

UTILIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA TEQUILERA. PARTE 11. COMPOSTAJE DE BAGAZO DE AGAVE CRUDO Y BIOSÓLIDOS PROVENIENTES DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE VINAZAS TEQUILERAS

Ramón RODRÍGUEZ¹, Juan Francisco JIMÉNEZ², José Ignacio del REAL², Eduardo SALCEDO³,
Juan Francisco ZAMORA¹ y Gilberto ÍÑIGUEZ^{3*}

¹ Universidad de Guadalajara, Departamento de Botánica y Zoología. Km. 15.5 carretera Guadalajara-Nogales. Las Agujas, Zapopan, Jalisco. Apartado Postal 1-139. CP 45110

² Tequila Sauza SA de CV y SRL de CV. Av. Vallarta 6503, Local 49-E Centro Comercial Concentro, Col. Ciudad Granja, Zapopan, Jalisco. CP 45010

³ Universidad de Guadalajara, Departamento de Madera, Celulosa y Papel. Km. 15.5 carretera Guadalajara-Nogales. Las Agujas, Zapopan, Jalisco. Apartado Postal 52-93. CP 45020

*Autor responsable: giniguez@dmccp.cucei.udg.mx

(Recibido noviembre 2012, aceptado julio 2013)

Palabras clave: residuos del tequila, composta, vinazas, bagazo de agave

RESUMEN

Se realizó un estudio de campo para el compostaje de bagazo de agave crudo empleando agua y biosólidos para mantener la humedad del proceso. Se pusieron en compostaje ocho pilas de 30 toneladas de bagazo cada una. Las pilas 1-4 se movieron cada semana para la aireación y adición de agua o biosólidos. A la pila 1 se agregaron 1560 L de agua; a las pilas 2-4, 1560, 3120 y 4680 L de biosólidos, respectivamente. A las pilas 5-8 se les añadió progresivamente la misma cantidad de agua o biosólidos, con la salvedad de que éstas se movieron cada dos semanas. Cada tercer día se midió la temperatura de las pilas y se graficó el promedio de seis sensores en relación con el tiempo de compostaje. Cada siete o catorce días –según correspondiera al tiempo de volteo– se tomaron muestras de cuatro puntos de las diferentes pilas para el análisis de humedad, pH y conductividad eléctrica (CE). Al final del periodo de compostaje, el color, olor y textura del material de las ocho pilas se volvió semejante a tierra de jardinería. En este punto se tomaron muestras compuestas para un análisis microbiológico, granulométrico y químico. La relación de kg de bagazo procesado / L de agua o biosólidos añadidos para las pilas de los tratamientos 1-8 fue de 1/0.728, 1/0.676, 1/1.04, 1/1.56, 1/0.52, 1/0.364, 1/0.572 y 1/0.858, respectivamente. Si se considera esta última relación para añadir vinazas (como actualmente se practica) en lugar de biosólidos a las pilas de compostaje de bagazo de agave, y si se toma la estadística del CRT de 2011 en cuanto a producción de bagazo y vinazas, se concluye que en el compostaje de bagazo solamente se podría disponer de 59.6 % de las vinazas generadas durante el proceso de fermentación; por tanto, 40.4 % requeriría otro tipo de manejo.

Key words: tequila residues, compost, vinasses, agave bagasse

ABSTRACT

A field study was conducted for composting raw agave bagasse using water or biosolids to maintain the process's moisture. Eight 30-ton piles of bagasse were composted. Piles 1-4 were moved once a week for aeration and addition of water or biosolids. Pile 1 was added with 1560 L of tap water and piles 2-4 with 1560, 3120 and 4680 L of biosolids, respectively. Piles 5-8 were added with the same amount of water or biosolids quantity, but were moved every two weeks. The piles' temperature was measured every third day and the average of six sensors was plotted according to the composting time. Every seven or 14 days, depending on the turning time, samples from four points of each pile were taken for moisture, pH and electric conductivity analyses. At the end of the composting period, the color, smell and texture of the composts from the piles became similar to gardening soil. At this point composite samples were taken for microbiological, granulometric and chemical analysis. The ratio of raw agave bagasse (kg) / water or biosolids (L) added to the piles of each treatment (1-8) was 1/0.728, 1/0.676, 1/1.04, 1/1.56, 1/0.52, 1/0.364, 1/0.572 and 1/0.858, respectively. If the latter ratio is considered to add vinasses (as currently practiced in the tequila industry) instead of biosolids, and the 2011 CRT statistic with regards to bagasse and vinasse production is considered, it is concluded that only 59.6 % of vinasses produced could be disposed in the composting of bagasse, while the remaining 40.4 % would require a different kind of disposal.

INTRODUCCIÓN

La producción de tequila ha contribuido al desarrollo agrícola e industrial de México, especialmente en el estado de Jalisco. En los últimos nueve años el consumo de agave y producción de tequila se han incrementado notablemente. De 2003 a 2011, la industrialización de cabezas de agave aumentó de 412 900 toneladas; a 998 400 toneladas, con un máximo de 1 125 100 en 2008 (CRT 2011). Afortunadamente, este explosivo crecimiento de la industria del tequila no ha desatendido el manejo y disposición de dos de los principales subproductos: el bagazo y las vinazas. Respecto a éstas –aunque falta mucho por hacer dado su alto poder contaminante–, sólo contadas empresas han resuelto con éxito su manejo a razón de su capacidad instalada; los métodos más empleados son separación de sólidos sedimentables y digestión anaerobia seguida por lagunas de aireación o lodos activados. En lo referente al manejo del bagazo, la mayoría de las empresas han optado por el compostaje, eminentemente como recurso para disponer de las vinazas, los sólidos sedimentables o los biosólidos de las plantas de tratamiento. Debido a que la literatura al respecto es escasa, el objetivo del presente trabajo es estudiar el proceso de compostaje del bagazo en campo, considerando condiciones normales de operación, como tiempo, volteo y adición de agua o biosólidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en las instalaciones del Rancho el Indio, propiedad de la empresa Tequila Sauza, SA de CV y SRL de CV ubicado en el municipio de Tequila, Jalisco, con coordenadas 20°53'41" N y 103°50'10.50" W. Se utilizaron bagazo de agave y biosólidos facilitados por la destilería La Perseverancia y la Planta Tratadora de Aguas Residuales (PTAR) propiedad de la misma empresa tequilera. El bagazo fue bagazo crudo proveniente del destrozo inicial de las cabezas posterior a la extracción de los azúcares hidrolizados con agua caliente. Los biosólidos de la PTAR se extrajeron del tanque de sedimentación de una laguna de aireación de forma intermitente, tras el tratamiento de vinazas mediante la separación física de sólidos y digestión anaerobia.

Se formaron ocho pilas con bagazo fresco, de aproximadamente 30 toneladas por pila y 30 m de largo por 1.25 m de alto. El proceso de compostaje se realizó al aire libre siguiendo el método de pilas con volteos (Rynk 1992). Cada pila se inoculó con aproximadamente 10 % de bagazo proveniente de pilas con 60 días de compostaje, distribuido en la parte superior con un tractor de pala frontal y mezclado con el bagazo fresco con una volteadora mecánica. Cada pila representó un tratamiento bajo las condiciones de operación descritas en el **cuadro I**. Para los tratamientos 1, 2, 3 y 4, se consideró agregar

CUADRO I. CONDICIONES EN LAS QUE SE OPERÓ EL PROCESO DE COMPOSTAJE

Semana	Manejo	Tratamiento (30 ton de bagazo de agave más la adición de L de agua o biosólidos)							
		1 ^a	2 ^b	3 ^b	4 ^b	5 ^a	6 ^b	7 ^b	8 ^b
1	Inoculación y volteo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo
2	Reposo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo
3	Riego y volteo	1560	1560	3120	4680	1560	1560	3120	4680
4	Riego y volteo	1560	1560	3120	4680	(-) ^c	(-)	(-)	(-)
5	Riego y volteo	1560	1560	3120	4680	1560	1560	3120	4680
4	Riego y volteo	1560	1560	3120	4680	(-) ^c	(-)	(-)	(-)
7	Riego y volteo	1560	1560	3120	4680	1560	1560	3120	4680
4	Riego y volteo	1560	1560	3120	4680	(-) ^c	(-)	(-)	(-)
9	Volteo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo
10	Volteo	positivo	positivo	positivo	positivo	(-)	(-)	(-)	(-)
11	Riego y volteo	1560	1560	3120	4680	1560	1560	3120	4680
12	Riego y volteo	1560	1560	3120	4680	(-)	(-)	(-)	(-)
13	Volteo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo
14	Volteo	positivo	positivo	positivo	positivo	(-)	(-)	(-)	(-)
15	Riego y volteo	3120	1560	3120	4680	1560	1560	3120	4680
16	Riego y volteo	1560	1560	1560	2340	3120	(-)	(-)	(-)
17	Riego y volteo	1560	1560	1560	2340	1560	1560	1560	2340
18	Riego y volteo	1560	1560	+ ^d	+	(-)	(-)	(-)	(-)
19	Riego y volteo	1560	1560	+	+	3120	1560	(+)	(+)
Total de volteos		18	18	18	18	11	10	10	10
Total de L de agua o de Biosólidos añadidos		21 840	20 280	31 200	46 800	15 600	10 920	17 160	25 740
Relación kg de bagazo/L de Agua o de biosólidos añadidos		1/0.728	1/0.676	1/1.04	1/1.56	1/0.52	1/0.364	1/0.572	1/0.858

^a L de agua. ^b L de biosólidos. ^c No correspondía. ^d Sólo volteo

agua o biosólidos, con movimiento de las pilas cada siete días, mientras que para los tratamientos 5, 6, 7 y 8 el movimiento fue cada catorce días.

Cada tercer día se midió la temperatura de las pilas por medio de seis sensores (termómetros de carátula marca Rochester, de 13 cm de diámetro y con varilla de 60 cm) colocados en línea recta sobre la parte superior de la pila. Posteriormente se graficó el promedio de las temperaturas registradas con relación al tiempo de compostaje. Cada siete o catorce días, según correspondiera, se tomaron submuestras de 1/2 kg de cuatro puntos a 40 cm de profundidad, partiendo de la parte superior, seleccionados al azar a lo largo de la pila, con las cuales se formaron muestras compuestas al final de la colecta. Se analizó el contenido de humedad o materia seca, pH y conductividad eléctrica (CE) de las muestras.

Al final del compostaje se ubicaron cuatro puntos de muestreo en las ocho pilas, con los cuales se preparó una mezcla compuesta de 1 kg para el análisis de materia orgánica (MO), cenizas, carbono orgánico total (COT), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), potasio (K), fósforo (P), sodio (Na), calcio (Ca), magnesio (Mg), cobre (Cu), hierro (Fe), boro (B), arsénico (Ar), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni),

plomo (Pb) y zinc (Zn). Como resultado se tomó el promedio de los cuatro puntos analizados. Después de secarse a 50 °C, las muestras compuestas se molieron y guardaron en bolsas de plástico hasta ser analizadas. El análisis granulométrico y microbiológico se practicó a una muestra compuesta.

Por otro lado se analizó el contenido de humedad, MO, ceniza, COT, NTK, P, Ca, Mg, Cu, Fe, Zn, K, Na, CE y pH del bagazo de agave crudo y los biosólidos. La humedad o materia seca se determinó al secar una muestra durante 24 horas a 105 °C. Para el análisis de cenizas, la muestra se puso a la mufla a 550 °C por dos horas. El material volátil se consideró MO (AOAC 1984). El pH y la CE se determinaron en extractos en agua; la relación peso/volumen fue de 1:5 (CWMI 1996). El pH y la conductividad se midieron con un potenciómetro y conductímetro integrado marca Conductronic modelo PC18. El contenido de NTK se determinó por el procedimiento macro-Kjeldahl (AOAC 1984). El COT se calculó mediante la siguiente ecuación (Golueke 1977): % COT = (100-cenizas)/1.8. La relación C:N se calculó a partir de los análisis anteriores de COT y NTK. El total de P, Ca, Mg, Cu, Fe, Zn, K, Na, Ar, Cd, Cr, Hg, Ni y Pb se determinó por espectrofotometría de

emisión atómica acoplado inductivamente después de la digestión de la muestra con agua regia, según los procedimientos de la TMECC (2001).

Análisis granulométrico

El análisis se realizó a las ocho pilas de composta, utilizando 100 g de muestra de material seco al aire en dos tamices ordenados por tamaños (4.75 y 1.18 mm) sobre la tamizadora. El proceso duró diez minutos a máxima amplitud y de forma intermitente (Martínez *et al.* 1988). Al cabo de este periodo se pesó el contenido de cada tamiz y del colector de fondo en recipientes tarados, con precisión de 0.01 g.

Análisis microbiológico

Se analizó la presencia de coliformes fecales, *Salmonella spp.* y huevos de helmintos en las muestras compuestas de las ocho compostas, siguiendo los lineamientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana correspondiente (SEMARNAT 2003).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El **cuadro II** presenta algunas características físicas y químicas del bagazo de agave y los biosólidos utilizados en el estudio. Un rasgo importante del bagazo de agave crudo, a diferencia del bagazo de piñas cocidas, es su mayor contenido de humedad. El contenido de humedad en este estudio fue de 80 %; Íñiguez *et al.* (2005, 2006) e Íñiguez y Vaca (2001) reportaron 74, 71 y 74 %, mientras que para bagazos cocidos, Íñiguez *et al.* (2001, 2003, 2011) reportaron valores de 65, 55.1 y 66.2 %. El contenido inicial de humedad del bagazo crudo puede retardar el arranque del compostaje, ya que lo recomendado es entre 40-65 % (Rynk *et al.* 1992); en consecuencia, también puede retardar la adición de biosólidos o lodos, dado que por lo general contienen altos volúmenes de agua. En este caso, el contenido de agua de los biosólidos fue de 97 %. El contenido de agua de otros biosólidos puede ser menor (84.2 %), sobre todo si se pasan por un filtro de bandas antes de incorporarse al compostaje (Íñiguez *et al.* 2006).

El nitrógeno y el carbono son los dos nutrientes microbianos más importantes, puesto que el segundo se utiliza como fuente de crecimiento y energía y el primero para la formación celular y síntesis de proteínas. En el bagazo de agave, la relación C/N fue de 66.9 (**Cuadro II**), que por lo general es muy alta en residuos lignocelulósicos. Para otras muestras de bagazo de agave crudo la relación fue de 95.5 (Íñiguez y Vaca 2001) y 146.1 (Íñiguez *et al.*

CUADRO II. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL BAGAZO DE AGAVE Y BIOSÓLIDOS

Análisis	Bagazo de agave	Biosólidos
pH	4.8	8.51
CE (mS cm ⁻¹)	0.14	4.12
MO (%) ^a	88.60	78.00
Ceniza (%) ^a	11.40	22.00
COT (%) ^a	51.51	45.37
Relación C/N	66.90	6.61
NTK (%) ^a	0.77	6.87
P (%) ^a	0.07	1.88
K (%) ^a	0.26	1.32
Na (%) ^a	0.05	1.92
Ca (%) ^a	3.68	1.98
Mg (%) ^a	0.23	0.59
Cu (ppm) ^a	4.85	143.95
Fe (ppm) ^a	371.00	6010.10
Zn (ppm) ^a	30.49	2219.58
B (ppm) ^a	161.23	264.56
Ar (ppm) ^a	nd ^b	3.45
Cd (ppm) ^a	nd	31.0
Cu (ppm) ^a	nd	106
Cr (ppm) ^a	nd	40.1
Hg (ppm) ^a	nd	<0.500
Ni (ppm) ^a	nd	38.8
Pb (ppm) ^a	nd	632

^a Base seca

^b No determinado

2005). Para muestras de bagazo cocido, Íñiguez *et al.* (2003, 2011) reportaron relaciones de 126, 199.4 y 150.3. Cabe mencionar que Rynk *et al.* (1992) recomendaron una relación entre 25:1 y 30:1 para la rápida estabilización del carbono sin pérdida de nitrógeno. Por otro lado, la baja relación C:N de los biosólidos (6.61, **Cuadro II**) que se añadieron al bagazo, ayudará a mejorar el tiempo de compostaje del bagazo.

Con respecto al pH del bagazo (**Cuadro II**), a diferencia del reportado en este estudio (6.2), Íñiguez *et al.* (2006) reportaron un valor de 5.4 para una muestra de bagazo crudo. Para dos muestras diferentes de bagazo cocido, Íñiguez *et al.* (2011) reportaron un valor de pH de 3.5. Por su parte, el pH de los biosólidos presentó un valor alto (8.5), a diferencia del valor de las vinazas (3.6-3.9) que reportaron Íñiguez y Peraza (2007). Lo anterior se debe a que las vinazas se neutralizaron antes de entrar al digestor anaerobio, para luego tratarse en la laguna con aireación intermitente, de donde se obtuvieron los biosólidos que sirvieron como recurso humectante para el compostaje del bagazo.

El **cuadro I** presenta las condiciones en las que se operó el proceso de compostaje en campo. En

términos generales, los tratamientos 1, 2, 3 y 4 fueron prácticamente los mismos que los tratamientos 5, 6, 7 y 8, ya que sólo cambió el tiempo de volteo. Las pilas de los primeros cuatro tratamientos se removieron cada siete días y las pilas restantes cada catorce. A la pila del tratamiento 1 se añadieron 1560 L de agua; a las pilas de los tratamientos 2, 3 y 4, 1560, 3120 y 4680 L de biosólidos, respectivamente. Por cada ocasión de volteo, a la pila del tratamiento 5 se le añadió la misma cantidad de agua que a la pila del tratamiento 1; a las pilas de los tratamientos 6, 7 y 8, la misma cantidad de biosólidos que a las pilas 2, 3 y 4. Las pilas de todos los tratamientos permanecieron estáticas las dos primeras semanas, por lo que la rutina comenzó conforme a lo programado a la tercera semana. En las semanas 9, 10, 13 y 14 no se hizo el riego correspondiente debido a problemas en el sistema de bombeo; sin embargo, se efectuó el volteo de la manera programada.

Por otro lado, en el transcurso del compostaje se hicieron ajustes en la dosis de agua, como fue el caso de los tratamientos 1 (semana 15) y 5 (semanas 16 y 19), a los que se añadió el doble de agua por encontrarse el material bastante seco. En cambio, en los tratamientos 3 y 4 (semanas 16 y 17) se redujo a la mitad la cantidad de lodos añadidos debido a la alta humedad (Figs. 1 y 2). Al final de 19 semanas, las pilas de los primeros cuatro tratamientos se removieron 18 veces, y las pilas de los otros 4 tratamientos se removieron diez veces con excepción de la pila 5, que se removió once veces. En ambos esquemas de manejo, al final del compostaje las pilas tuvieron una altura aproximada de 55 cm y su color, olor y textura se tornó semejante a tierra de bosque.

Se encontró que la relación de kg de bagazo procesado / L de agua o biosólidos añadidos fue de 1/0.728, 1/0.676, 1/1.04, 1/1.56, 1/0.52, 1/0.364, 1/0.572 y 1/0.858 para las pilas de los tratamientos 1-8, respectivamente. Íñiguez *et al.* (2005), encontraron que durante 242 días de proceso se utilizaron en promedio 0.44 L de vinazas/kg de bagazo en estudios piloto de compostaje de bagazo de agave crudo. En el caso en que se utilizó urea para ajustar la relación C:N a 25:1, se consumieron en promedio 0.828 L de vinazas /kg de bagazo durante 228 días de compostaje (Íñiguez *et al.* 2005), relación casi por mitad a la de este estudio en el tratamiento 4 (1.56 L/kg de bagazo), al que se añadió la mayor cantidad de biosólidos, con la diferencia también que en este caso el proceso tomó 140 días.

Muchas compañías tequileras han intentado resolver el manejo de vinazas por medio del compostaje, esto es, añadir tantas vinazas como sea posible a las

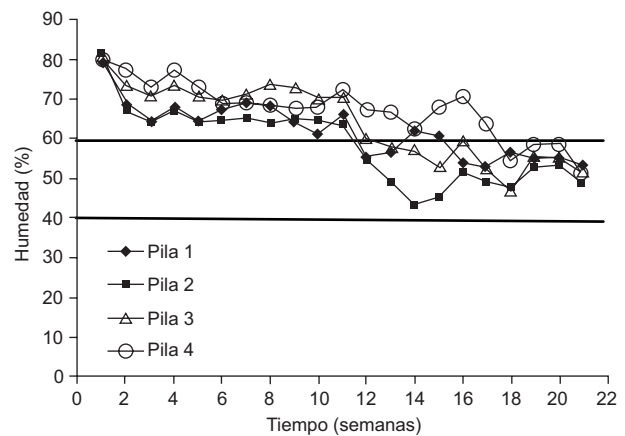


Fig. 1. Cambios de humedad durante el compostaje de bagazo de agave con agua o biosólidos; pilas removidas cada siete días

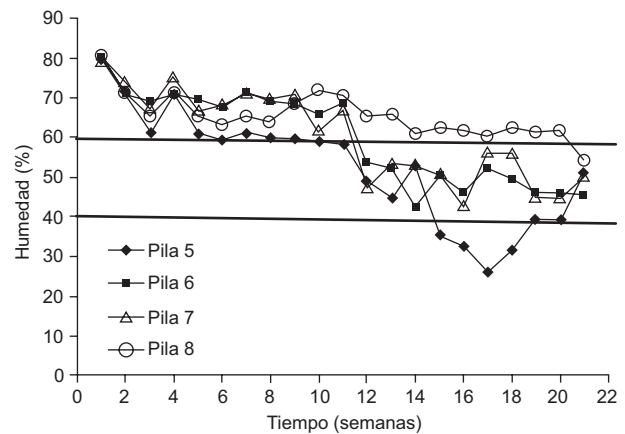


Fig. 2. Cambios de humedad durante el compostaje de bagazo de agave con agua o biosólidos; pilas removidas cada catorce días

pilas de bagazo en proceso. Sin embargo, las estadísticas recientes del Consejo Regulador del Tequila (CRT 2011) revelan un consumo de 998 400 toneladas de cabezas de agave, de las cuales 40 % deriva en bagazo (Cedeño 1995). A su vez, la producción de tequila (261.1 millones de L, 40 % Alc. Vol.) genera 10 L de vinazas por litro de tequila 100° G. L. (Cedeño 1995). Tomando en cuenta este estudio en los que se añaden hasta 1.56 L de vinazas/kg de bagazo, se utilizaría el 59.6 % de vinazas, por lo que 40.4 % requeriría otro tipo de manejo.

Evolución de la humedad

La humedad es esencial para la actividad microbiana, ya que puede afectar la tasa de descomposición. Si la humedad es menor a 40 %, la actividad microbiana se ve reducida; si es mayor a 60 %, el agua llena los espacios porosos requeridos para el

movimiento del aire, por lo que se producen condiciones de anaerobiosis (Epstein 1996, Rynk *et al.* 1992).

Las **figuras 1 y 2** presentan los cambios de humedad durante el compostaje del bagazo de agave con agua o biosólidos en las pilas removidas cada siete o catorce días. A partir de lo anterior se puede notar que en la primera etapa del compostaje (11 semanas), salvo la pila 5, todos los tratamientos (**Figs. 1 y 2**) permanecieron fuera del límite superior de humedad recomendado (60 %) debido a la adición de agua o biosólidos (**Cuadro II**) y el alto contenido de humedad inicial del bagazo (80 %). Sólo la pila 8 permaneció prácticamente fuera de este límite durante todo el compostaje, a pesar de que no fue la que más agua o biosólidos recibió. En las pilas 3 y 4 (relación 1/1.04 y 1/1.56, respectivamente), que recibieron más biosólidos, probablemente influyó la frecuencia de volteo para comportarse de manera diferente.

En la segunda mitad del compostaje, todas las pilas —a excepción de las pilas 4, 5 y 8— alcanzaron los niveles de humedad recomendados, probablemente por la pérdida de la humedad inicial del bagazo y el equilibrio entre la ganada por la adición de agua o biosólidos y la perdida por evaporación. La pila 4 no se ajustó al límite superior de humedad, probablemente porque recibió la mayor cantidad de biosólidos (relación 1/1.56).

Inicialmente se tenía programado añadir el mismo volumen de agua y/o biosólidos a las pilas 5 y 6, pero el registro de menor porcentaje de humedad en la pila 5 que en la 6, propició que se añadiera más humectante a la pila 5 (1/0.52 vs 1/0.364). Este fenómeno se debió probablemente a que la primera se removió una vez más que la segunda, lo que facilitó la pérdida de agua y al hecho de que el bagazo con biosólidos haya retenido más la humedad que el bagazo sin biosólidos de la pila 5. Como se mencionó anteriormente, si el contenido de agua es superior a 60 %, el movimiento del aire entre los espacios porosos se dificulta, lo que inhibe la respiración aerobia de los microorganismos y con ello el aumento de temperatura. Este fenómeno puede verse claramente en la **figura 1** en la última etapa del compostaje. Por ejemplo, la pila 4 recibió la mayor proporción de humectante (1/1.56) y registró la menor temperatura, seguida por las pilas 3, 2 y 1, que recibieron una menor proporción (1/1.04, 1/0.728 y 1/0.676, respectivamente).

Evolución de la temperatura

Las **figuras 3 y 4** presentan la evolución de temperatura registrada en las ocho pilas de compostaje de acuerdo con la tendencia esperada; esto es, un incremento debido a la hidrólisis rápida de la ma-

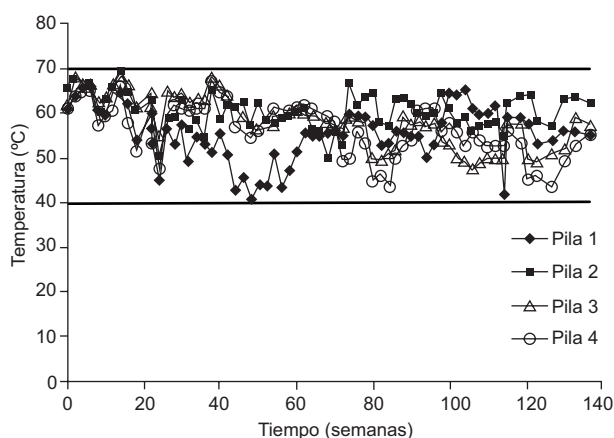


Fig. 3. Cambios de temperatura durante el compostaje de bagazo de agave y biosólidos; pilas removidas cada siete días

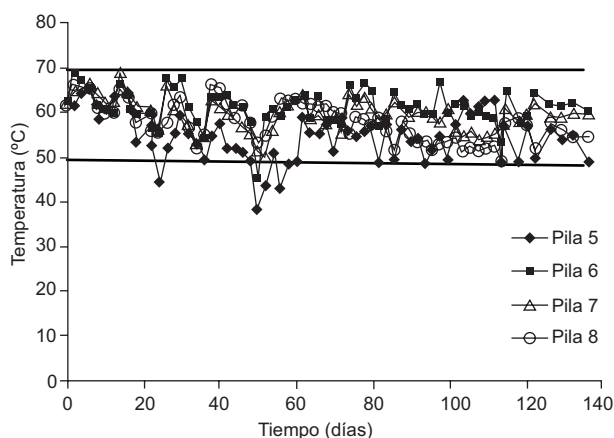


Fig. 4. Cambios de temperatura durante el compostaje de bagazo de agave y biosólidos; pilas removidas cada catorce días

teria orgánica disponible. La temperatura inicial de las ocho pilas fue de alrededor de 60 °C, debido a que el bagazo aún conservaba temperatura al llegar a campo debido al proceso en caliente de extracción de los azúcares en la fábrica de tequila. En las figuras se muestra que las pilas de los tratamientos 1 y 5, que recibieron agua de la llave como humectante, registraron los valores más bajos de temperatura (40 y 38 °C para los tratamientos 1 y 5 respectivamente). El tiempo de estos registros correspondió a las semanas 9 y 10, durante las cuales no se regaron las pilas debido a problemas de bombeo; sin embargo, este fenómeno no se presentó en las pilas de los otros tratamientos, por lo que los componentes de los biosólidos pudieron haber contribuido al mantenimiento de temperaturas más altas.

Se ha presentado algún tipo de debate sobre la temperatura óptima para la descomposición de la materia orgánica. La razón de esta controversia es que distintos materiales se descomponen a diferentes

temperaturas. Wiley y Pierce (1957) indicaron que al procesar una mezcla de basura y desechos, la producción máxima de CO_2 ocurrió entre 60 y 65 °C. Schultz (1961) reportó que la descomposición máxima de desechos sólidos municipales ocurrió entre 65 y 70 °C. La mayoría de los expertos sugiere mantener la temperatura entre 44 y 65 °C (Rynk *et al.* 1992). En este caso, la descomposición de la materia orgánica del bagazo ocurrió entre 45 y 70 °C, rango destinado para el metabolismo termofílico.

Evolución del pH

Las **figuras 5 y 6** presentan la evolución del pH en muestras de los ocho tratamientos, cuyo pH promedio inicial fue de 4.8 y final de 9. En ambas figuras se muestra que a la segunda semana de iniciar el proceso de compostaje, el valor promedio de pH fue superior a 7 en todos los tratamientos, excepto para el tratamiento 4, cuyo valor promedio fue de 6.4. A partir de la semana 8 todos los tratamientos

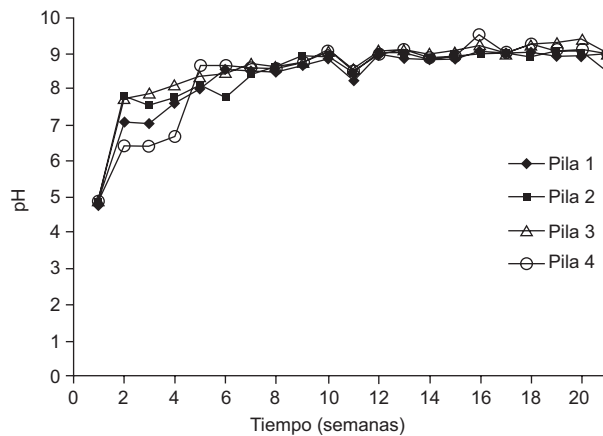


Fig. 5. Cambios de pH durante el compostaje de bagazo de agave y biosólidos; pilas removidas cada siete días

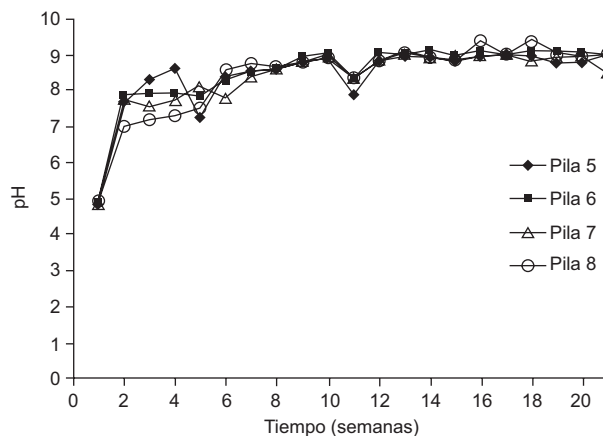


Fig. 6. Cambios de pH durante el compostaje de bagazo de agave y biosólidos; pilas removidas cada catorce días

presentaron un comportamiento similar hasta llegar a un pH de 9, que se mantuvo hasta finalizar el proceso de 140 días.

Cabe señalar que en las pilas que recibieron mayor volumen de humectante (tratamientos 3 y 4), el ascenso del pH fue menos acelerado que en el resto de los tratamientos. Así, en el tratamiento 4 probablemente se presentó una etapa de producción de ácidos orgánicos por falta de oxigenación debido al mayor porcentaje de humedad (**Fig. 1**). La formación microbiológica de ácidos y su descomposición depende del nivel de oxígeno y la temperatura. A mayores concentraciones de oxígeno, menores concentraciones de ácidos, con un aumento más rápido de pH (Beck-Friis *et al.* 2001). Íñiguez *et al.* (2011) reportaron que en el compostaje de dos fuentes diferentes de bagazo de agave, en aquel con una densidad de campo 123.9 kg/m^3 se presentó una etapa de acidificación, a diferencia del bagazo con una densidad de 90.6 kg/m^3 , en el que no se presentó tal etapa probablemente debido a problemas de oxigenación por la diferencia de densidades.

Evolución de la conductividad

La **figura 7** muestra los valores promedio de la conductividad eléctrica alcanzados por los tratamientos 1-4 durante el periodo de compostaje. En este grupo, la conductividad eléctrica osciló entre 0.14 y 2.28 mS/cm . En la figura se puede notar que la diferencia en conductividad entre la pila 1 y las pilas 2-4 se empezó a notar hasta el día 35 de compostaje debido a la adición de biosólidos, ya que éstos tenían una conductividad de 4.12 mS/cm (**Cuadro II**). Esta diferencia se amplió conforme pasaba el tiempo y se añadían más biosólidos a las pilas de los tratamientos 2-4. La

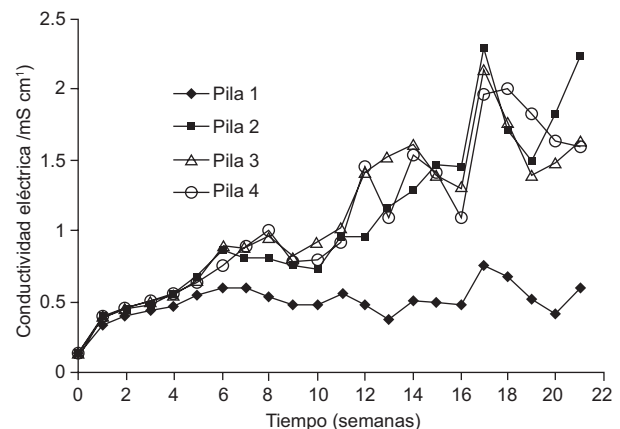


Fig. 7. Cambios de conductividad durante el compostaje de bagazo de agave y biosólidos; pilas removidas cada siete días

conductividad final de las compostas de estos cuatro tratamientos fue de 0.68, 2.28, 2.15 y 1.99 mS/cm, respectivamente.

La **figura 8** muestra los valores promedio de la conductividad eléctrica alcanzados en muestras de las pilas de los tratamientos 5-8, mismos que evolucionaron de 0.14 a 2.07 mS/cm. En este segundo grupo de tratamientos se observó un comportamiento similar al grupo anterior, en el que la conductividad incrementó en las muestras conforme se añadían biosólidos a las pilas. De esta manera, la conductividad final de la pila 5 –a la que no se le añadieron biosólidos– fue de 0.73 mS/cm y en las pilas 6, 7 y 8 –que sí recibieron biosólidos– la conductividad de las muestras fue de 1.84, 2.07 y 1.61 mS/cm, respectivamente. El aumento de la conductividad de materiales en compostaje es normal debido a la mineralización de la materia orgánica (Íñiguez *et al.* 2006, Moreno y Moral 2007), a no ser que se presente lixiviación en el proceso por exceso de agua.

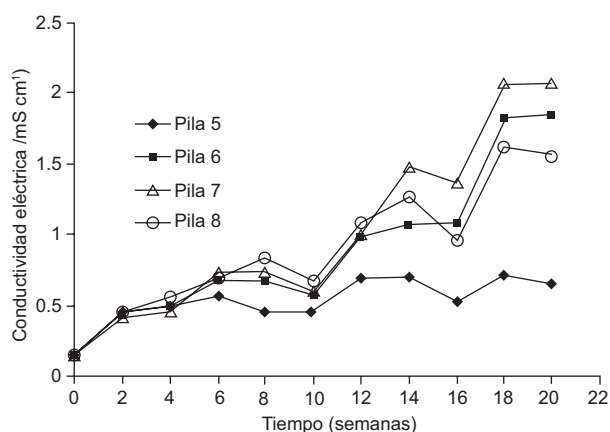


Fig. 8. Cambios de conductividad durante el compostaje de bagazo de agave y biosólidos; pilas removidas cada catorce días

Análisis granulométrico

Las **figuras 9 y 10** muestran el análisis granulométrico realizado a las compostas de los ocho tratamientos. Como puede observarse, el movimiento de las pilas 1 y 5 en diferente número de ocasiones (18 veces la pila 1 y 11 la pila 5, **Cuadro II**) prácticamente no influyó en el tamaño de las partículas, ya que la compostadora ayuda mecánicamente a fraccionar las partículas o “terrones”. El porcentaje de partículas recuperadas de la pila 1 en las mallas de abertura 4.75 y 1.18 mm fue de 69.3 y 28 %, y de la pila 5 fue de 69.7 y 26.3 %, respectivamente.

Por otro lado, la adición de biosólidos y el número de volteos influyó en el tamaño de partículas

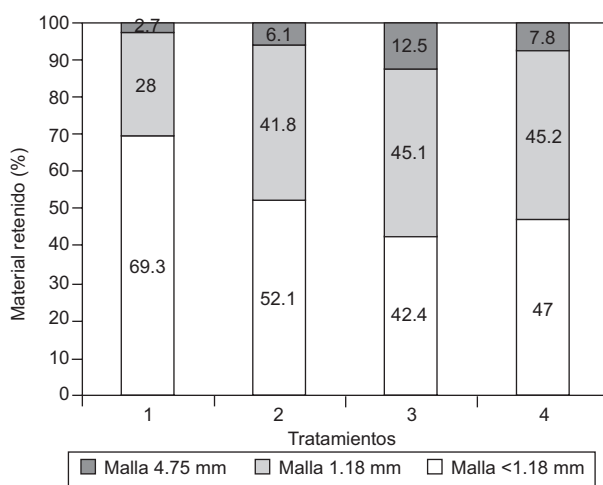


Fig. 9. Clasificación por tamaño de partículas (según la abertura de la malla en mm) de las compostas de los tratamientos 1-4

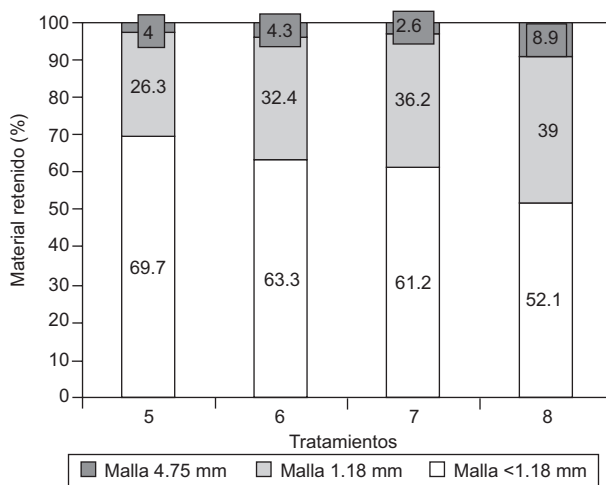


Fig. 10. Clasificación por tamaño de partículas (según la abertura de la malla en mm) de las compostas de los tratamientos 5-8

grandes. Las pilas 2, 3 y 4 se voltearon 18 veces, y la recuperación en la malla de abertura de 4.75 mm fue de 52.1, 42.4 y 47 %, respectivamente, mientras que las pilas 6, 7 y 8 se voltearon diez veces y la recuperación fue de 63.3, 61.2 y 52.1 %, respectivamente. En lo que respecta al porcentaje de finos recuperados (material que pasó la malla de abertura 1.18 mm), con excepción de las pilas 4 y 8, también puede verse la influencia del número de volteos, ya que se recuperó 6.1, 12.5 y 7.8 % de las pilas 2, 3 y 4, y de las pilas 6, 7 y 8, 4.3, 2.6 y 8.9 %, respectivamente.

Análisis químico

El **cuadro III** presenta algunas características físicas y químicas de las compostas de los ocho tra-

CUADRO III. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS COMPOSTAS

Análisis	Pila 1	Pila 2	Pila 3	Pila 4	Pila 5	Pila 6	Pila 7	Pila 8
MO (%) ^a	44.8	42.5	35.8	50.1	50	41.7	40.7	51.5
Cenizas (%) ^a	55.2	57.5	64.2	49.9	50	58.3	59.3	48.5
COT (%) ^a	26.1	24.4	20.8	29.1	29.1	24.2	23.7	29.9
Relación C:N	15	13.8	12.2	15.7	17.1	12.5	12.2	17.6
NTK (%) ^a	1.74	1.77	1.78	1.85	1.7	1.93	1.94	1.95
P (%) ^a	0.15	0.23	0.33	0.4	0.16	0.25	0.32	0.34
K (%) ^a	0.2	0.34	0.4	0.42	0.26	0.3	0.35	0.38
Na (%) ^a	0.28	0.29	0.31	0.32	0.27	0.31	0.25	0.33
Ca (%) ^a	5.7	6.02	5.5	6.1	5.55	5.42	6.1	5.57
Mg (%) ^a	0.58	0.5375	0.47	0.43	0.39	0.515	0.49	0.43
Cu (ppm) ^a	16.8	18.825	21.015	14.67	12.2375	27.2275	21.8475	11.1175
Fe (ppm) ^a	7895.45	9705.15	10360.25	6332.2	6204.275	6990.475	8220.175	6244.225
B (ppm) ^a	214.96	222.195	216.8575	184.08	247.7875	230.85	236.485	217.4675
Ar (ppm) ^a	<0.3	<0.3	<0.361	<0.321	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
Cd (ppm) ^a	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Cr (ppm) ^a	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25
Hg (ppm) ^a	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Ni (ppm) ^a	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Pb (ppm) ^a	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Zn (ppm) ^a	194	192	262	147	89.1	285	213	70.7

^a Base seca

tamientos. Mayer y Hofer (1987) propusieron una relación C:N menor a 20 como indicador de madurez de compostas; en este caso, los valores estuvieron dentro de dicha recomendación. El grado de mineralización del bagazo de agave durante el compostaje puede apreciarse en el contenido de cenizas, ya que el contenido inicial de cenizas de 11.4 % terminó, en el peor de los casos, en 64.2 % en el tratamiento 3. La adición de biosólidos al bagazo de agave durante el compostaje influyó en el contenido total de P y K de las compostas, al aumentar de 0.15 y 0.2 % a 0.4 y 0.42 %, respectivamente, en el tratamiento 4, el cual recibió el mayor volumen de biosólidos (relación 1/1.56, **Cuadro II**). En cuanto al contenido de nitrógeno, éste fue mayor para las pilas que recibieron mayor volumen de biosólidos (pilas 4 y 8) tanto en el bloque de las pilas con 18 volteos como en el bloque de 10.

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana (SEMARNAT 2003) se puede disponer para la agricultura de cualquiera de las ocho compostas obtenidas en lo que respecta al contenido de metales pesados, dado que ninguna de ellas rebasa los límites máximos permisibles (**Cuadro III**; límites máximos permisibles para Ar, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni y Zn, 41, 39, 1200, 1500, 300, 17, 420 y 2800 ppm respectivamente).

Análisis microbiológico

El **cuadro IV** presenta el contenido microbiológico

en muestras de compostas de las ocho pilas, así como de los biosólidos utilizados en el compostaje. El contenido de coliformes fecales, huevos de helmintos y *Salmonella spp.* en las muestras analizadas se encuentra por debajo de los límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos, por lo que las compostas podrían ser utilizadas en el mejoramiento de suelos sin problemas de salud ambiental. Inclusive los mismos biosólidos pueden, en su caso, ser utilizados en suelos. Los resultados se deben al origen de los materiales: los biosólidos se produjeron en una planta de tratamiento de vinazas en la que no se mezclaron aguas residuales de otro tipo y el bagazo de agave es un residuo industrial que no se mezcla con residuos municipales.

CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos en este trabajo, se encontró que se puede integrar el manejo de biosólidos de una planta de tratamiento aerobio de vinazas al sistema de compostaje de bagazo en la industria tequilera, considerando una relación máxima de kg bagazo/L de biosólidos de 1/1.56 para 19 semanas de proceso, moviendo y humedeciendo las pilas cada siete días. Lo anterior contribuye al uso racional de agua limpia, a la vez que se aumenta el contenido de N, P y K en las compostas de bagazo de agave.

CUADRO IV. Contenido microbiológico en las compostas y biosólidos

Tratamientos	Coliformes fecales NMP ^a /g ^b	<i>Salmonella</i> spp NMP/g	Huevos de helmintos/g
1	<3	<3	<1.4
2	<3	<3	<1.1
3	<3	<3	<1.2
4	<3	<3	<1.5
5	<3	<3	<1.7
6	<3	<3	<1.3
7	<3	<3	<1
8	<3	<3	<1.7
Biosólidos	680	<3	<1
Indicador (SEMARNAT 2003)	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10

^a Número más probable^b Base seca

En su caso también se puede disponer del 59.6 % de vinazas para procesar en compostaje el bagazo de agave, quedando el 40.4 % de vinazas para otra forma de manejo.

REFERENCIAS

- AOAC (1984). *Official methods of analysis*. 14^a ed. Association of Official Analytical Chemist, Washington, DC. 952 pp.
- Beck-Friis B., Smars S., Jönsson H. y Kirchmann H. (2001). SE-structures and environment: gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes. *J. Agr. Eng. Res.* 78, 423-430.
- Cedeño C.M. (1995). Tequila production. *Crit. Rev. Biotechnol.* 15, 1-11.
- CRT (2011). Consejo Regulador del Tequila [en línea]. <http://www.crt.org.mx>. 15/10/2012.
- CWMI (1996). Monitoring compost pH. Cornell Waste Management Institute [en línea]. <http://compost.css.cornell.edu/monitor/monitorph.html>. 18/11/2012.
- Epstein E. (1996). *The science of composting*. CRC Press. Boca Raton, EUA, 487 pp.
- Golueke C.G. (1977). Biological processing: composting and hydrolysis. En: *Handbook of solid waste management* (D.G. Wilson, Ed.). Van Nostrand Reinhold, Nueva York, pp. 197-225.
- Íñiguez G., Martínez G.A., Flores P.A. y Virgen G. (2011). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Parte 9. Monitoreo de la evolución del compostaje de dos fuentes distintas de bagazo de agave para la obtención de un sustrato para jitomate. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27, 47-59.
- Íñiguez G. y Peraza F. (2007). Reduction of solids and organic load concentrations in tequila vinasses using a polyacrylamide (PAM) polymer flocculant. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 23, 17-24.
- Íñiguez G., Parra J. y Velasco P.A. (2006). Utilización de subproductos de la industria tequilera. Evolución de algunos constituyentes de la mezcla de biosólidos-bagazo de agave durante el compostaje. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 22, 83-89.
- 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. Ambie.* 21, 37-50.
- 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. Ambie.* 19, 83-91.
- 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. Ambie.* 17, 109-116.
- Íñiguez G., Lange S. E. y Rowell R. M. (2001). Utilization of by products the tequila industry. Part 1. agave bagasse as a raw material for animal feeding and fiberboard production. *Bioresource Technol.* 77, 25-32.
- Martínez F.X., Bures S. y Mas X. (1988). Variación de las propiedades de cinco sustratos a base de turba en relación con los métodos de análisis utilizados. Tercer Congreso de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas, Valencia.
- Mayer M. y Hofer H. (1987). *New trends in waste recycling. Technical Note*. Buehler Brothers, St. Gallen, Suiza.
- Moreno J. y Moral R. (2007). *Compostaje*. Mundi Prensa, Madrid, España, 569 pp..

- SEMARNAT (2003). NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación. 15 de Agosto de 2003.
- Rynk R., van de Kamp M., Willson G. B., Singley M. E., Richard T. L., Kolega J. L., Gouin F. R., Laliberty L., Kay D., Murphy D. W., Hoitink H. A. J., and Briton W. F. (1992). *On-farm composting handbook*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service. Ithaca, NY.
- Schultz K.L. (1961). *Aerobic decomposition of organic waste materials*. National Institutes of Health, Washington, DC.
- TMECC (2001). Test methods for the examination of composting and compost [en línea]. <http://tmecc.org/tmecc> 18/11/2012.
- Wiley J.S. y Pierce G.W. (1957). A preliminary study of high-rate composting. *T. Am. Soc. Civ. Eng.* 122, 1009-1030.