 % indican compostas inmaduras. Sin embargo, ya que las compostas al final del período de compostaje presentaron un olor, textura y color similares a una tierra de jardinería es probable que los valores no deseables de brote y vigor relativo se debieron más a los valores altos de sodio contenido en las compostas (**Cuadro III**, 10,775 mg kg⁻¹ para la pila 1 y 12,066 mg kg⁻¹ para la 2). Algunas sales solubles específicas como el sodio, pueden ser perjudiciales para las plantas (<http://compostingcouncil.org/section.cfm?id=39>). Árboles, viñedos y plantas leñosas de ornato tienden a ser especialmente sensibles a un exceso de sodio, sin embargo los cultivos anuales usualmente no son afectados directamente por concentraciones altas de sodio, excepto por su contribución a la salinidad del suelo (SICCFA 1998). Por otro lado, las compostas de nuestro estudio fueron utilizadas para mejorar el pasto de jardines, sin haberse observado daño alguno, probablemente por la solubilización del sodio por el riego permanente.

Eisenia foetida

Con base en la prueba biológica desarrollada con *Eisenia foetida*, las compostas de las pilas 1 y 2 resultaron tóxicas para las lombrices ya que murieron en los primeros días de prueba. En el **cuadro III** puede apreciarse que las compostas en promedio tuvieron un valor de pH de 8.4, una conductividad de 4.2 mmhos cm⁻¹ y una concentración de sodio de 11,420 mg kg⁻¹, factores que pudieron haber causado la muerte de las lombrices. Tanto la alcalinidad como la salinidad se reportan como perjudiciales para las lombrices, ya que niveles altos de sales causan sequedad osmótica (Santamaria-Romero *et al.* 2001). De hecho las lombrices se utilizan para valorar efectos ambientales de algunos agentes químicos ya que estas pueden predecir los efectos en otros invertebrados del suelo (Edwards y Bates 1992).

Efecto del agua residual en la germinación de semillas

La **figura 3** muestra que tanto en las semillas de trébol como en las de rábano se presentaron problemas de germinación a medida que fue aumentando la concentración de agua residual en el papel filtro de las cajas de Petri. El porcentaje de reducción (R) fue más marcado en semillas de trébol que en semillas de rábano, sobre todo en las concentraciones más bajas de agua residual. Para semillas de trébol los valores de R fueron de -12.9 a -63.5 para concentraciones de agua residual de 10 a 40 % mientras que para semillas de rábano estos valores fueron de -2.4 a -53.4 para las mismas concentraciones. Para concentraciones de agua residual por arriba del 70 % los valores de R fueron de -100 para semillas de rábano, mientras que para semillas de trébol estos valores se alcanzaron en el 90 y 100 % de agua residual. En la **figura 3** puede apreciarse que las semillas de pepino fueron más tolerantes a las diferentes concentraciones de agua residual ya que los valores de R estuvieron entre -1.2 y -2.3 para las diferentes concentraciones de agua residual. Esos resultados demuestran que en las pruebas de vigor de las técnicas de análisis de compostas del TMECC (2002, Método 05.05-A) se utilizan semillas de pepino por ser más tolerantes a concentraciones altas de sales, característica esencial de algunas compostas. El hecho de haber añadido este tipo de agua residual a las pilas de composta trajo por consecuencia problemas de germinación y desarrollo de plantas de pepino como quedó demostrado en los estudios de brote y vigor relativo. En un estudio anterior donde se puso también en compostaje bagazo de agave con material de descarnado, pero no se añadió este tipo de agua residual sino agua de la llave, no se

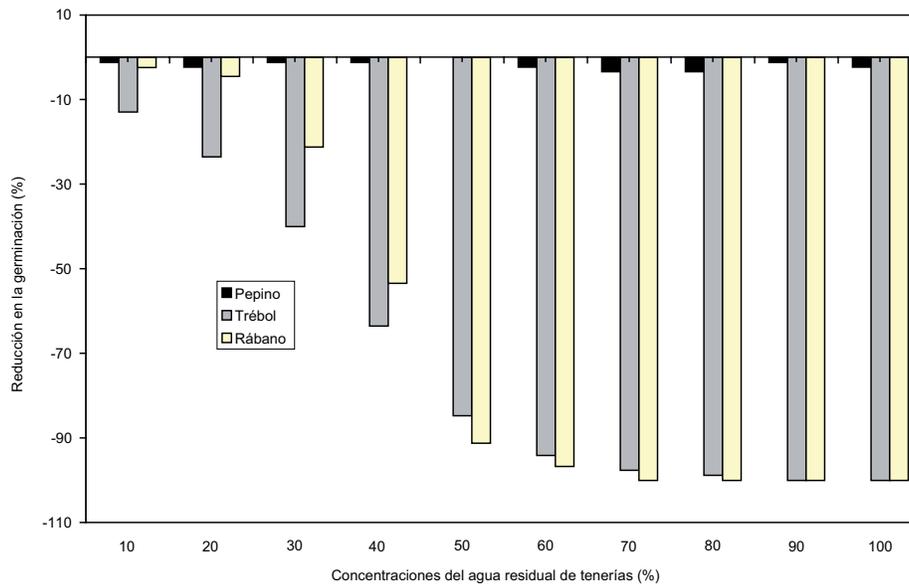


Fig. 3. Reducción en la germinación de semillas a diferentes concentraciones del agua residual de tenerías

presentaron problemas en la germinación ni en el desarrollo plumbular y radicular de *Rhaphanus sativus*, más aún se obtuvo una mayor producción de biomasa en la composta que en el testigo con turba 10 días después del transplante (Íñiguez *et al.* 2003).

Pruebas de campo

El cuadro IV presenta los resultados de la prueba de campo sobre el efecto de la composta en el cultivo de papa. En cuanto al rendimiento total de papa en kg ha⁻¹, no se presentó diferencia significativa entre los tres tratamientos (p < 0.05) aunque la varianza para cada tratamiento fue más pequeña para el tratamiento con composta (0.212), que para el tratamiento

con fertilización convencional (2.389) y el testigo (6.571). En cuanto a la calidad, en el tratamiento con fertilización se obtuvo numéricamente una mayor cantidad de papa de primera (1.267 ton ha⁻¹) aunque estadísticamente igual (p < 0.05) al tratamiento con composta (0.875 ton ha⁻¹), esto debido a la varianza entre ambos tratamientos, ya que la varianza para el tratamiento con composta fue de 0.356 mientras que para el tratamiento con fertilización convencional la varianza fue de 0.083. Entre este último tratamiento y el testigo, sí se presentó diferencia estadística significativa (p > 0.05) en cuanto a la cantidad de papa de primera. En lo relativo a la cantidad de papa de primera entre el testigo y el tratamiento

CUADRO IV. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CAMPO EN EL USO DE COMPOSTA EN EL CULTIVO DE PAPA

Análisis	Control	Tratamiento Fertilización		DMS*
		Convencional	Composta	
Papa de primera (ton ha ⁻¹)	0.360 ^a	1.267 ^b	0.875 ^{a,b}	0.864
Papa de segunda (ton ha ⁻¹)	1.532 ^a	1.552 ^a	1.240 ^a	1.250
Papa de tercera (ton ha ⁻¹)	1.750 ^a	1.017 ^a	1.732 ^a	1.047
Papa de cuarta (ton ha ⁻¹)	0.667 ^a	0.900 ^a	0.735 ^a	0.603
Total de papa (ton ha ⁻¹)	4.310 ^a	4.737 ^a	4.618 ^a	3.079
Daño sobre la superficie del tubérculo (%)	14.17 ^b	6.75 ^a	8.30 ^a	4.33

*Diferencia mínima significativa (p = 0.05)

^{a, b} Los valores seguidos por la misma letra en un renglón dado, no difieren a p < 0.05 según la prueba de la mínima diferencia significativa

con composta no se presentó diferencia estadística significativa ($p < 0.05$), esto debido al valor de la varianza del tratamiento con composta de 0.356 en comparación al de 0.130 para el testigo. En cuanto a la cantidad de papas de segunda, tercera y cuarta, no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos ($p < 0.05$). A pesar de notarse la tendencia hacia el efecto positivo de la composta sobre la cantidad de papas de primera, es recomendable en futuras investigaciones aumentar el número de repeticiones por tratamiento para evitar los efectos de la varianza entre la diferencia de medias. Al considerar el daño por *R. solani* sobre la superficie del tubérculo, se encontró que el daño mayor fue para el tratamiento testigo ($p > 0.05$. 14.17 %) mientras que para los tratamientos con fertilización y composta el daño fue estadísticamente menor y similar ($p < 0.05$. 6.75 y 8.30 %, respectivamente). Actualmente las compostas están reconocidas por ser tan efectivas como los fungicidas para el control de enfermedades causadas por patógenos de plantas transmitidos por el suelo. Las compostas de corteza de pino, de residuos de jardinería, de residuos de orujos de vid, de estiércol de vacuno y biosólidos, han sido útiles en la eliminación de algunas enfermedades causadas por *Rhizoctonia* (Kuter *et al.* 1988, Gorodecki y Hadar 1990, Boehm y Hoitink 1992, Grebus *et al.* 1993) Sin embargo se recomiendan más estudios sobre las propiedades supresoras de enfermedades de esta composta hecha con base en material de descarte y aguas residuales de tenerías debido a los resultados que se obtuvieron en las pruebas con *Eisenia foetida* y de brote y vigor relativo en semillas de pepino.

CONCLUSIONES

En la primera etapa de compostaje de 239 días se obtuvo una composta sin que se haya degradado completamente el bagazo de agave. Los restos del material del descarte aparecieron en forma de pequeños terrones calizos, producto seguramente de la mineralización de la materia orgánica y de los residuos del sulfuro de sodio, sulfhidrato de sodio y de la cal hidratada que se añadieron inicialmente a las pieles para eliminar el pelo y la epidermis. Al inicio del experimento se consideró que después de mantener la mezcla de bagazo de agave-material de descarte por más de seis meses sin movimiento, se podría obtener un producto con una textura similar a la de un suelo de jardinería; como el producto obtenido fue muy heterogéneo, sin haberse degradado completamente del bagazo de agave, se consideró la necesidad de

continuar con el compostaje, pero esta vez bajo un sistema periódico de riego y movimiento. Sin embargo, se recomienda que en estudios posteriores se haga una evaluación agronómica en campo de la primera composta, sobre todo para ahorrar energía y mano de obra en el movimiento de las pilas. De la segunda etapa de compostaje de 204 días se obtuvo un producto con color y textura similares a los de un suelo de jardinería aunque con ciertas limitaciones para poder utilizarse en proporciones altas ($> 20\%$) en plantas de ornato ya que los resultados en las pruebas con lombrices y de brote y vigor relativo en plantas de pepino no fueron los esperados en comparación con los obtenidos en trabajos similares con compostas de tripas de cerdo y material de descarte sin aguas residuales de tenerías. Los resultados reportados se atribuyen a las concentraciones altas de sodio, por lo que el producto podría ser utilizado en pasto de jardinería o campos de golf dado el constante riego que se practica en esta actividad. En las pruebas de campo no se presentó problema alguno en el uso de esta composta en el cultivo de papa. Sin embargo, es recomendable realizar más estudios sobre todo para determinar si efectivamente el uso de esta composta suprime el daño que le produce a la papa *R. solani*. El proceso de compostaje como forma de tratamiento de material de descarte y aguas residuales de la industria de curtiduría es viable técnicamente aunque hay que considerar la forma particular del uso de esta composta en prácticas agrícolas.

REFERENCIAS

- American Public Health Association (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18ava. ed. APHA, Washington, D.C. EUA.
- AOAC (1984). Oficial Method of Analysis. 14ava Ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C. EUA.
- Boehm M.J. y Hoitink H.A.J. (1992). Sustenance of microbial activity and severity of *Pythium* root rot of poinsettia. *Phytopathology* 82, 259-264.
- Czabator F.J. (1962). Germination value: an index combining speed and completeness of pine seed germination. *Forest Sci.* 8, 386-396.
- Edwards C.A. y Bates J.E. (1992). The use of earthworms in environmental management. *Soil Biol. Biochem.* 14, 1683-1689.
- Golueke C.G. (1977). Biological processing: composting and hydrolysis. En: *Handbook of solid waste management* (D.G. Wilson, Ed.). van Norstrand Reinhold, Nueva York, pp. 197-225.

- Gorodecki B. y Hadar Y. (1990). Suppression of *Rhizoctonia solani* and *Sclerotium rolfsii* in container media containing composted separated cattle manure and composted grape marc. *Crop Protec.* 9, 271-274.
- Grebus M.E., Feldman K.A., Musselman C.A. y Hoitink H.A.J. (1993). Production of biocontrol agent-fortified compost-amended potting mixes for predictable disease suppression. *Phytopatology* 83, 1406 (Abstract). <http://compostingcouncil.org/section.cfm?id=39>. Consultado en febrero de 2006.
- <http://compost.css.cornell.edu/monitor/monitorph.html>. Consultado en octubre 15, 2005.
- Instituto Nacional de Ecología (INE)(1999). Manual de procedimientos para el manejo adecuado de los residuos de la curtiduría. INE-SEMARNAT. pp. 1.
- Íñiguez G. y Vaca P. (2001). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 4. Biodegradación del intestino grueso de cerdos con bagazo de agave húmedo. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 17, 109-116.
- Íñiguez G., Flores S. y Martínez L. (2003). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 5. Biodegradación del material de descarte de la industria de curtiduría. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 17, 83-91.
- Kuter G.A., Hoitink H.A.J. y Chen W. (1988). Effects of municipal sludge compost curing time on suppression of *Pythium* and *Rhizoctonia* diseases of ornamental plants. *Plant Dis.* 72, 751-756.
- Mayer M. y Hofer H. (1987). New trends in waste recycling. Technical Note. Buehler Brothers Ltd., Uzwil, St. Gallen, Suiza.
- Metcalf y Eddy (1996). Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización. Tomo I. McGraw-Hill, Madrid, 125 p.
- Montgomery D.C. (1991). Design and analysis of experiments. Wiley, Nueva York. pp. 123-160.
- Norma Mexicana (2001). NMX-AA-051-SCFI. Análisis de agua-determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales, y residuales tratadas – método de prueba. Diario Oficial de la Federación. 13 de agosto. México, D. F.
- Norma Mexicana (2001). NMX-AA-029-SCFI. Análisis de aguas-determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba. Diario Oficial de la Federación. 17 de abril. México, D. F.
- Norma Oficial Mexicana (1993). NOM-052-SEMARNAT. Establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Diario Oficial de la Federación. 5 de octubre de 1993.
- NRAES-54 (1992). Northeast regional agricultural engineering service. En: On-farm composting handbook. Ithaca, Nueva York, p. 8.
- Santamaria-Romero S., Ferrera-Cerrato R., Almaraz-Suarez J.J., Galvis-Spindola A. and Barois-Boullard I. (2001). Dynamics and relationships among microorganisms, C-organic and N-total during composting and vermicomposting. *Agrociencia-Montecillo* 35, 377-384.
- SICCFA (1998). Soil Improvement Committee California Fertilizer Association. Western Fertilizer Handbook. 2ª ed., Interstate Publishers, Danville, Ill, 55 p.
- TMECC (2002). Thompson, W. H., Leeg, P. B., Millner, P. y Watson, M. E. Test methods for the examination of composting and compost. Disponible en: <http://www.tmecc.org/tmecc/>. Consultado en octubre 3, 2005.
- Virgen-Calleros G., Olalde-Portugal V. y Carling D. (2000). Anastomosis groups of *Rhizoctonia solani* on potato in central Mexico and potential for biological and chemical control. *Amer. J. Potato Res.* 77, 219-224.
- Zhu N. (2006). Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw. *Biores. Technol.* (in press).