

OBTENCIÓN DE UN COMBUSTIBLE ALTERNO A PARTIR DEL BIOSECADO DE RESIDUOS HORTOFRUTÍCOLAS

Fabián ROBLES MARTÍNEZ^{1,3*}, Óscar GERARDO NIETO¹, Ana Belem PIÑA GUZMÁN¹,
Laura MONTIEL FRAUSTO¹, Francisco J. COLOMER MENDOZA^{2,3} y Carlos OROZCO ÁLVAREZ¹

¹ Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto s/n, Barrio La Laguna, Col. Ticomán, México, D.F., C.P. 07340.

² Departamento Ingeniería Mecánica y Construcción. Universidad Jaume I. Castellón, Av. Vicent Sos Baynat s/n, 12071 Castellón, España.

³ Redisa (Red de Ingeniería Sanitaria y Ambiental)

*Autor responsable; froblesm@ipn.mx

(Recibido agosto 2011, aceptado marzo 2013)

Palabras clave: degradación aeróbica, recuperación de energía, calor de combustión, fase termofílica

RESUMEN

El biosecado es un proceso biológico que permite la disminución de la humedad en los residuos. Durante el biosecado, la energía liberada por la actividad microbiana aumenta la temperatura de la masa de residuos, lo que acelera la pérdida de agua. En el presente trabajo se monitorearon, durante 40 días, cuatro pilas con un peso fresco de 75 kg; cada pila fue preparada con una mezcla de residuos hortofrutícolas. Tres de las pilas se colocaron al interior de un invernadero para mejorar la deshidratación de los materiales y una cuarta pila fue colocada fuera del invernadero. Durante el biosecado se registraron las condiciones ambientales como temperatura, humedad relativa y radiación solar, al interior y fuera del invernadero y para cada pila se cuantificó la pérdida de humedad, peso y volumen de los residuos; así mismo, al inicio y al final del proceso, se determinó el contenido de nitrógeno, materia orgánica y calor de combustión. La temperatura en las pilas aumentó desde el primer día del biosecado, alcanzando la fase termofílica ($>40^{\circ}\text{C}$) al segundo día, la cual se mantuvo por cinco días más. Posteriormente se observó una disminución sostenida de temperatura, hasta igualarse a la del ambiente (28°C) a partir del día siete. Después de 28 días se logró una reducción de masa de alrededor de 80 %, el volumen disminuyó alrededor de 50 % y la humedad se redujo en un 90 % con respecto a los valores iniciales. Además, el contenido de materia orgánica y nitrógeno también disminuyeron ligeramente. El calor de combustión de los residuos en todas las pilas aumentó hasta 200 %, alcanzando un valor promedio de 18 000 kJ/kg, lo que es comparable con el valor calórico del carbón vegetal. Por lo tanto, se sugiere que estos residuos podrían ser utilizados como combustible alternativo en calderas u hornos.

Key words: aerobic degradation, energy recovery, combustion heat, termophilic phase

ABSTRACT

Biodrying is a biological process that aims to decrease the moisture in the waste. During biodrying, the energy released by microbial activity increases the temperature of the waste

mass, which promotes evaporation of water. In the present study, four windrows with an approximate weight of 75 kg were monitored for 40 days; each unit was prepared with a mixture of organic waste. Three windrows were placed inside a greenhouse to accelerate the dehydration of materials and the fourth one was placed outside the greenhouse. During the experiments, environmental conditions were recorded (temperature, relative humidity and solar radiation) inside and outside the greenhouse, and the reduction in moisture, weight and volume of waste was quantified from each windrow. At the beginning and the end of the process the nitrogen content, organic matter and combustion heat were determined. The temperature in the windrows increased from the first day and the thermophilic phase was reached at the second day and maintained for a period of seven days, then the temperature decreased from day seven and the temperature was similar to environment temperature. After 28 days, yielded a mass reduction of about 80 %, volume decreased about 50 % humidity under 90 % compared to the initial values. In addition, nitrogen content and organic matter were lightly decreased. The combustion heat of waste at the end of biodrying process in all windrows increased approximately 200 %, reaching an average value of 18 000 kJ/kg, which is comparable to the caloric value of charcoal. Therefore it could be suggested that these bio-dried residues could be used as an alternative fuel in boilers or furnaces.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional aunado a los hábitos de consumo de la sociedad actual son las principales causas del incremento desmesurado de residuos. Uno de los principales problemas a enfrentarse con los residuos sólidos de manejo especial, es el impacto negativo que se puede presentar si estos son mal manejados. Para ejemplificar la problemática de este tipo de residuos podemos citar el caso de los residuos de las centrales de abasto.

En México, hoy en día se desechan varios miles de toneladas de alimentos en las más de 60 centrales de abasto del país. El caso más crítico por sus dimensiones es la Central de Abasto de la Ciudad de México (CEDA), donde se generan 585 toneladas de residuos por día (SMA 2010); de esta cantidad, se estima que el 80 % corresponde a productos hortofrutícolas y su generación se concentra básicamente en los mercados de frutas y legumbres, y de flores y hortalizas (Robles-Martínez *et al.* 2003). Dado lo anterior, es necesario impulsar el tratamiento y aprovechamiento de los residuos hortofrutícolas para disminuir la cantidad de materia orgánica depositada en los sitios de disposición final en México y al mismo tiempo reducir la generación de biogás y lixiviados que ocurre durante su degradación anaerobia (Robles-Martínez *et al.* 2010).

Como solución a este problema, se han propuesto diversos tratamientos; uno de estos es el biosecado, que es una variante del proceso de degradación aerobia aplicado en las plantas de tratamiento mecánico biológico (TMB), mediante el cual se remueve la humedad de los residuos aprovechando, por un lado,

el calor metabólico generado por la actividad microbiana y por otro lado, la circulación de aire inyectado mecánicamente a través la matriz de residuos (Dufour 2006, Velis *et al.* 2009).

El objetivo del biosecado es el aprovechamiento del calor generado en las reacciones exotérmicas microbianas para la eliminación del agua libre en los residuos, con el consumo más bajo de sólidos volátiles, a fin de conservar el poder calorífico (Adani *et al.* 2002). Así, se puede obtener un material parcialmente seco y estable que sea fácilmente almacenable y manejable y que pueda ser considerado como un combustible derivado de residuos (CDR) (Rada y Andreottola 2012), con un contenido calórico comparable al del carbón vegetal (Wiemer y Kern 1996).

Desde el punto de vista ambiental, se deben resaltar dos aspectos relevantes: el primero considera la sustitución de combustibles fósiles por CDR (que es parcialmente una biomasa) y el otro considera la reducción del impacto de rellenos sanitarios, debido a que la fracción putrescible de los residuos es explotada para llevar a cabo el biosecado y no es enviada a los sitios de disposición final.

El uso de biomasa para la producción de CDR resulta ser de gran relevancia, sobre todo para los países en vías de desarrollo, cuyas políticas de crecimiento deberían guiarse por el principio de desarrollo sustentable y considerar seriamente la protección al ambiente (Adani *et al.* 2002). En virtud de que el producto obtenido del biosecado de residuos puede servir como combustible, puede aseverarse que la obtención de CDR contribuye a la conservación de los recursos naturales, disminuye la emisión de

metano y dióxido de carbono, entre otras ventajas ambientales. La reducción de gases emitidos de los procesos de degradación aerobia de residuos sólidos no sólo ayuda a conservar el estado natural de los ecosistemas, sino que también contribuye al incremento de la calidad de vida del ser humano.

En la literatura se encuentran múltiples trabajos sobre biosecado, en los que se ha estudiado la influencia de parámetros como la temperatura, flujo de aire, contenido de materia orgánica y humedad de los residuos durante el proceso aerobio de degradación biológica, cuyo análisis ha permitido proponer criterios básicos para el diseño y optimización del proceso de biosecado en reactores (Rada y Andreottola 2012). Sin embargo, la mayoría de trabajos se ha enfocado a estudiar el biosecado de residuos sólidos urbanos (RSU) en reactores, mientras que el biosecado de residuos agroindustriales o agrícolas no ha sido prácticamente estudiado hasta ahora. El biosecado en pilas de residuos agroindustriales o agrícolas podría representar una buena opción de tratamiento, en el caso particular donde se busque reducir de manera significativa el volumen y masa de los residuos para ahorrar costos en el transporte de estos. El mejor ejemplo de esta situación son los residuos de grandes mercados y la central de abastos de la Ciudad de México, donde el biosecado podría sustituir al composteo, dada la gran diferencia de tiempo en ambos procesos.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el biosecado de residuos hotofrutícolas en pilas con aireación pasiva. El proceso se llevó a cabo dentro y fuera de una estructura tipo invernadero para determinar si el aumento de la temperatura atmosférica en el invernadero puede acelerar la deshidratación de los materiales.

METODOLOGÍA

Formación de las pilas de biosecado

Se prepararon cuatro pilas que fueron colocadas sobre tarimas de madera, previamente acondicionadas para evitar la pérdida de material fino y favorecer el libre paso de aire a través de ellas. Este acondicionamiento se hizo pintándolas con pintura epóxica y recubriéndolas con malla plástica tipo mosquitero. Las pilas estuvieron compuestas de cáscara de naranja (54.9 %), madera triturada (12.0 %), mezcla de frutas (16.7 %) (papaya, piña, sandía, melón, jitomate y mango) y verduras (16.4 %) (nopal, lechuga, brócoli, rábano, apio y cebolla). Las pilas se formaron a partir de una sola mezcla de residuos, para asegurar que la composición fuera la misma en cada pila.

Con el fin de evaluar y comparar comportamiento del biosecado dentro y fuera del invernadero, las pilas 1, 2 y 3 estuvieron dentro del invernadero, mientras que la pila testigo fue colocada fuera de éste (**Cuadro I**).

CUADRO I. CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS AL INICIO DEL BIOSECADO

Pila	Composición	Peso fresco (kg)	Peso volumétrico (kg/m ³)	Invernadero
Testigo	Cáscara de naranjas, frutas, verduras y madera triturada	72.52	336.60	no
1	Cáscara de naranjas, frutas, verduras y madera triturada	74.30	362.61	sí
2	Cáscara de naranjas, frutas, verduras y madera triturada	71.25	371.50	sí
3	Cáscara de naranjas, frutas, verduras y madera triturada	76.03	356.26	sí

Monitoreo y análisis del proceso

Los diferentes parámetros ambientales involucrados en el proceso de biosecado fueron monitoreados a diferentes horas del día: 8:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00 y 18:00 horas. El monitoreo de parámetros ambientales contempló los siguientes registros:

-Registro de temperatura ambiente y humedad relativa del aire. Estos datos se registraron dentro y fuera del invernadero, con el equipo Thermo Hygrometer (modelo HI 9065; Hanna instruments, Italia).

-Registro de radiación solar. El registro de estos valores dentro y fuera del invernadero se realizó con el medidor de radiación solar Solarc (modelo MacSolar, Alemania).

Por otro lado, las evaluaciones fisicoquímicas en el material biosecado a lo largo de todo el proceso, constaron de los siguientes registros:

-Registro de la temperatura de las pilas. La medición de la temperatura se realizó a diferentes horas del día (8:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00 y 18:00 horas) y fue tomada en el centro y superficie de cada pila empleando un termómetro bimetálico.

-Registro del peso de las pilas. Se utilizaron dos bolsas de malla plástica por cada pila de residuos. En cada bolsa se colocó una muestra de los residuos (2 kg) y se introdujo al centro de la pila para que estuviera sometida a las mismas condiciones y así representar la pérdida de peso de la pila entera, esto se hizo pesando la muestra y la bolsa de malla al principio del experimento y después cada tres días hasta el final del mismo.

-Volumen y peso volumétrico. La medición del volumen sólo se realizó al principio y al final del experimento para cada pila de residuos y con ayuda de un recipiente de plástico de 50 litros. Esta determinación se hizo al mismo tiempo que se cuantificó el peso volumétrico de cada pila con base en la norma NMX-AA-019-1985 (SCFI 1985), es decir, se pesó un recipiente de volumen conocido, posteriormente se llenó el recipiente hasta el tope con los residuos homogeneizados. Se golpeó el recipiente contra el suelo tres veces dejándolo caer desde una altura de 10 cm. Se agregaron nuevamente residuos hasta el tope, teniendo cuidado de no presionar al colocarlos en el recipiente y se pesó el recipiente con los residuos.

-Determinación de la humedad y materia orgánica de las pilas. Estas evaluaciones se realizaron cada cuatro días; el análisis de humedad por el método gravimétrico y el de materia orgánica por el método de cenizas.

-Determinación de nitrógeno total. La determinación se llevó a cabo cada seis días por el método de Kjeldahl.

-Determinación del calor de combustión. La determinación se realizó al inicio y al final del proceso

usando una bomba calorimétrica marca Parr, EU (modelo 1341EB).

RESULTADOS

Humedad relativa del aire y radiación solar

La humedad relativa del aire es muy importante en los procesos de secado y para el caso del presente estudio, por tratarse de ensayos realizados bajo condiciones ambientales, este no fue un parámetro a controlar. Lo anterior explica las amplias variaciones de humedad relativa durante el día, tanto dentro como fuera del invernadero (**Fig. 1**). De manera general, tanto al exterior como al interior del invernadero, en las primeras horas del día (8:00 horas) la humedad relativa se ubicó alrededor del 98 % y disminuyó a medida que el tiempo transcurrió, alcanzando valores de alrededor de 40 % al final del día (18:00 horas).

Los experimentos se realizaron de la segunda semana de enero a la segunda semana de febrero, por tal razón la radiación solar incidió en las pilas de residuos durante un período de 10 horas aproximadamente (de las 8:00 a las 18:00 horas), siendo entre las 12:00 y 14:00 horas cuando la radiación fue más intensa, alcanzando valores de hasta 1150 W/m² fuera del invernadero y de 600 W/m² dentro de éste, en los días más soleados (**Fig. 2**).

Temperatura

Como era de esperarse, la radiación solar influyó directamente en una elevación de la temperatura

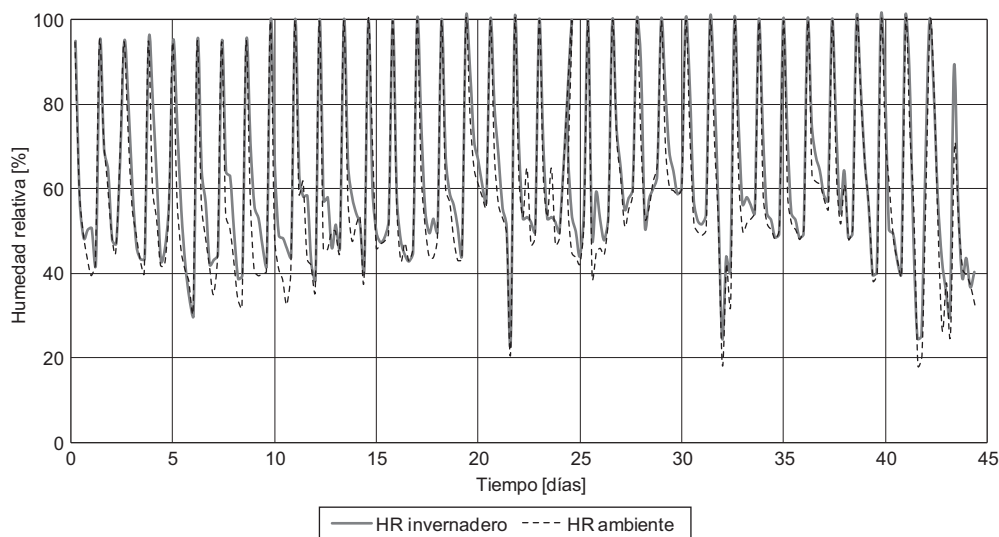


Fig. 1. Humedad relativa durante el biosecado

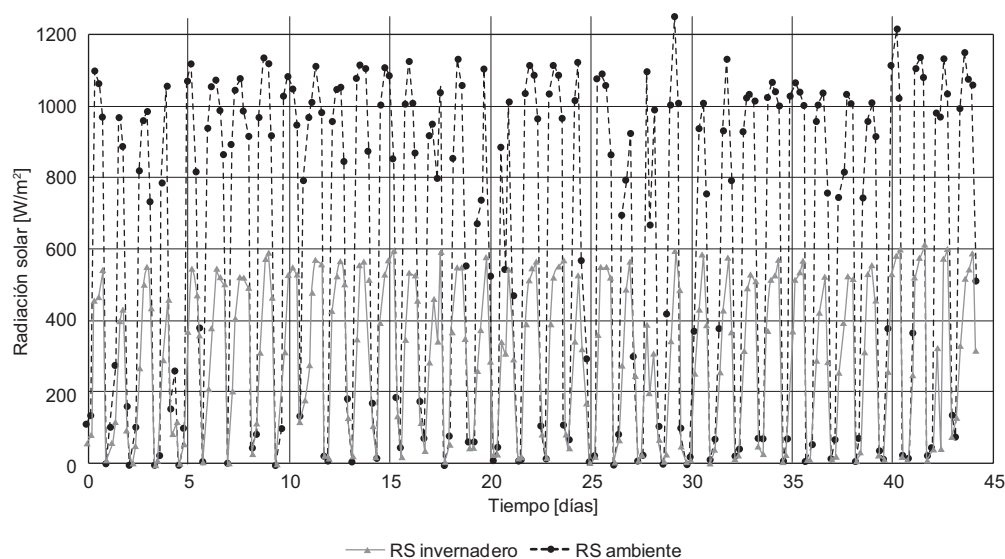


Fig. 2. Radiación solar durante el biosecado

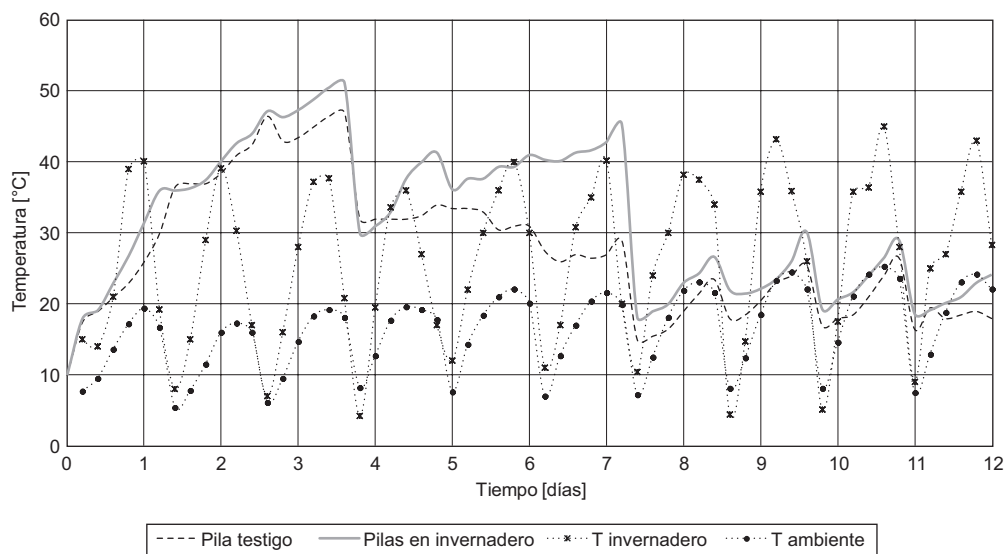


Fig. 3. Temperatura de las pilas durante el biosecado del día 1 al día 12

dentro del invernadero, la cual fue en promedio 16 °C superior a la temperatura externa en las horas de radiación intensa (Figs. 1 y 2).

En la figura 3 se muestran los valores de temperatura de las pilas de residuos durante los primeros 12 días de biosecado. Al inicio del experimento, las pilas se encontraban a temperatura ambiente (10 °C), pero su temperatura se fue elevando paulatinamente hasta llegar a 36 °C al final del primer día de biosecado; mientras que en este mismo lapso de tiempo, la temperatura ambiente alcanzó los 19 °C y la temperatura al interior del invernadero se incrementó hasta 40 °C.

Para el segundo día, la temperatura de las pilas continuó incrementándose y alcanzó valores de 40 °C, en tanto que la mayor temperatura al exterior fue de 16 °C y al interior del invernadero la temperatura alcanzó los 39 °C.

En el tercer día tanto las pilas al interior del invernadero como aquella ubicada al exterior alcanzaron 47 °C. La temperatura ambiental mínima fue de 6 °C y las máximas al exterior y dentro del invernadero fueron de 19 y 38 °C, respectivamente.

El cuarto día se realizó un primer volteo (cuando la temperatura de las pilas al interior del invernadero se encontraba en 51 °C) y se agregó agua a las

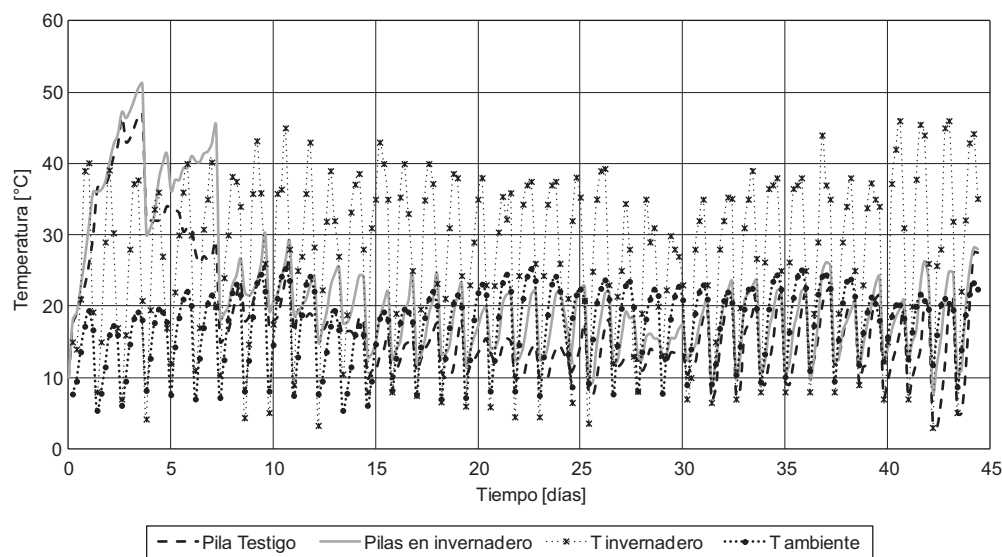


Fig. 4. Temperatura de las pilas durante el biosecado: 1 a 45 días

pilas para su rehumidificación, lo cual condujo a un descenso de más de 20 °C en las pilas al interior del invernadero, mientras que la temperatura de la pila testigo descendió alrededor de 15 °C. Posterior a este descenso, nuevamente se observó un incremento en la temperatura de las pilas al interior del invernadero, llegando a alcanzar nuevamente los 45 °C el día siete, mientras que la pila testigo sólo logró un incremento de tres grados al día posterior a la rehumidificación y después de esto se presentó un descenso sostenido de temperatura hasta alcanzar 30 °C para el día siete.

El día siete las pilas se voltearon nuevamente, por lo que su temperatura descendió hasta los 18 °C en las pilas ubicadas al interior del invernadero y hasta 15 °C en la pila testigo. Del día 8 al día 10, se observó un incremento promedio de 12 °C en la temperatura de todas las pilas, alcanzándose 30 °C en el día 10. En este periodo de tiempo la temperatura de las pilas siguió la misma tendencia que las condiciones climáticas, mientras que la temperatura interna del invernadero durante el día osciló entre 38 y 43 °C. Las temperaturas más bajas registradas fueron de 15 °C (pila testigo) y 18 °C (pilas en invernadero), a pesar de que la temperatura ambiental dentro y fuera del invernadero descendió de 5 a 9 °C. Del día 10 al 16, la temperatura de todas las pilas disminuyó en promedio 7 °C. La temperatura de las pilas a partir del día 16 (Fig. 4) siguió un comportamiento similar al de la temperatura ambiente, a pesar que las temperaturas del invernadero se incrementaron hasta alcanzar los 45 °C.

Humedad de las pilas

En lo que respecta al comportamiento de la humedad de las pilas, éstas iniciaron con un contenido de humedad de 64 %, el cual aumentó a 66 % el día 4, debido a la rehumidificación. Durante los primeros 15 días, la humedad disminuyó 10 %, mientras que esta pérdida fue de 50 unidades porcentuales del día 16 hasta el día 40. Al final del proceso el contenido de humedad fue de aproximadamente 6 % (Fig. 5).

Pérdida de peso y reducción de volumen

El peso de las pilas disminuyó en 80 % al final del experimento (datos no mostrados); esta disminución en el peso de los residuos fue superior al 69 % que Shao *et al.* (2010) reportaron en sus experimentos, mientras que Rada *et al.* (2007) consideraron como típica una reducción del 25%. La velocidad de pérdida de peso desde el inicio hasta el día 20 (primera etapa de secado) fue mayor que la correspondiente a la etapa comprendida entre el día 21 y el final del proceso (segunda etapa de secado). En la primera etapa (secado a velocidad constante) las pilas perdieron el 60 % del peso inicial, mientras que en la segunda etapa (secado a velocidad decreciente) sólo perdieron el 20 %.

Por otra parte, el volumen ocupado por las pilas al final del proceso tuvo una disminución del 53.3 % en las pilas en invernadero y del 57.5 % en la pila testigo, en relación al volumen inicial. Esta disminución del volumen fue similar a la lograda por Colomer *et al.* (2012), quienes utilizando residuos de una composición similar a la de este trabajo, encontraron que

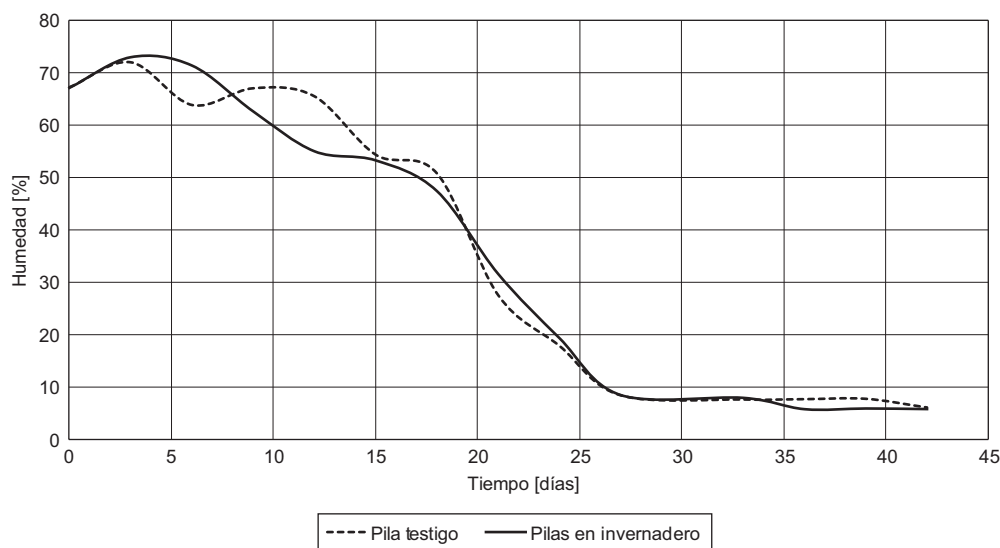


Fig. 5. Humedad de las pilas durante el biosecado

el volumen ocupado al final del proceso fue menor al 50 % del inicial. Sin embargo, la disminución lograda en el presente estudio fue menor al 75 % reportado por Robles *et al.* (2012) para residuos conformados principalmente por una mezcla de vegetales con alto contenido de humedad y sin agregar ningún material texturizante.

Materia orgánica y pH

El contenido de materia orgánica en las pilas disminuyó menos del 5 % al final del proceso, mientras que el contenido de nitrógeno total disminuyó su valor entre 1 y 0.5 %. Estos resultados son previsibles pues, como se mencionó en un principio, el biosecado busca la disminución de humedad sin alterar la composición elemental de los residuos.

Por otro lado, en lo que respecta al pH de los residuos, éste no varió significativamente a lo largo del proceso, manteniéndose un valor de 4.5.

Calor de combustión

Finalmente, se evaluó el contenido de energía de los residuos tratados en el biosecado a través de la determinación del calor de combustión. En el **cuadro II** se muestra el calor de combustión de la mezcla de residuos con que se formaron las pilas, pudiéndose observar que la mezcla de residuos incrementó, en promedio, su calor de combustión de 150 a 200 %.

DISCUSIÓN

Como puede observarse, a pesar de que la intensidad de la radiación solar al interior del invernadero

CUADRO II. CALOR DE COMBUSTIÓN DE LOS RESIDUOS

Pila	Fracción	Calor de combustión [kJ/kg]		Incremento del calor de combustión [%]
		Inicial	Final	
Testigo	Mezcla de frutas y verduras	5 681	16 300	187
	Madera triturada	20 310	19 741	0
	Cáscara de naranja	6 530	17 122	162
1	Mezcla de frutas y verduras	5 681	16 252	186
	Madera triturada	20 310	21 547	6
	Cáscara de naranja	6 530	16 310	150
2	Mezcla de frutas y verduras	5 681	16 288	187
	Madera triturada	20 310	19 946	0
	Cáscara de naranja	6 530	15 971	145
3	Mezcla de frutas y verduras	5 681	17 139	202
	Madera triturada	20 310	21 442	6
	Cáscara de naranja	6 530	17 212	164

se redujo casi en un 50 %, la temperatura al interior durante el día fue hasta 16 °C superior a la temperatura ambiente. De manera global, la comparación entre las pilas en invernadero y la pila testigo (fuera del invernadero), no mostró una diferencia importante en la pérdida de humedad (**Fig. 5**). Lo anterior podría

sugerir que la diferencia de temperatura al interior y fuera del invernadero no influyó a lo largo del proceso de biosecado; sin embargo, las pilas biosecadas bajo condiciones de invernadero mostraron una buena capacidad de amortiguamiento de temperatura después de la rehumidificación (día 4), permitiendo que la temperatura de las pilas remontara nuevamente en los tres días posteriores, hasta una temperatura de 45 °C.

El incremento de la temperatura de las pilas durante los primeros siete días, depende sólo de las reacciones exotérmicas que llevan a cabo los microorganismos que degradan la materia orgánica y no de las condiciones climáticas a las que estuvieron expuestas al interior del invernadero; inclusive, la actividad microbiana es tan alta que a pesar de que la temperatura ambiente por la noche fue de 8-9 °C, la temperatura de las pilas permaneció entre 40 y 50 °C en los primeros tres días, y entre 30 y 45 °C en los días 5, 6 y 7. Así, estos resultados concuerdan con lo reportado en la bibliografía (Zhang *et al.* 2008, Zhang *et al.* 2009), donde se explica que el biosecado se presenta en los primeros siete días del tiempo total de secado de residuos, y que la actividad microbiana es la que provoca temperaturas superiores al ambiente.

Estos resultados muestran claramente el efecto de la actividad microbiana. En la **figura 3** se observa que todas las pilas superan en más de 12 °C a la temperatura del aire al interior del invernadero y en 32 °C a la temperatura al exterior, de tal forma que los residuos pierden humedad tanto por la radiación solar como por el calor metabólico de la actividad microbiana, conformando ambos efectos el proceso de biosecado que es uno de los aspectos que este trabajo pretende demostrar. Dicho de otra forma, las condiciones climáticas por sí solas no pueden elevar la temperatura de las pilas hasta los 51 °C, pues la temperatura del invernadero alcanzó solamente de 38 a 40 °C. Por ende, el metabolismo microbiano es el causante de esta diferencia.

Rada *et al.* (2005) reportan que la rehumidificación retarda el estrés hídrico de los residuos, favoreciendo así la actividad microbiana y en consecuencia se obtienen mejores resultados en el biosecado. La adición de agua y el mezclado de las pilas bajaron la temperatura de las pilas a 30 °C, pero tres días después de la rehumidificación, la temperatura de las pilas nuevamente se elevó alcanzando un valor promedio cercano a los 46 °C, que fue superior a la temperatura interna del invernadero (40 °C). Por el contrario, la temperatura en la pila testigo continuó descendiendo hasta alcanzar un valor cercano a los 29 °C al final del séptimo día de evaluación.

Como puede observarse (**Fig. 4**) después del día 7 la actividad microbiana ya no provocó ningún incremento extraordinario en la temperatura de las pilas indicando con esto que dicha actividad disminuyó drásticamente. Después del séptimo día, el comportamiento térmico de las pilas estuvo determinado por la temperatura ambiental, pero sin alcanzar la temperatura del aire dentro del invernadero.

Aunque la duración de los experimentos fue de 40 días, se considera que la duración del proceso de biosecado fue de 28 días (**Fig. 5**), y que se favoreció por las altas temperaturas alcanzadas durante la fase termofílica la cual, de acuerdo al comportamiento mostrado en la **figura 4**, se llevó a cabo durante los primeros siete días. El efecto de la actividad microbiana en la temperatura de las pilas se observó claramente hasta el día 15, imperando así el biosecado en esta etapa. Posteriormente, del día 16 al 28 el calor generado por la actividad microbiana, en combinación con el calor del invernadero, fueron los responsables del secado de las pilas, mientras que del día 29 al 40, en las pilas se redujo la humedad en sólo dos unidades porcentuales gracias al calor proveniente de la radiación solar.

Al final del proceso de biosecado la remoción promedio de humedad fue de 91 %, que es muy superior al 67 % reportado por Adani *et al.* (2002), y al 80 % reportado por Shao *et al.* (2010), porque en dichos trabajos, el material biosecado fue RSU, mientras que en el caso de este estudio se trabajó sólo con materia orgánica biodegradable.

Las pilas en invernadero disminuyeron su humedad en apenas 10 unidades porcentuales durante los primeros 15 días, mientras que esta pérdida fue de 50 unidades del día 16 hasta el día 40; lo anterior puede contradecir lo expuesto acerca del biosecado que se lleva a cabo en el primer periodo, porque se esperaría una mayor pérdida de humedad, sin embargo esto no sucedió debido a la rehumidificación realizada el cuarto día.

La pérdida de peso y la reducción de volumen están directamente ligadas a la pérdida de humedad, de hecho la reducción de humedad representa la mayor parte de la pérdida de peso. La reducción de peso y volumen logradas después de biosecar los residuos, resultan interesantes cuando los residuos deben trasladarse a otro sitio lejano para su posterior disposición o valoración energética. El volumen del material biosecado podría reducirse aún más si el material fuera compactado en pacas.

Una parte pequeña de la pérdida de peso durante el biosecado corresponde a la degradación de la

materia orgánica. Se recomienda que la degradación de la materia orgánica sea lo más bajo posible para no afectar el calor de combustión. Las pilas sometidas a biosecado presentaron un valor de calor de combustión de 16 000 a 21 000 kJ/kg, lo cual las convierte en un combustible con contenido calórico comercialmente aceptable.

CONCLUSIONES

El biosecado constituye una metodología de secado de bajo costo para la posterior valorización de residuos hortofrutícolas y las ventajas del uso del invernadero es que: a) la temperatura en la pila del residuo a secar se incrementa de forma más homogénea debido al calor interno generado por las bacterias y se favorece por el calor externo de la acción del sol, y b) el material en proceso está protegido del riesgo de rehumidificación provocada por cualquier precipitación. De esta forma se consigue, en aproximadamente 28 días, un residuo biosecado y bioestabilizado con un contenido de humedad del 6 %, que ocupa la mitad del volumen inicial y cuyo peso se ha disminuido en un 80 %. Desde el punto de vista económico, los beneficios logrados por el biosecado se reflejarían por un lado en una disminución de los costos en el transporte del material biosecado gracias a la reducción alcanzada en el volumen y peso del residuo, y por otro en la posibilidad de uso del residuo biosecado como combustible alternativo, ya que su calor de combustión lo convierte en un combustible competitivo con los existentes comercialmente. Además, en el caso de que el material biosecado tuviera que llevarse a un sitio de disposición final, el impacto ambiental sería bajo, dada la baja generación de lixiviados y biogás que se tendría por el enterramiento del material deshidratado y estabilizado.

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el biosecado puede aplicarse de manera interesante a los residuos orgánicos de manejo especial, como pueden ser residuos de verdes o agroindustriales y se pudiera afirmar que el biosecado puede ser una alternativa al composteo, dados los tiempos más cortos de proceso.

REFERENCIAS

- Adani F., Baido D., Calcaterra E. y Genevini P.L. (2002). The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste. *Bioresource Technol.* 83, 173-179.
- Colomer-Mendoza F.J., Robles-Martínez F., Herrera-Prats L., Gallardo-Izquierdo A. y Bovea M.D. (2012). Bio-drying as a biological process to diminish moisture in gardening and harvest wastes. *Environ. Develop. Sustain.* 14, 1013-1026.
- Dufour P. (2006). Control engineering in drying technology: review and trends. *Dry Technol.* 24, 889-904.
- Rada E.C., Ragazzi M., Panaitescu V. y Apóstol T. (2005). MSW Bio-Drying and Bio-Stabilization: An Experimental Comparison. En: *Proceedings of the International Conference: Towards integrated urban solid waste management system*. 6-10 November, Buenos Aires, Argentina.
- Rada E.C., Ragazzi M., Apostol T. y Panaitescu V. (2007). Critical analysis of high moisture MSW biodrying: the Romanian case. En: *International Symposium MBT (M. Kuehle-Weidemeir, Ed.)*. Hanover, Germany, 22-24 May 2007, pp. 440-551.
- Rada E.C. y Andreottola G. (2012). RDF/SRF: Which perspective for its future in the EU. *Waste Manage.* 32, 1059-1060.
- Robles-Martínez F., Durán-Páramo E. y Sánchez Núñez J.M. (2003). Cómo aprovechar desechos sólidos en Centrales de Abasto. *Teorema Ambiental* 40, 86-88.
- Robles-Martínez F., Ramírez Sánchez I.M., Piña Guzmán A.B. y Colomer Mendoza J.F. (2010). Efecto de la adición de agentes estructurantes a residuos hortícolas en tratamientos aerobios. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 2, 45-51.
- Robles-Martínez F., Silva-Rodríguez E.M., Espinosa-Solares T., Piña-Guzmán A.B., Calixto-Mosqueda C., Colomer-Mendoza F.J. y Durán-Páramo E. (2012). Biodrying under greenhouse conditions as pretreatment for horticultural waste. *J. Environ. Prot.* 3, 298-303.
- SCFI (1985). Norma Mexicana NMX-AA-019-1985. Protección al Ambiente- Contaminación del Suelo -Residuos Sólidos Municipales-Peso Volumétrico *in situ*. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Diario Oficial de la Federación. 18 de marzo de 1985.
- Shao L.-M., Ma Z.-H., Zhang H., Zhang D.-Q. y He P.-J. (2010). Bio-drying and size sorting of municipal solid waste with high water content for improving energy recovery. *Waste Manage.* 30, 1165-1170.
- SMA (2010). *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal*. Gobierno del Distrito Federal, Secretaría de Medio Ambiente. México, D.F. 45 pp.
- Velis P.A., Longhurst P.J., Drew G.H., Smith R. y Pollard S.J.T. (2009). Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering. *Bioresource Technol.* 100, 2747-2761.
- Wiemer K. y Kern M. (1996). *Mechanical-Biological Treatment of residual waste based on the dry stabi-*

- late method*. Baeza-Verlag publisher, Witzzenhausen, Germany, 103 pp.
- Zhang D., He P., Shao L., Jin T. y Han J. (2008). Biodrying of municipal solid waste with high water content by combined hydrolytic-aerobic technology. *J. Environ. Sci.* 20, 1534-1540.
- Zhang D., He P., Yu L. y Shao L. (2009). Effect of inoculation time on the bio-drying performance of combined hydrolytic-aerobic process. *Bioresource Technol.* 100, 1087-1093.