

## UTILIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA TEQUILERA. PARTE 8. EVOLUCIÓN DE ALGUNOS CONSTITUYENTES DE LA MEZCLA DE BIOSÓLIDOS-BAGAZO DE AGAVE DURANTE EL COMPOSTAJE

Gilberto ÍÑIGUEZ<sup>1</sup>, Javier PARRA<sup>2</sup> y Patricia A. VELASCO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Guadalajara, Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Km. 15.5 carretera Guadalajara-Nogales. Las Agujas, Mpio. de Zapopan, Jalisco. Apartado Postal 52-93. Guadalajara 45020 Jalisco, México

<sup>2</sup>Universidad de Guadalajara, Departamento de Química. Blvd. Marcelino García Barragán y Calzada Olímpica. Guadalajara 44480 Jalisco, México

<sup>3</sup>Hilasal, S. A. de C. V. Carretera al Salto, Jalisco, México

(Recibido noviembre 2005, aceptado junio 2006)

Palabras clave: bagazo de agave, biosólidos, biodegradación, compostaje

### RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se estudio por duplicado, durante el proceso de compostaje de una mezcla de biosólidos y bagazo de agave, la reducción de la materia orgánica y el volumen, tomando en cuenta la densidad y el contenido de cenizas. Diariamente se midió la temperatura de cada pila, colocando en diferentes lugares 5 sensores de temperatura para graficar luego el promedio de los cambios de temperatura con relación al tiempo transcurrido. También durante el compostaje se tomaron muestras para el análisis de pH, materia seca, conductividad eléctrica, materia orgánica, cenizas, carbono orgánico, nitrógeno y densidad. Al final del proceso, a la composta se le practicaron pruebas de fitotoxicidad y de madurez con lombrices. A la composta también se le determinaron algunas características físicas como densidad, espacio poroso total, agua fácilmente disponible, agua de reserva, agua difícilmente aprovechable y capacidad de aire. Los cálculos de pérdida para los siguientes parámetros fueron: materia orgánica 57.1, volumen 77.1, carbono orgánico total 67.2 y nitrógeno total Kjeldahl 25.6 %. Según los resultados de las pruebas fitotoxicidad se obtuvieron compostas muy maduras. Sin embargo con base en los resultados de madurez en *Eisenia foetida* fue recomendable alargar un poco más el período de compostaje. La propiedades físicas de los biosólidos mejoraron con el compostaje.

Key words: agave bagasse, biosolids, biodegradation, composting

### ABSTRACT

The present research deals with the reduction of mass and volume during composting biosolids mixed with agave bagasse using measurements of nonvolatile solids (NVS) and bulk density. Temperature was measured daily and samples were taken to determine pH, dry matter, electrical conductivity, organic matter, ash, organic carbon, nitrogen and bulk density. At the end of the composting time, biosolids compost was subjected to an earthworm and phytotoxicity bioassays. Some physical properties as bulk density, total pore space, easily available water, water buffer content, difficult available water and air

capacity were also analyzed in the biosolids compost. Reduction in mass averaged 57.1 %, volume reduction 77.2 % and losses of organic carbon 67.2 and nitrogen averaged 25.6 %, respectively. The compost had no adverse effects on earthworm and phytotoxicity bioassays. Physical properties of biosolids improved with the composting process.

## INTRODUCCIÓN

El manejo y la disposición de lodos y biosólidos que se derivan de las plantas de tratamiento de aguas residuales representan un grave problema en términos ambientales y económicos para la zona conurbada de Guadalajara debido a su elevada cantidad (80,576 tons de lodos residuales/año) y volumen (422,305m<sup>3</sup>), cuyo manejo equivale al 40 % del costo global del tratamiento de aguas residuales (CONACyT 2004). Los biosólidos son un producto orgánico, rico en nutrientes, derivados de plantas de tratamiento de aguas residuales. Estos contienen materia orgánica y nutrientes esenciales para las plantas que pueden ser reciclados como fertilizantes y mejoradores del suelo, sin embargo, el contenido de metales pesados y organismos patógenos puede ser un factor limitante para su aprovechamiento en usos urbanos y agrícolas (Logan *et al.* 1997, NOM-004 2002). El compostaje de biosólidos puede ser una buena alternativa como método de control de organismos patógenos ya que las bacterias de origen entérico son sensibles a temperaturas mayores de 42 °C (McCaskey y Martin 1988). Esencialmente el compostaje se lleva a cabo en dos rangos de temperatura, mesofílica (10-40 °C) y termofílica (40 hasta 71 °C), siendo los 55 °C la temperatura crítica para eliminar patógenos humanos (Rynk 1992). Por otro lado, el diseño y el manejo de una planta de compostaje, depende en gran medida del volumen de los materiales disponibles para el compostaje así como del volumen y del peso del producto terminado. El peso y el volumen de los materiales para el compostaje pueden conocerse fácilmente mediante el volumen y el número de viajes de los camiones de volteo, en cambio es más difícil conocer el peso y el volumen del producto final cuando el compostaje no se hace a escala de laboratorio o piloto. En plantas de compostaje, la pérdida de volumen se estima típicamente de forma directa, lo que puede dar resultados no muy exactos, ya que las dimensiones de las pilas o hileras se miden mediante ecuaciones geométricas antes y después del compostaje, calculando la pérdida de volumen por diferencia del volumen inicial y final (Rynk 1992). La certeza de esos cálculos depende

mucho de la exactitud de las mediciones directas y del modelo geométrico que se utilice según la conformación de las pilas o hileras. El objetivo principal de este trabajo de investigación fue estudiar la evolución de la pérdida de materia orgánica y volumen durante el compostaje de una mezcla de biosólidos y bagazo de agave con base en ecuaciones establecidas para tal propósito, además de evaluar algunas características agronómicas y de madurez de la composta obtenida.

### Teoría

#### *Cálculos de la pérdida de materia orgánica*

Una de las características más importantes durante el proceso de compostaje es la pérdida de la masa o materia orgánica, esta pérdida puede ser calculada tomando en consideración lo siguiente: si se asume que los sólidos no volátiles (SNV) se conservan completamente durante el compostaje, el contenido de ellos debe necesariamente incrementarse en proporción directa a la pérdida de la masa durante la degradación microbiológica. Esta relación permite calcular el cambio proporcional en la masa total cuando se conoce el cambio en el contenido de los SNV.

La fracción remanente ( $X_M$ ) de la masa total durante el compostaje, puede representarse como una relación de la masa final ( $M_f$ ) y la masa inicial ( $M_i$ ):

$$X_M = M_f / M_i \quad (1)$$

Si  $A_i$  representa la masa de SNV durante el compostaje, la concentración de SNV al inicio ( $A_i$ ) y al final ( $A_f$ ) estarán dadas por las siguientes relaciones:

$$A_i = A_t / M_i \quad (2)$$

$$A_f = A_t / M_f \quad (3)$$

entonces en función de estas concentraciones, se puede calcular la proporción de la masa inicial que queda después del compostaje, es decir, la fracción remanente ( $X_M$ )

$$X_M = (A_i / A_f) / (A_i / A_i) \quad (4)$$

$$X_M = A_i / A_f \quad (5)$$

Para algunos propósitos es más práctico expresar las reducciones de la masa de composta en términos de la cantidad perdida, más que la fracción del material remanente inicial.

La fracción de la masa perdida ( $R_m$ ) se puede calcular como:

$$R_m = (M_i - M_f) / M_i \quad (6)$$

$$= 1 - (M_f / M_i) \quad (7)$$

$$= 1 - X_M \quad \text{ó} \quad (8)$$

$$R_m = 1 - (A_i / A_f) \quad (9)$$

Al multiplicar  $R_m$  por 100 se puede expresar la pérdida de la masa como porcentaje de la masa inicial.

#### *Pérdida de volumen*

Al descomponerse la materia orgánica durante el compostaje disminuye su volumen, esto no sólo por la pérdida de la materia orgánica sino también por el rompimiento de la estructura de los compuestos orgánicos para formar una matriz de partículas más pequeñas con una mayor densidad. El cambio de volumen se puede calcular al conocer los cambios de la materia orgánica y las densidades inicial y final. El cambio proporcional en el volumen total ( $X_v$ ) durante el proceso de compostaje se puede expresar como la relación del volumen final ( $V_f$ ) al volumen inicial ( $V_i$ ):

$$X_v = V_f / V_i \quad (10)$$

La densidad es un parámetro que relaciona la masa de la composta con su volumen. Los volúmenes inicial y final pueden expresarse en términos de los valores de las densidades inicial ( $D_i$ ) y final ( $D_f$ ) como:

$$V_f = M_f / D_f \quad \text{y} \quad (11)$$

$$V_i = M_i / D_i \quad (12)$$

Además:

$$X_v = (M_f / D_f) / (M_i / D_i) \quad (13)$$

$$= (M_f / M_i) (D_i / D_f) \quad (14)$$

$$= X_M (D_i / D_f) \quad (15)$$

Como se expresó en la ecuación (5),  $X_M$  puede expresarse como la relación de los contenidos inicial y final de cenizas. Además, el cambio de volumen durante el compostaje puede calcularse utilizando las mediciones inicial y final de cenizas y de densidad como:

$$X_v = (A_i / A_f) (D_i / D_f) \quad (16)$$

La fracción del volumen perdido ( $R_v$ ) se calcula como:

$$R_v = (V_i - V_f) / (V_i) \quad (17)$$

$$= 1 - (V_f / V_i) \quad (18)$$

$$= 1 - X_v \quad \text{ó} \quad (19)$$

$$R_v = 1 - [(A_i / A_f) (D_i / D_f)] \quad (20)$$

Este valor se puede multiplicar por 100 para expresar la pérdida del volumen como porcentaje del volumen inicial.

#### *Pérdida de carbono y nitrógeno*

Una de las principales virtudes del compostaje como método de manejo de desechos, radica en el concepto de reciclaje de nutrientes esenciales para las plantas, por lo que es importante efectuar estimaciones precisas del cambio de la masa total para valorar el grado en el que se conservan los nutrientes y otros constituyentes de la materia orgánica durante el compostaje. Un aumento substancial en la concentración, por ejemplo del nitrógeno y fósforo, no indica necesariamente que un constituyente fue muy bien conservado, esto debido a que las concentraciones se expresan típicamente con base en la masa y la masa final es invariablemente menor a la masa inicial en el compostaje. Por ejemplo, si se pierde el 25% del constituyente de un ingrediente inicial que experimenta una reducción del 50% de la masa total durante el compostaje, la concentración de este constituyente al final del compostaje será 50% mayor que la concentración inicial a pesar de una pérdida significativa. Tales cambios de concentración hacen imposible determinar el grado que los nutrientes de las plantas y otros componentes se conservan o se pierden durante el compostaje si no se conoce el cambio total de la masa. Comparando el cambio de concentración de un constituyente con otro, cuya masa permanece constante durante el compostaje, ofrece una forma alternativa de estimar el grado en el que se conserva o pierde un constituyente.

Con base en lo anterior si durante el compostaje se sigue la evolución de una fracción del sustrato, por ejemplo carbono o nitrógeno, la pérdida de este sustrato específico también puede seguirse mediante la fracción de cenizas de acuerdo con la ecuación:

$$PS = 1 - \frac{Y X_o}{Y_o X} \quad 21$$

en donde  $Y_o$  es el porcentaje inicial de carbono o nitrógeno y  $Y$  el porcentaje de carbono o nitrógeno en cualquier punto de muestreo (Iñiguez *et al.* 2005).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los biosólidos utilizados en este estudio, provenientes de una planta de tratamiento biológico de aguas residuales, fueron proporcionados por una fábrica textil que produce telas de algodón. El proceso de manufactura incluye hilatura, preparación del hilo, tejido, acabado (desengomado, pérdida crudo, blanqueo, teñido y estampado) y costura. Las aguas residuales de la fábrica textil se generan en los procesos húmedos del área de acabados (desengomado, pérdida de crudo, blanqueo, teñido y estampado de la tela de algodón). Del tanque de aireación, el agua tratada y los biosólidos pasan a un decantador o sedimentador secundario para facilitar la separación de los biosólidos y del agua tratada. Del decantador, parte de los biosólidos son recirculados al tanque de aireación y parte pasan a un espesador. De aquí los lodos van a un filtro de bandas con la adición previa de un polielectrolito para facilitar la compactación y la reducción del contenido de humedad (entre 80 y 85 %) para luego ser depositados en una tolva de 10 ton de capacidad y de aquí ser llevados a un relleno sanitario (20 a 25 ton/mes). De esta tolva fue de donde se tomaron los lodos para el trabajo experimental.

El bagazo de agave utilizado en este estudio fue proporcionado por una fábrica de tequila que no realiza, como normalmente se hace, el cocimiento de las cabezas de agave antes de la extracción de los azúcares fermentables, sino que estos son extraídos con agua caliente de cabezas de agave previamente desgarradas para facilitar la extracción.

### Proceso de compostaje

Con base en el contenido de carbono y nitrógeno de los lodos y el bagazo de agave se preparó una mezcla de 2.960 kg de lodos y 5.650 kg de bagazo de agave, para repartirse luego en dos pilas de aproximadamente 4.305 kg cada una. Durante el tiempo

que duró el proceso de biodegradación (155 días), diariamente se midió la temperatura de cada pila, colocando en diferentes lugares 5 sensores de temperatura (de carátula de 13 cm de diámetro con una varilla de 60 cm de largo) para graficar luego el promedio de los cambios de temperatura de los sensores con relación al tiempo transcurrido. Las pilas se removieron periódicamente para facilitar la aireación aprovechando la oportunidad para añadir agua las veces que fuera necesario para conservar la humedad de las pilas entre 40 y 65 % de humedad. A los 37, 69, 98, 127 y 155 días de compostaje se tomó una muestra de una mezcla compuesta para análisis de humedad y densidad. Esta misma muestra se secó en estufa a 50 °C y se molió (malla de 1 mm de abertura) para practicarle análisis por triplicado de cenizas, materia orgánica, carbono orgánico total, pH, conductividad eléctrica y nitrógeno total Kjeldahl (NTK). La densidad de las muestras, inmediatamente después de la toma de la mezcla compuesta, fue determinada de acuerdo con la técnica descrita por el TMECC 3.01-C para el análisis de densidad en campo (TMECC 2001). Para esto se puso una mezcla compuesta del material de las pilas hasta una tercera parte de una cubeta de 21 litros, esta se dejó caer al suelo 10 veces para añadir luego otra tercera parte más de material y dejar caer la cubeta nuevamente al suelo otras 10 veces. Se llenó completamente la cubeta con material y se dejó caer otras diez veces para al final volver a llenar la cubeta y con una regla dejarla al ras. La cubeta se pesó y se tomaron muestras para el análisis de humedad ya que la densidad es reportada en base seca.

### Pruebas biológicas

*Brote y vigor relativo de plantas de pepino, lombrices de tierra (Eisenia foetida)*

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 TMCC (2001. Método 05.05-A). 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 dos hileras de 10 celdas cada una con "peat moss" sin que estas hileras quedaran pegadas a la muestra de composta. Cada hilera de "peat moss" representaba una réplica del testigo positivo. Como testigo negativo se llenó al azar una hilera de 10 celdas de vermiculita. Cada hilera de vermiculita repre-

sentaba una réplica del control 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 plantitas de cada una de las charolas, registrándose el número de plantas con cotiledones e hipocotiledones totalmente expuestos, para evaluar el brote y el vigor relativo.

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 TMCC (2001, 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 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 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 la temperatura de ambiente del 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 las lombrices se volvieron a remover y pesar.

Para el cálculo del cambio porcentual de la masa conjunta de lombrices para cada una de las pruebas de 7 y 14 días se utilizó la siguiente ecuación:

$$G_i = [F_j - I_i] \div I_i \times 100$$

Donde:

$G_i$  = % de ganancia (positivo) o pérdida (negativo) de peso de las lombrices para cada una de las dos muestras analizadas (i), por ejemplo el control positivo que contiene la celulosa adicional y la muestra, %, g g<sup>-1</sup>

$F_j$  = Combinación del peso (peso total) de las lombrices que sobrevivieron al final de cada período de siete días, g, e

$I_i$  = Peso total inicial de las lombrices en el momento de preparación de las pruebas, g.

### Prueba de “solvita”

La madurez de las compostas también fue evaluada por la prueba de “solvita” (Woods End Research Laboratory 1999) que es un procedimiento relativamente nuevo y sencillo para determinar el índice de madurez de muestras de composta. Se basa en la medición simultánea y conjunta del amoníaco y dióxido de carbono eliminado durante la respiración. El análisis de madurez “solvita” clasifica la madurez de la composta según una escala de color que desarrollan dos paletas colocadas en la muestra de composta, del 1 al 5 para el amoníaco y del 1 al 8 para el CO<sub>2</sub>.

### Análisis químico

El contenido de nitrógeno total fue determinado por el procedimiento macroKjeldahl (AOAC 1984) y la humedad o materia seca 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 de las muestras fueron determinados de extractos en agua en una relación peso/volumen de 1:5 (CWMI, 1976). 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 el análisis de nitrógeno total Kjeldahl.

El total Ca, Cu, Fe, Mg, Mn, Na, Zn y K se determinó por espectroscopía de absorción atómica previa digestión de las muestras en parrilla y con HNO<sub>3</sub> concentrado, según el método de la Norma Oficial Mexicana (051-2001). El fósforo total fue determinado mediante espectrofotometría visible previa digestión de las muestras en HCl/HNO<sub>3</sub> y extracción en benceno/isobutanol según el método de la Norma Oficial Mexicana (029-2001).

La proporción de pérdida de materia orgánica (MO) por mineralización durante el compostaje fue calculada y multiplicada por 100 de acuerdo con la ecuación 9 descrita en la sección de teoría. La reducción de volumen ( $R_v$ ) fue calculada y multiplicada por 100 de acuerdo con la ecuación 20 descrita en la sección de teoría.

Las pérdidas de carbono orgánico total (COT) y NTK fueron calculadas de acuerdo con la siguiente ecuación según Iñiguez *et al.* (2005):

$$PS = 1 - \frac{Y X_o}{Y_o X}$$

### Análisis granulométrico

Este análisis se realizó utilizando 100 g de muestra de material seco al aire en tamices ordenados por tamaños (6.68, 3.33, 1.98 y 0.85 mm) sobre la tamizadora que se hizo funcionar durante 10 min a máxima amplitud y de forma intermitente (Martínez *et al.* 1988). Al cabo de este tiempo, se pesó el contenido de cada tamiz y del colector de fondo en recipientes tarados, con precisión de 0.01 g.

### Propiedades físicas

A los biosólidos, composta y “peat moss” se les practicaron las siguientes pruebas físicas: densidad, espacio poroso total, agua fácilmente asimilable, agua de reserva, agua difícilmente asimilable y capacidad de aire, según las técnicas descritas por De Boodt *et al.* (1974) y Gabriëls y Verdonck (1991).

### Análisis microbiológico

Las muestras de compostas fueron sujetas al análisis de *Salmonella spp.*, coliformes fecales y huevos de helmintos según las técnicas descritas en la Norma Oficial Mexicana (NOM 2003).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El **cuadro I** presenta algunas propiedades físicas y químicas de los biosólidos y el bagazo de agave, componentes únicos de la composta al inicio del compostaje. El bagazo de agave por ser un residuo lignocelulósico presentó apenas 0.053 % de NTK, mientras que los biosólidos por ser un residuo de origen

biológico presentaron un contenido del 6.0 %. Dado que en el proceso de compostaje es bien conocida la importancia que representa la relación C:N para una buena biodegradación de materiales orgánicos (25-30:1, Rynk 1992), se tomaron en cuenta las relaciones de C:N de los biosólidos y del bagazo para preparar una mezcla de estos ingredientes a una relación de C:N de 30:1. La relación C:N superior a los valores recomendados retrasa la descomposición de la materia orgánica, mientras que valores inferiores conducen a una pérdida excesiva de nitrógeno dando lugar a problemas de olores (Fraser y Lau 2000). Al mezclar el bagazo con humedad del 71% y los biosólidos con humedad del 84.2 % a la relación deseada de C:N, se obtuvo una mezcla con un contenido de humedad inicial del 75 %. El **cuadro II** presenta el análisis químico practicado a los biosólidos así como a las compostas de las pilas 1 y 2. En este cuadro puede apreciarse que el contenido de nitrógeno para los biosólidos fue del 6 % mientras que para las compostas de las pilas 1 y 2 la concentración fue del 3.14 y 3.17 respectivamente. El haber mezclado los biosólidos con un componente menor de nitrógeno (bagazo de agave, 0.53 %) sumado al 25.6 % de nitrógeno que se perdió durante el compostaje, es la razón de haber obtenido compostas con un contenido menor de nitrógeno al de los biosólidos. Por otro lado al inicio del compostaje el haber mezclado 1.91 kg por kg de biosólidos dió una relación de C:N de 30:1, que al final del compostaje se redujó al 11.75 y 11.29 % en las pilas 1 y 2, indicativo de haber logrado un producto estabilizado. Por otro lado la concentración de fósforo fue muy disminuida en las compostas al bajar casi del 1% en los biosólidos al 0.30 % en las compostas. La concentración de K no cambió mucho de los biosólidos a las compostas, ya que en los primeros la concentración fue del 0.27 % y en las compostas del 0.21 %.

La **figura 1** muestra los incrementos y decrementos de temperatura de las pilas 1 y 2 durante el compostaje. En esta figura se ilustran también los días en que se movieron las pilas para facilitar la aireación y la adición de agua para conservar la humedad de las pilas entre 40 y 65 %, rango recomendado para lograr una biodegradación más rápida (Rynk 1992b). En los días 18 y 37 en los que se removieron las pilas por primera y segunda vez no fue necesaria la adición de agua por haber registrado una humedad en las pilas superior al 65 %. Las temperaturas máximas alcanzadas se registraron entre los días 37 y 55 de compostaje, ya que las pilas 1 y 2 llegaron a temperaturas de 69 y 74 °C, respectivamente. La noche del día 84 de compostaje, después de haber añadido

**CUADRO I.** ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS COMPONENTES INICIALES DE LA COMPOSTA DE BIOSÓLIDOS

Propiedades	Biosólidos	Bagazo de agave
Humedad (%)	84.2	71.00
Materia seca (%)	14.6	29.00
pH	8.9	5.40
Cenizas (%) <sup>1</sup>	14.7	8.80
Materia orgánica (%) <sup>1</sup>	85.3	91.20
Carbono orgánico total (%) <sup>1</sup>	47.4	50.60
Nitrógeno total (%) <sup>1,2</sup>	6.0	0.53
Relación C:N	7.9	95.50

<sup>1</sup>Base seca

<sup>2</sup>Nitrógeno total Kjeldahl

**CUADRO II.** COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS BIOSÓLIDOS Y LA COMPOSTA DE LA MEZCLA BIOSÓLIDOS-BAGAZO DE AGAVE

Análisis	Biosólidos	Composta	
		Pila 1	Pila 2
pH	8.9	8.67	8.55
Cenizas (%) <sup>a</sup>	14.70	34.50	35.60
Materia orgánica (%)	85.30	65.5	64.40
Conductividad (mmhos cm <sup>-1</sup> )	2.68	3.47	3.23
N total (%) <sup>a</sup>	6.00	3.14	3.17
COT (%) <sup>ab</sup>	47.40	36.39	35.78
Relación C/N	7.9	11.75	11.29
P total (%) <sup>a</sup>	0.988	0.029	0.030
K total (%) <sup>a</sup>	0.271	0.215	0.207
Ca total (%) <sup>a</sup>	0.992	7.81	8.62
Mg total (%) <sup>a</sup>	0.436	0.497	0.525
Na total (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	0.913	0.692	0.619
Zn total (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	90.644	99.951	91.402
Mn total (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	117.693	111.883	112.741
Fe total (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	1289.257	1927.558	2128.386
Cu total (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	185.367	127.922	121.510

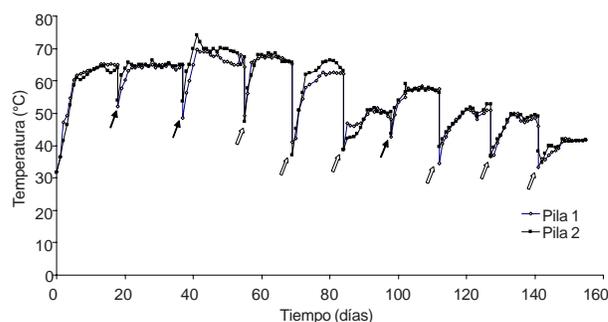
<sup>a</sup>Base seca<sup>b</sup>Carbono orgánico total

agua a las pilas, cayó una fuerte tormenta que mojó en forma excesiva las pilas (85 % de humedad), razón por la cual entre los días 84 y 98 de compostaje, la temperatura máxima fue apenas de 51.5 °C, esto es, 15 °C menos de lo alcanzado por la pila 2 en el período anterior. Al perderse humedad poco a poco en las pilas por efecto de la actividad biológica, en el siguiente período se alcanzó una temperatura máxima de 59 °C en la pila 2. Un exceso de humedad, reduce la penetración del oxígeno ya que su transporte está íntimamente relacionado al contenido de humedad. Si se limita el suministro de oxígeno disminuye la producción de calor por los microorganismos (Richard 1976). La **figura 1** también ilustra que al llegar al día 155 en el que se decidió dar por terminado el proceso de compostaje, en las pilas 1 y 2 se registraron temperaturas máximas de 41.5 °C. Al final de este tiempo el producto del compostaje presentó olor, textura y color, similares al de una tierra de jardinería.

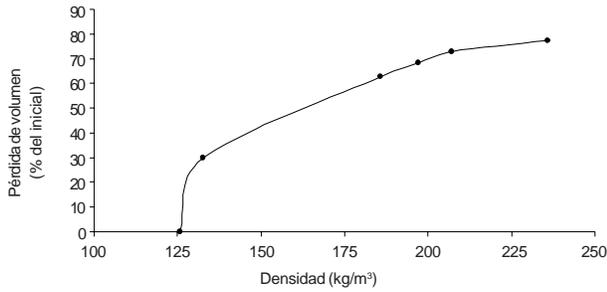
#### Pérdidas de materia orgánica, materia seca, nitrógeno, volumen y carbono orgánico total

Al relacionar los porcentajes de pérdida de materia orgánica (ecuación 9) y de volumen (ecuación 20) se encontró un coeficiente de correlación de 0.99 con una ecuación de la recta de:  $y = 1.3425x$ . Las observaciones demostraron que la reducción de volumen durante el compostaje fue debido a la disminución del tamaño de partícula del bagazo, al volumen

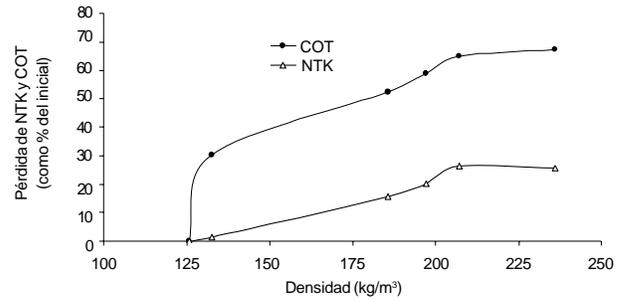
del poro, así como a la pérdida de la materia orgánica. Después de 155 días de compostaje la pérdida de materia orgánica fue del orden del 57.1 % y la del volumen del 77.1 %. Por otro lado, al final del compostaje se recuperaron 340 kg por pila, que corresponden al 32.2 % de la mezcla inicial, lo significa una pérdida de materia seca del orden del 67.8 % que de acuerdo con promedio de materia orgánica de las dos pilas del **cuadro II**, equivaldría al 75.3 %, mientras que la pérdida teórica de acuerdo con la ecuación arriba mencionada, corresponde al 57.1 %, esto es una diferencia en porcentajes del 18.2 %. La **figura 2** muestra la reducción del volumen en las pilas al aumentar la densidad del material en 155 días de



**Fig. 1.** Cambios de temperatura durante la biodegradación de biosólidos y bagazo de agave. Las flechas delgadas indican los días de volteo y las flechas gruesas vacías días de volteo y adición de agua



**Fig. 2.** Reducción de volumen en las pilas al aumentar su densidad durante 155 días

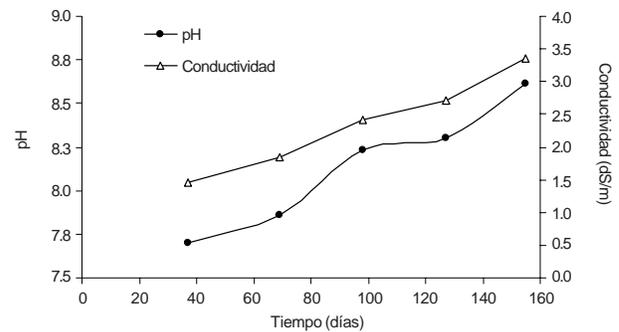


**Fig. 3.** Pérdidas de Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) y Carbono Orgánico Total (COT) en relación con la densidad en 155 días de compostaje

compostaje. La densidad de compostas puede variar ya sea por el tipo y la biodegradabilidad de material al inicio del compostaje como por la duración del proceso. En nuestro caso iniciamos con una densidad de 125.6 kg/m<sup>3</sup> y terminamos con una de 236 kg/m<sup>3</sup>. Breitenbeck y Schellinger (2004) reportaron diferentes densidades después de 100 días de compostaje de diversos materiales. Para compostas de corteza de maderas duras y blandas, bagazo de caña de azúcar con ensilados de maíz y astillas de madera con biosólidos, las densidades fueron de 170, 200 y 290 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

La relación entre las pérdidas calculadas de materia orgánica como por ciento de la inicial (ecuación 9) y el contenido de carbono orgánico total (ecuación 33) en 155 días de compostaje, dio un coeficiente de correlación de 1 con una ecuación de la recta de  $y = 1.1764x$ . En este período de compostaje se presentó una pérdida de materia orgánica del 57.1 % por una de carbono orgánico total (COT) del 67.2 %, resultado esperado si se asume que la pérdida de materia orgánica resulta principalmente de la mineralización microbológica del carbono orgánico. Comparando esos valores nos damos cuenta que la pérdida de carbono contribuyó a una pérdida del 57.1 % de la materia orgánica para ese tiempo de compostaje. Se asume razonablemente que la formación de agua a partir de oxígeno e hidrógeno que se encuentran unidos orgánicamente durante la descomposición, dan una muy buena justificación del resto de las pérdidas. Las pérdidas por volatilización o lixiviación del N, P, S u otros constituyentes residuales mineralizados durante la degradación, indudablemente que contribuyen a la pérdida total de la materia orgánica, pero se desconoce la magnitud de estas pérdidas, sobre todo de P y S. Las pérdidas de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) se ilustran en la **figura 3**, en que se puede apreciar que a medida que aumentó la densidad de los materiales en compostaje se presentó una pérdida de COT de 67.2 % y de NTK de 25.6 % al final del período de

compostaje. Sin embargo, la concentración de nitrógeno en las muestras analizadas, tendió a aumentar de 1.57 % al inicio del compostaje a 2.22, 2.54, 2.66, 2.74 y 2.90 % a los 37, 69, 98, 127 y 155 días de compostaje respectivamente, ya que como se puede apreciar en la **figura 3**, se perdió menos nitrógeno que carbono durante el compostaje. La relación entre las pérdidas calculadas del volumen como porcentaje del inicial (ecuación 20) y el contenido de carbono orgánico total (ecuación 21) en 155 días de compostaje, dio un coeficiente de correlación de 0.99 con una ecuación de la recta de  $y = 0.878x$ . Haciendo la relación de esos dos parámetros, nos dimos cuenta que la pérdida de un 67.2 % de carbono orgánico total contribuyó a una pérdida del 77.2 % del volumen para ese tiempo de compostaje. Resultado esperado si se asume que la pérdida de materia orgánica resulta principalmente de la mineralización microbológica del carbono orgánico. La **figura 4** presenta los cambios de pH y conductividad registrados durante el compostaje de los biosólidos. Estos dos parámetros presentaron la misma evolución, esto es un cambio paulatino de pH y conductividad desde 7.7 y 1.45 dS/m a los 37 días, hasta un máximo de 8.6 para el pH y de 3.35 dS/m



**Fig. 4.** Cambios de pH y conductividad durante el compostaje de biosólidos

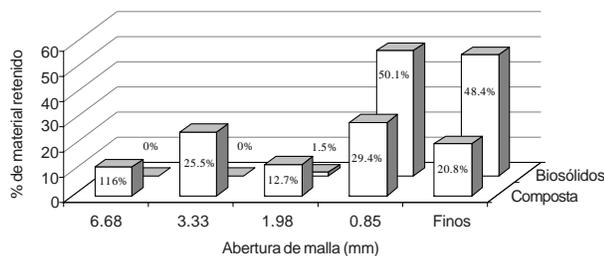
para la conductividad al final del compostaje. Los cambios de pH presumiblemente se deben al desarrollo de iones  $\text{NH}_4\text{OH}$  de compuestos cuaternarios (Renalli *et al.* 2001) o a la hidrólisis alcalina de sales de K y Na de los materiales en compostaje (Tomati *et al.* 1995). Los cambios de conductividad de 1.45 a 3.35 dS/m fueron debidos al proceso de mineralización que sufrió la mezcla biosólidos-bagazo de agave al aumentar el contenido de cenizas y por ende la conductividad de 15 % a inicio del compostaje al 35 % al final del mismo. La mayoría de las compostas tienen una conductividad por las sales solubles de 1.0 a 10.0 dS/m mientras que valores típicos de conductividad en suelo van de 0 a 1.5 dS/m ([http://tmecc.org/sta/compost\\_attributes.html](http://tmecc.org/sta/compost_attributes.html)).

**Análisis granulométrico**

La **figura 5** presenta el análisis granulométrico que se le practicó a los biosólidos y a las muestras de composta de las pilas 1 y 2. Los biosólidos al secarse adquieren un textura como si se tratara de “grava” por lo que fue necesaria la molienda para los estudios de liberación de agua. Al molerlos como puede apreciarse en esta figura, el 98.5 % quedó repartido entre la malla de abertura 0.85 (50.1 %) y los finos (48.4 %). También en esta **figura 5** puede apreciarse la distribución del tamaño de partículas del promedio de las dos pilas de la composta de biosólidos al final del compostaje. El 20.8 % fue de material completamente transformado en polvo, mientras que 11.6, 25.5, 12.7 y 29.4 %, quedaron repartidos entre las mallas de abertura 6.68, 3.33, 1.98 y 0.85 mm, respectivamente. Por el tamaño de partículas no habría problema alguno en utilizar estas compostas como sustrato o como materia prima para la preparación de mezclas de sustratos.

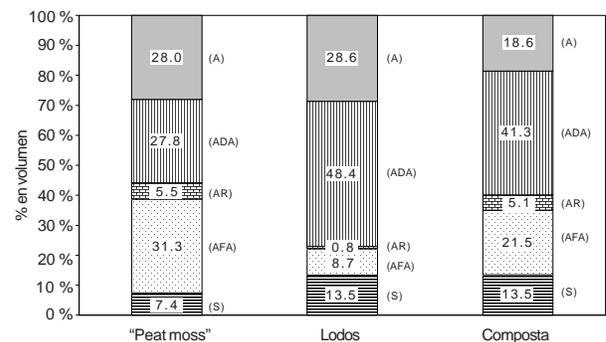
**Propiedades físicas**

Un aspecto importante que se buscaba al someter a compostaje los biosólidos, era eliminar malos olores así como mejorar algunas de sus propiedades



**Fig. 5.** Clasificación por tamaño de partículas de los biosólidos y su composta

físicas. En la **figura 6** puede apreciarse que los parámetros de liberación de agua como “agua fácilmente asimilable” (porcentaje retenido de volumen de agua a tensiones entre 10 y 50 centímetros de agua) mejoró en un 247 % al pasar de 8.7 % en biosólidos a 21.5 % en la composta; el “agua difícilmente asimilable” (retenida a tensiones por arriba de 100 centímetros de agua) cambió favorablemente en 14.4 % al cambiar de 48.4 en biosólidos a 41.4 % en la composta; el “agua de reserva” (retenida a tensiones entre 50 y 100 centímetros de agua) cambió de 0.8 en biosólidos a 5.1 % en la composta, siendo este valor similar al obtenido en el “peat moss” que fue de 5.5 % vol. El espacio poroso total (100 – % materia sólida) fue similar para los biosólidos 86.6 como para la composta (86.4 % vol.), aunque como se esperaba, menor al valor del “peat moss” que fue de 92.6 % vol. En cuanto a la “capacidad de aire” (porcentaje de aire que llena la porosidad a una tensión de 10 centímetros de agua) esta fue de 28 % para el “peat moss”, de 28.6 % para los biosólidos y de 18.7 % para la composta.



**Fig. 6.** Propiedades físicas del “peat moss”, de los biosólidos y de la composta biosólidos-bagazo: porcentaje en volumen de material sólido (S), agua fácilmente asimilable (AFA), agua de reserva (AR), agua difícilmente asimilable (ADA) y capacidad de aire (A).

**Brote y vigor relativo**

De acuerdo con la metodología de bioensayos cualitativos para la evaluación de madurez de compostas, en términos de brote, se tuvieron compostas muy maduras en las pilas 1 y 2 ya que el brote para ambas fue del 100 % utilizando, según la técnica, un sustrato a base de composta y vermiculita (mezcla al 50-50 % en volumen). Según los datos de referencia del TMCC (2001, Método 05.05-A) valores de brote mayores al 90 % indican una composta muy madura, valores entre 90 y 80 % una composta madura y valores menores del 80 % una composta

inmadura. El brote de semillas de pepino sembradas en composta de las pilas 1 y 2 como substrato, fue del 82 % para la pila 1 y del 100 % para la pila 2. En cuanto a los análisis de vigor relativo, los resultados indicaron que se trataba de compostas muy maduras, ya que los valores encontrados fueron de 97.4 % para la pila 1 y de 100 % para la pila 2. Según los datos de referencia del TMCC (2001, Método 05.05-A) valores de vigor relativo, mayores del 95 %, indican composta muy madura, valores entre el 85 y 95 % compostas maduras y valores menores del 85 % compostas inmaduras. No fue posible reportar valores de vigor relativo en plantas de pepino desarrolladas sólo en composta de las pilas 1 y 2 ya que su desarrollo fue tan débil que la altura de las plantitas no rebasó el valor promedio de las plantitas desarrolladas en el testigo.

### *Eisenia foetida*

Con base en los resultados de la prueba biológica desarrollada con *Eisenia foetida* las compostas de las pilas 1 y 2 no pueden considerarse tóxicas ya que en ninguna de las dos compostas las lombrices murieron ni la ganancia de peso fue negativa. Por otro lado, las lombrices desarrolladas en el testigo y en la composta de la pila 1, ganaron de su peso inicial en los primeros 7 días de incubación 47 % en el testigo y 15 % en la composta y al final de los 14 días 109 % para el testigo y 47 % para la composta, lo que significa que para el primer período, la composta de la pila 1 puede considerarse estable e inestable para el segundo período. La composta es considerada inestable si el cambio de peso de las lombrices es mayor del 40 % tanto para el testigo positivo (con celulosa) como para la muestra de análisis (sin celulosa). La composta es considerada estable si el cambio en peso de las lombrices es mayor del 40 % en el testigo positivo (con celulosa) y el cambio de peso de las lombrices está entre cero y 40 % en la muestra de composta de análisis sin celulosa. Para la pila 2, la ganancia de peso de las lombrices en el primer período de 7 días, fue del 54 % para el testigo y del 9 % para la composta, mientras que para el segundo período también de 7 días, la ganancia de peso fue del 185 % para el testigo y del 62 % para la composta. En resumen, las compostas de las pilas 1 y 2 pueden considerarse estables para el primer período e inestables para el segundo. Según estos resultados, la estabilidad de las compostas de las pilas 1 y 2 puede lograrse al aumentar el período de compostaje más allá de los 155 días establecidos. Si no se alargó este período fue por querer determinar en este estado de biodegradación y con este tamaño

de partículas (**Fig. 7**) la capacidad de retención de agua y la porosidad de aire de las compostas, ya que a menor tamaño de partícula menor pudiera ser la porosidad o el volumen de aire. Las raíces de las plantas necesitan aireación y ésta dependerá principalmente del tamaño de los poros del medio de cultivo por lo que es necesario que haya un mínimo de porosidad ocupada por aire.

### Solvita

Con base en la concentración de bióxido de carbono y amoníaco, según el desarrollo de color en la paleta indicado, los resultados de la prueba de "solvita" reportaron valores de 5 para el bióxido de carbono y de 5 para el amoníaco para las compostas de las pilas 1 y 2, lo que significa un índice de madurez de 5 equivalente a una composta que ha terminado la fase activa de descomposición y está lista para la etapa de maduración.

### Análisis microbiológico

Al final del compostaje las muestras de compostas estuvieron libres de *Salmonella spp* y de huevecillos de helmintos. El análisis coliformes fecales mostró una población menor de 3 unidades formadoras de colonias por gramo de composta en ambas pilas.

## CONCLUSIONES

El haber sometido biosólidos al proceso de compostaje utilizando bagazo de agave como agente de relleno, agregante o de enmienda, resultó en un proceso exitoso tanto por la estabilización y la eliminación de olores como por la obtención de un producto similar físicamente a una composta de follaje de pinos y encinos. Al someter a compostaje biosólidos mezclados con bagazo de agave se mejoró, en comparación a las características de los biosólidos, 247 % la evaluación del parámetro "agua fácilmente asimilable", 637 % el de "agua de reserva" y 14.4 % el de agua difícilmente asimilable. También el bagazo de agave ayudó a ajustar la fuente de carbono de los biosólidos, de una relación inicial C:N de 7.9:1 a 30:1, además de que sirvió como estructurante de las pilas de compostaje, ya que las partículas de biosólidos por sí solas, al perder agua, se contraen y endurecen como piedras, impidiendo la aireación y por ende su estabilización. Experimentalmente, considerando el contenido de materia seca al inicio y al final del compostaje, la pérdida fue del 67.7 %, mientras que la pérdida de carbono orgánico total (75.5 %) corres-

pondió a lo mismo que se perdió de materia orgánica (75.3 %) y según al modelo matemático planteado en este estudio, las pérdidas de carbono orgánico total y de materia orgánica, correspondieron a 67.2 y 57.1 % en 155 días de compostaje, respectivamente. El ajuste de los valores encontrados en este modelo con la realidad, dependerá definitivamente de las fuentes de carbono que se estén utilizando como agente de relleno, ya que mucho tiene que ver la biodegradabilidad y la disponibilidad del carbono con el contenido de lignina.

## REFERENCIAS

- AOAC (1984). Official Method of Analysis. 14a. Ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington, D. C.
- Breitenbeck G. A. y Schellinger D. (2004). Calculating the reduction in material mass and volume during composting. *Compost Sci. and Utilizat.* 12, 365-371.
- CONACyT. Fondos mixtos. CONACyT-Gobierno del Estado de Jalisco. Convocatoria 2004-02. Demandas específicas de Investigación en Materia de Agua para el Estado de Jalisco. Demanda 2. Biotransformación de lodos residuales en productos con valor comercial. Consultado el 14 de junio del 2005. [www.conacyt.mx](http://www.conacyt.mx)
- CWMI (Cornell Waste Management Institute)(1976). The science and engineering of composting. Monitoring compost pH. Consultado el 22 de junio de 2005. <http://compost.css.cornell.edu/monitor/monitorph.html>.
- De Boodt M., Verdonck O. y Cappaert I. (1974). Method for measuring the water release curve for organic substrates. *Acta horticulturae* 37, 2054-2062.
- Fraser B. S. y Lau A. K. (2000). The effect of process control strategies on composting rate and odor emission. *Compost Sci. Utilizat.* 8, 274-292.
- Gabriëls R. y Verdonck O. (1991). Physical and chemical characterization of plant substrates: towards a European standardization. *Acta horticulturae* 294, 249-259.
- 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,
- Haug R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida. [http://tmecc.org/sta/compost\\_attributes.html](http://tmecc.org/sta/compost_attributes.html). Consultado el 26 de octubre de 2005.
- Íñiguez G., Acosta N., Martínez L., Parra J. y González O. (2005). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 7. Compostaje de bagazo de agave y vinazas tequileras. *Rev. Int. Contam. Ambiental*, 21, 37-50.
- Logan T.J., Lindsay B.J., Goins L.E. y Ryan J.A. (1997). Field assessment of sludge metal bioavailability to crops: sludge rate response. *J. Environ. Qual.* 26, 534-550.
- Martínez F.X., Bures S. y Mas X. (1988). Variación de las propiedades de 5 sustratos a base de turba en relación con los métodos de análisis utilizados. *Actas del III Congreso de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas*
- McCaskey T.A. y Martin Jr. J.B. (1988). Evaluation of a process for improve quality and microbial safety of broiler litter. *Biol. Wastes* 25, 209-218.
- NMX-AA-051 (2001). Norma Oficial Mexicana. *Diario Oficial de la Federación*. 13 de agosto. México, D. F.
- NMX-AA-026 (2001). Norma Oficial Mexicana. *Diario Oficial de la Federación*. 13 de agosto. México, D. F.
- Norma Oficial Mexicana (2003). NOM-004 SEMARNAT-2002. *Diario Oficial de la Federación*. 15 de agosto. México, D. F.
- Renalli G., Bottura G., Taddei P., Garavani M., Marchetti R. y Sorlini C. (2001). Composting of solid and sludge residues from agricultural and food industries. Bioindicators of monitoring and compost maturity. *J. Environ. Sci. Health*, A36, 415-436.
- Richard T. (1976). Excess moisture. Cornell Waste Management Institute. The Science and Engineering of Composting. Consultado el 25 de octubre de 2005. [http://compost.css.cornell.edu/odors/excess\\_moisture.html](http://compost.css.cornell.edu/odors/excess_moisture.html).
- Rynk R. (Ed.) (1992). *On-farm composting handbook*. NRAES-54. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Cooperative Extension, Ithaca, New York. pp. 10, 70-72.
- TMECC (2001). Test methods for the examination of composting and compost. Consultado el 3 de febrero de 2005. <http://tmecc.org/tmecc>.
- Tomati U., Galli E., Pasetti L. y Volterra E. (1995). Bioremediation of olive-mill wastewaters by composting. *Waste Manage. Res.* 13, 509-518.
- Woods End Research Laboratory (1999). Guide to Solvita™ Testing for Compost Maturity Index. [Online]. Disponible en <http://www.woodsendlab.org>. Verificado, 1999. Consultado el 15 de agosto de 2005. Woods End Research Laboratory. Mt. Veron. Main.