



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA

TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN BIOPROCESOS

Presentada por

Ingeniero Bioquímico

Elizabeth Margarita Silva Rodriguez

Reducción de masa de residuos sólidos orgánicos por biosecado en invernadero

Dirigida por

Dr. Fabián Robles Martínez

MÉXICO, D.F., NOVIEMBRE 2007

Resumen

En este estudio se analizó el proceso de biosecado como tecnología para reducir la masa de residuos de flores y hortalizas. La fase experimental se realizó en la planta de composta ubicada en la Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional. Los residuos se obtuvieron del mercado de flores y hortalizas de la central de abastos de la Ciudad de México.

Se prepararon seis pilas en invernadero: tres con residuos enteros, dos con ducto de ventilación y una sin ducto; tres con residuos picados, dos con ducto y una sin ducto; y una pila testigo, sin invernadero, con material entero y sin ducto.

Se registraron datos de humedad relativa y temperatura del aire: al interior y al exterior de los invernaderos, en tres diferentes horarios. La temperatura de los residuos se tomó a una profundidad de 3 (en la superficie) y 12 cm (en el centro) de las pilas en los mismos horarios. La pérdida de masa se determinó registrando el peso de una parte de los residuos contenidos en canastillas de fácil manejo. El análisis de humedad, materia orgánica y nitrógeno total se realizaron con los métodos de las normas de protección al ambiente. El análisis estadístico realizado en la pérdida de masa no indicó diferencia significativa entre las pilas con invernadero pero sí con la pila testigo; se realizaron aproximaciones para el cálculo del tiempo de secado utilizando las curvas de secado.

El balance de masa se realizó considerando al proceso como secado de sólidos. La masa se reduce 80% y el volumen 75%. Las características del producto final permiten un mejor manejo durante el transporte.

Abstract

In this study, biodrying process was carried as a technology to reduce mass of flower and horticultural wastes. The experimental phase was performed in compost plant in Zacatenco Unit of the Instituto Politécnico Nacional. The wastes were taken from the flower and vegetables market of the Central de Abastos in México City.

Six static piles were prepared in a greenhouse: three with whole waste, two with ventilation duct and one without duct; three with shredded wastes, two with duct and one without duct; and a test pile without greenhouse, with whole wastes and without duct.

Air temperature and relative humidity were monitored inside and outside the greenhouse three times a day. Temperature in piles was monitored 3cm deep (surface) and 12 cm (center) at same time. Mass loss was determined by monitoring weight of a part of the wastes contained in easy handling baskets. Humidity, organic material and total nitrogen were determined using methods of norms of environmental protection. Statistics analysis in mass loss indicated that not significant difference between piles with and without greenhouse were found, but there was a difference in test pile; approximations were made to calculate drying time using drying curve.

Mass balance was carried out considering the solid drying process. Weight decreased at 80% and volume of 75%. Final product characteristics let a better handle and transport.



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 1 del mes de octubre del año 2007, la que suscribe Elizabeth Margarita Silva Rodríguez alumna del Programa de Maestría en Ciencias en Bioprocesos con número de registro B051603, adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Fabián Robles Martínez y cede los derechos del trabajo intitulado Reducción de masa de residuos sólidos orgánicos por biosecado en invernadero, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, las gráficas o los datos del trabajo sin el permiso expreso del autor o del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección ibqelizabeth@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Elizabeth Margarita Silva Rodríguez



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 1200 horas del día 24 del mes de agosto del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de UPIBI para examinar la tesis de grado titulada:

"Reducción de masa de residuos sólidos orgánicos por biosecado en invernadero"

presentada por la alumna:

Silva Rodríguez Elizabeth Margarita
Apellido paterno materno nombre

Con registro:

B	0	5	1	6	0	3
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de: Maestro en Ciencias en Bioprocesos

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

[Signature]
Dr. Fabián Robles Martínez

[Signature]
Dr. Juan Silvestre Aranda Barradas

[Signature]
Dra. Marina Olivia Franco Hernández

[Signature]
Dr. Teodoro Espinosa Solares

[Signature]
C. Carlos Orozco Álvarez

EL PRESIDENTE DE



[Signature]
Dr. Edgar Salgado Martínez

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL
INTERDISCIPLINARIA DE BIOTECNOLOGÍA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACION

Agradecimientos

A la UPIBI, por permitirme el grado de Maestra en Ciencias y por la oportunidad que me dio de conocer a personas con ideas y motivos por ser mejor.

A mi asesor y a los profesores que participaron en mi formación: algunos con su ejemplo de profesión, otros por su preocupación por mi crecimiento, otros por su amistad y a otros por no dejarme sola.

Al Biólogo Rogelio Bailón Morales (Jefe de la planta de composta del IPN) y a su personal, por permitirme trabajar en sus instalaciones y por todo el apoyo recibido.

A Inés García, por ser una profesora con verdadera pasión por la investigación, pero también por ser una gran persona

A mis nuevas amigas: Claudia, Diana y Nadia por su amistad sincera, por las críticas constructivas y por los consejos de vida.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Marco teórico.....	2
2.1. Manejo y disposición de residuos sólidos.....	2
2.2. Secado de sólidos.....	4
2.2.1. Secado solar.....	6
2.2.2. Secado en invernadero.....	7
2.2.3. Biosecado.....	8
2.3. Justificación.....	14
2.4. Hipótesis.....	14
2.5. Objetivos.....	15
2.5.1. General.....	15
2.5.2. Específicos.....	15
3. Materiales y métodos.....	16
3.1. Materiales y reactivos.....	16
3.2. Preparación de pilas.....	18
3.3. Mediciones y análisis.....	20
4. Resultados y discusión.....	28
4.1. Condiciones climáticas y cambios físicos de los residuos tratados.....	28
4.2. Pérdida de peso.....	32
4.3. Secado de los residuos.....	35
4.4. Balance de masa.....	40
4.5. Temperatura.....	46
4.6. Efecto de biosecado.....	51
4.7. Balance de energía.....	52
4.8. Nitrógeno total.....	54
4.9. Resumen de los parámetros del residuo.....	56
5. Conclusiones.....	57
6. Recomendaciones.....	58
7. Referencias.....	60
8. Anexos.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Secador solar de tunel	7
Figura 2. Secador de efecto invernadero diseñado por Kumar y Tiwari	8
Figura 3. Aplicaciones del residuo bioestabilizado	10
Figura 4. Estructura usada para el invernadero	17
Figura 5. a) Pila de residuos sobre el ducto, b) Vista frontal de las pilas 4 y 6	19
Figura 6. Balance de masa en las pilas tratadas	22
Figura 7. Uso de carta psicrométrica para conocer las condiciones de saturación del aire	24
Figura 8. Proceso de secado adiabático gas - líquido	26
Figura 9. Liberación de lixiviados	29
Figura 10. Residuos a los 35 días del proceso	31
Figura 11. Reducción de volumen	32
Figura 12. Pérdida de peso en canastillas de control	33
Figura 13. Humedades diarias de los residuos	35
Figura 14. Curvas de secado de todas las pilas	36
Figura 15. Graficas de velocidades de secado de las pilas 2 y 7	38
Figura 16. Porcentaje de Materia orgánica.	41
Figura 17. Flujo de aire calculado en m ³ /día para la pila 1	44
Figura 18. Humedad relativa del aire dentro de los invernaderos y del ambiente (Pila testigo)	45
Figura 19. Humedad final de los residuos en cada pila	46
Figura 20. Comportamiento de temperaturas de residuos en pila con ducto	47
Figura 21. Comportamiento de temperatura de residuos en pila sin ducto	48
Figura 22. Temperatura superficial de residuos de las siete pilas	48
Figura 23. Temperaturas de residuos, invernadero y ambiente	50
Figura 24. Temperatura del aire dentro de los invernaderos y del ambiente	51
Figura 25. Porcentaje de nitrógeno total durante el proceso.	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Residuos generados por área en la central de abastos de la Ciudad de México.....	3
Tabla 2. Modelos matemáticos para las curvas de secado.....	6
Tabla 3. Composición de lechuga por 100 g de porción comestible.....	16
Tabla 4. Tratamientos estudiados en siete pilas de investigación.....	19
Tabla 5. Cantidad de residuos en canastas de control.....	20
Tabla 6. Clima y temperatura ambiente durante el proceso.....	28
Tabla 7. Composición química del yute.....	30
Tabla 8. Estimación de pérdida de agua por lixiviados por pila.....	34
Tabla 9. Parámetros de la velocidad de secado constante y decreciente.....	37
Tabla 10. Valores de las velocidades de secado constante en todas las pilas.....	38
Tabla 11. Parámetros para calcular tiempo de secado.....	39
Tabla 12. Degradación de materia orgánica.....	42
Tabla 13. Resultados del total de agua evaporada.....	43
Tabla 14. Resultados del balance de masa por pila.....	43
Tabla 15. Energía necesaria para eliminar agua.....	53
Tabla 16. Parámetros iniciales y finales de los residuos.....	56

1. INTRODUCCIÓN

En el manejo y disposición de los residuos sólidos urbanos, las etapas de recolección y transporte son las más costosas, por lo que resulta importante reducir el volumen y la masa de los residuos sólidos orgánicos. Otro aspecto importante durante el manejo de los residuos es acelerar la estabilización de la materia orgánica para disminuir la generación de lixiviados, de biogás y la proliferación de fauna nociva. Por esta situación se están desarrollando nuevas metodologías de manejo y disposición como es la *bioestabilización* o *biosecado*, que consiste principalmente en reducir la cantidad de agua y en menor medida la cantidad de materia orgánica (MO) fácilmente biodegradable. La reducción de agua y de MO trae como resultado la disminución de la masa y del volumen del residuo.

El biosecado es un proceso de estabilización de la materia orgánica, donde se observa la misma evolución que se presenta en la primera semana del proceso de composteo; es decir hay una reducción de la materia orgánica fácilmente biodegradable y un aumento de la temperatura de los residuos, resultado del metabolismo intenso de los microorganismos.

El secado y estabilización de los residuos permiten una disposición más segura en los rellenos sanitarios porque se reduce la cantidad de lixiviados y biogás en dichos sitios. Si los residuos vegetales se encuentran libres de materiales extraños (contaminantes), el producto obtenido puede usarse para reacondicionar suelos, como combustible o como parte de un alimento balanceado para animales.

Los residuos orgánicos generados en los mercados de frutas, verduras y hortalizas, se caracterizan por su alto contenido de humedad.

El objetivo general de esta investigación fue estudiar el biosecado adaptado a un sistema de invernadero como una opción en el tratamiento y estabilización de residuos con alto contenido de humedad.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Manejo y disposición de residuos sólidos

Los residuos sólidos urbanos (RSU) se definen como los residuos de la vida cotidiana doméstica a los cuales se agregan diversos materiales: residuos de poda de parques y jardines, residuos de oficina y de la vía pública. El aumento del poder adquisitivo de la sociedad repercute en el tipo de residuos generados; Jiménez Cisneros (2001) indica que en 1950 se producían 370 g de RSM por habitante al día, los cuales eran predominantemente biodegradables; en 1987 eran de 960 g/hab día con 50% de material biodegradable, y para 1994, el volumen aumentó 20%, pero el material no biodegradable aumentó en un 600%. Como consecuencia de este aumento y la expansión demográfica, los espacios para la disposición de los RSU se agotan rápidamente y se deben planear estrategias para su manejo y procesamiento antes de la disposición final con el objetivo de reducir espacios y recuperar productos no renovables.

En octubre del 2004 entró en vigor la norma oficial de la secretaría de medio ambiente y recursos naturales, NOM-083-SEMARNAT-2003, que establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de los RSU y RME (residuos de manejo especial) (SEMARNAT, 2004).

La adecuada disposición de los residuos en un relleno sanitario tiene diferentes beneficios para la sociedad: a) ambiental: evita la contaminación de aire, suelo y agua provocada por los tiraderos clandestinos en lotes baldíos, barrancas, ríos, lagos, etc.; b) higiene: mejora las condiciones de limpieza y salud de la población al eliminar fuentes de infección, donde los vectores pueden ser moscas, ratas o insectos; c) seguridad: disminuye los riesgos de incendio y explosiones en tiraderos no monitoreados, d) turístico: puede mejorar el aspecto de la localidad al hacer un paisaje atractivo (SEMARNAT, 2004), y e) potencial uso en procesos de recuperación energética.

Algunas estrategias como la separación de residuos orgánicos e inorgánicos no han funcionado por la carencia de información y por la incomodidad de hacer dicha separación. Además del costo del manejo, la generación de residuos representa también un derroche de los recursos contenidos en los RSU (Nuortioa y col., 2006, Robles, 2005); el espacio destinado a la disposición es ineficiente y algunos de los rellenos sanitarios existentes son inapropiados porque los lixiviados y gases generados siguen ocasionando contaminación al medio ambiente. Ante este problema se están desarrollando nuevas metodologías de manejo y disposición en residuos de tipo orgánico

como es la *bioestabilización* o *biosecado*; con este pretratamiento se elimina agua para reducir el volumen de residuos a transportar o disponer en rellenos sanitarios. El producto obtenido puede tener una disposición diferente como: mejorador de suelos agrícolas si la calidad microbiológica final es buena (Sugni y col., 2005; Mondini y col., 2002) o formar parte de formulaciones de alimento para animales si se carece de materiales contaminantes (Pinachoa y col., 2005).

En México existen más de 60 centrales de abasto que producen diariamente miles de toneladas de desechos orgánicos, en específico, en la central de abasto de la Ciudad de México se generan entre 720 y 875 toneladas de desechos sólidos orgánicos al día, de los cuales cerca de 80% son desechos de productos comestibles, el resto son residuos de empaques (papel, cartón, madera y diversos tipos de plásticos) (Robles y col. 2003). En la tabla 1 se presentan los porcentajes de residuos orgánicos e inorgánicos generados en ésta central de abastos.

Tabla 1. Residuos generados por área en la central de abastos de la Ciudad de México.

Áreas	Total		Orgánica		Inorgánica	
	ton/día	%	ton/día	%	ton/día	%
Abarrotes y víveres	35	3.91	0	0.00	35	19.89
Frutas y legumbres	560	64.80	448	64.09	112	63.64
Mercado de las flores y hortalizas	228	25.47	228	32.62	0	0.00
Mercado de subasta	17	1.90	15	2.15	2	1.14
Envases vacíos	11	1.23	0	0.00	11	6.25
Estacionamientos aéreos	2	0.22	0	0.00	2	1.14
Vialidades	6	0.67	0	0.00	6	3.41
Mercado de Jamaiquita	12	1.34	8	1.14	4	2.27
Servicios complementarios	4	0.45	0	0.00	4	2.27
Totales	875	100	699	100	176	100
Información proporcionada por el Fideicomiso de la Central de Abastos de la Ciudad de México, agosto de 2000						

La Central de Abastos de la Ciudad de México, está conformada por diferentes áreas y mercados. Los mercados que generan la mayor cantidad de residuos orgánicos son el de frutas y legumbres, y el de flores y hortalizas, con 676 ton al día en promedio; tales residuos contienen gran cantidad

de agua, por lo que de ser depositados en los rellenos sanitarios, son potenciales generadores de lixiviados. La cantidad y composición de residuos generados varía a lo largo del año, debido a que los productos de estos dos mercados tienen entre sí diferentes temporadas de producción, y por lo tanto de comercialización (Robles y col., 2003).

La planta de composta de Bordo Poniente recibe actualmente residuos orgánicos de poda y una fracción (20 a 100 ton/día) de residuos provenientes de los mercados de flores y hortalizas de la Central de Abastos (Gobierno del D. F., 2007). La alta humedad de los residuos de la central de abastos es uno de los factores responsables de que el proceso de composteo se prolongue hasta 12 meses, lo cual provoca retrasos en sus programas de producción y distribución de composta. Lo anterior muestra la necesidad de dar tratamiento a los residuos hortícolas, principalmente para la disminución de la contaminación y en menor medida para el aprovechamiento de recursos; algunas alternativas son la reducción de tamaño, separación por tamaño, densificación (compactación) y la manipulación de materiales, siendo todos estos procesos unitarios aplicables durante el manejo de residuos en general (Tchobanoglous y col., 1994).

2.2. Secado de sólidos

El secado es una operación de separación, comúnmente de agua que se puede hacer de dos formas: de manera *mecánica* mediante prensas o centrifugas, o de modo *térmico* mediante la evaporación, donde se utilizarían fuentes de calor que tienen un costo adicional de generación, por lo que la primera resulta más barata (Perry, 1992).

Los equipos de secado se clasifican en: 1) secadores en los que el sólido se encuentra directamente expuesto a un gas (por lo general aire caliente), 2) secadores en los que el calor es transferido al sólido desde un medio externo tal como vapor de agua condensante, generalmente a través de una superficie metálica con la que el sólido está en contacto, y 3) secadores que son calentados por energía eléctrica, radiante o de microondas. Los secadores que exponen los sólidos a un gas caliente se llaman directos o adiabáticos; aquellos en los que el calor es transferido desde un medio externo reciben el nombre de secadores indirectos o no adiabáticos (Mc Cabe, 2002).

El desarrollo de nuevos métodos permiten el mínimo uso de energía y la obtención de productos con características específicas, tales como: i) los sistemas basados en agentes desecantes (Miller, 1983; Okano, 1998 y Sato y col., 1997), donde solo se hace control de temperatura, ii) pulsos de flujo de aire (Días y col., 2004), iii) uso de microondas (Khraisheh y col., 2004) y iv) control de

vacío (Louka y Allaf, 2004). Un sistema de secado convencional consiste de un deshumidificador rotativo desecante, transductores térmicos, potenciómetros lineales, ventiladores y un calentador; este equipo puede secar 12 veces más rápido que un secador solar, y 6 veces más rápido que un secador con agente desecante (Nagaya y col., 2006).

En el método convencional de secado, la cinética se afecta por parámetros como la temperatura, velocidad de flujo y humedad del aire, así como tamaño, forma y humedad del material a secar. Diferentes estudios han analizado estos efectos (Karathanos y Belessiotis, 1997; Lee y col., 1983 y Mulet y col., 1989). Respecto al secado de vegetales, Krokida y col. (2003) analizaron la cinética de secado de papa, zanahoria, pimiento, ajo, champiñones, cebolla, chícharo, maíz, apio, calabaza y tomate; en general, se concluyó para estos vegetales la temperatura de secado es el factor más importante; la velocidad del aire es esencial en la resistencia de la difusión del agua del material, y la humedad relativa del aire acelera el proceso de secado cuando ésta disminuye de un 40% a un 20%.

Por otro lado existen diferentes métodos físicos, matemáticos y numéricos que describen el proceso de secado. Al respecto, la formulación teórica del modelo de transporte, los procedimientos numéricos para resolver las ecuaciones que gobiernan al proceso, las definiciones apropiadas de las propiedades del aire y del material y la evaluación de los coeficientes de transferencia de masa y calor basados en literatura o experimentos, han llevado a aproximaciones; por ejemplo como la *ecuación de la capa delgada*, usada comúnmente cuando la pérdida de humedad es proporcional a la diferencia instantánea entre la humedad inicial y la humedad en equilibrio del material (Aversa y col. 2007). El modelo teórico utiliza la ecuación de Fourier y de Fick con sus correspondientes relaciones constitutivas y condiciones de frontera para resolverse con el paquete comercial FEMLAB, sistema que resuelve ecuaciones diferenciales parciales no lineales por el método de elementos finitos. Iguaz y col. (2003) describen una serie de ecuaciones que representan los balances de masa, de calor, la velocidad de secado y el tiempo de residencia durante un proceso de secado; se resuelven por la herramienta Simulink de Matlab y se obtiene simulaciones con resultados muy parecidos a los obtenidos experimentalmente.

En la tabla 2 se presentan los modelos matemáticos empíricos más utilizados para las curvas de secado, considerando que $MR = (M - M_e) / (M_o - M_e)$, donde MR es el contenido de humedad relativa, M es el contenido de humedad en cualquier momento del secado, M_e es el contenido de humedad en el equilibrio y M_o es el contenido de humedad inicial (Sacilik y col., 2006; El-Beltagy y col., 2007).

Tabla 2. Modelos matemáticos para las curvas de secado

No.	Nombre	Modelo
1	Newton	$MR = e^{-kt}$
2	Page	$MR = e^{-kt^n}$
3	Henderson y Pabis	$MR = ae^{-kt}$
4	Logaritmico	$MR = ae^{-kt} + c$
5	Dos términos	$MR = ae^{-k_0t} + be^{-k_1t}$
6	Dos términos exponencial	$MR = ae^{-kt} + (1-a)e^{-kat}$
7	Wang y Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
8	Aproximación de difusión	$MR = ae^{-kt} + (1-a)e^{-kbt}$
9	Modificación de Henderson y Pabis	$MR = ae^{-k_0t} + be^{-gt} + ce^{-ht}$
10	Midilli y col.	$MR = ae^{-kt^n} + bt$

En las últimas décadas, la crisis de energéticos ha provocado el desarrollo de nuevas fuentes de energía, sin embargo se debe considerar que algunas de ellas producen mayor contaminación y son más caras. Los secadores solares o el uso de invernaderos son una alternativa.

2.2.1. Secado solar

El secado solar se usa desde principios de la civilización debido a que la técnica de exposición a la luz solar es simple y efectiva.

Los secadores solares se pueden clasificar en directos, indirectos y especializados (Kreider y Kreith, 1981). Los secadores directos permiten la incidencia de la radiación solar sobre el producto que se encuentra dentro de una cámara cerrada y bajo una cubierta transparente. En los secadores indirectos, se calienta el aire con la radiación y es conducido por ductos a la cámara donde está el producto. Los secadores especializados se usan para productos específicos y son sistemas híbridos, es decir se adaptan a otra forma de energía, por lo tanto son más rápidos (Mwithiga y Kigo, 2006). La Figura 1 muestra un ejemplo de secador directo de túnel, es un diseño

propuesto y modelado por Sacilik y col. (2006) para secar tomate; construido de este a oeste para aumentar la incidencia de los rayos solares, contiene mesas con mallas metálicas cubiertas por una película de plástico semi transparente, para proteger de los rayos UV e infrarrojo lejano; los parámetros medidos fueron la temperatura y humedad relativa del aire. La ventaja de este tipo de secadores, comparado con un secador abierto, es la rapidez de secado y el uso del mínimo espacio.

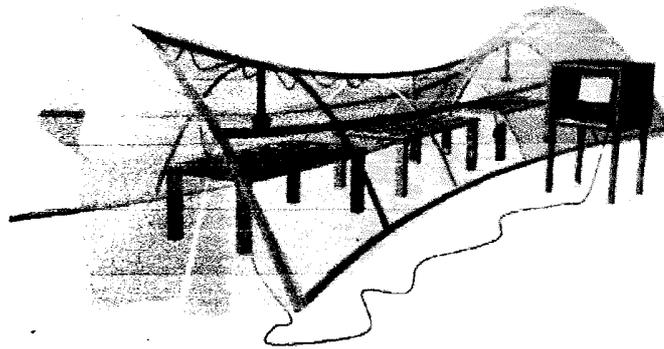


Figura 1. Secador solar de tunel

El secado solar es uno de los métodos más usados para preservar productos agrícolas en países tropicales y subtropicales, donde las condiciones ambientales como la lluvia, polvo, suciedad, insectos, roedores y otros animales afectan rápidamente la calidad del producto. Respecto al diseño del secador, la velocidad de secado es un parámetro importante y se debe considerar que la experimentación a gran escala es costosa y algunas veces imposible. Los parámetros más útiles son el contenido de humedad y estructura geométrica del producto, temperaturas y tiempos.

2.2.2. Secado en invernadero

Un invernadero es esencialmente una estructura cerrada que retiene la radiación de longitud de onda larga para crear un microclima. Los invernaderos son usados para crear climas calientes o fríos dependiendo del producto, y muchas veces solo se usan en verano. Un invernadero puede ser usado como colector de energía solar. Varios investigadores han estudiado el secado de cosechas en invernaderos. Jain (2005) desarrolló un modelo para el secado de cebolla en un invernadero con las siguientes características: construido de este a oeste, con muro norte de ladrillo, pintado de negro y con ventilación forzada; los balances de energía se realizaron en la pared norte, en el suelo, en la cama de material y en los soportes del material; los balances

descritos usan una fracción de intensidad solar que la miden con el método de Lui y Jordan (1962). La ecuación usada para describir la transferencia de masa fue el modelo de la capa delgada. Kumar y Tiwari (2006) diseñaron un invernadero para secar un residuo del procesamiento del azúcar de caña, cuyas muestras son de 2 kg distribuidos en una superficie de 40 x 24cm (ver Figura 2). El modelo térmico predice la temperatura del material, la temperatura del aire en la cámara del invernadero y la humedad evaporada bajo condiciones de convección natural con el software MATLAB; para establecer el sistema de ecuaciones se hacen las siguientes consideraciones: i) la capacidad calorífica del plástico es despreciable, ii) no hay estratificación de temperatura en el aire del invernadero, iii) la absorbancia y la capacidad calorífica en el aire encerrado es despreciable. Para calcular la energía perdida por la ventilación natural, usan una ecuación propuesta por Jain y Tiwari (2004) que considera parámetros como: densidad del aire, presiones de vapor del aire dentro y fuera del invernadero y humedad relativa del aire ambiente.

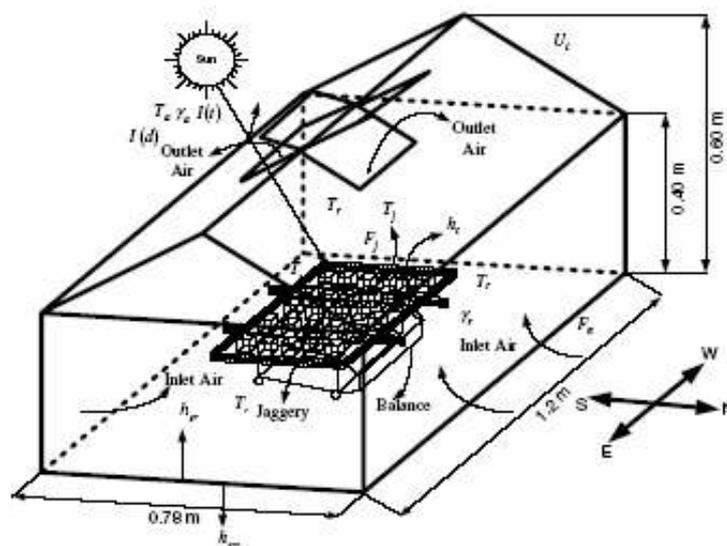


Figura 2. Secador de efecto invernadero diseñado por Kumar y Tiwari

2.2.3. Biosecado

En el proceso de composteo y en menor medida en el biosecado, se busca la degradación de la materia fácilmente biodegradable, con el objetivo de estabilizar y humificar la materia orgánica. En el biosecado, además de la bioestabilización, se elimina agua de la biomasa mientras se preserva el poder calorífico. En particular, biosecar permite la reducción del contenido de agua del residuo

produciendo un incremento en el valor de la energía calorífica, si se usa como combustible, de alrededor del 30 al 40 % (Adani y col., 2002; Weimer y Kern, 1996).

Durante el composteo y/o la bioestabilización la temperatura, el oxígeno y el contenido de humedad deben de mantenerse en un rango adecuado para asegurar una buena degradación; por otro lado en el proceso de biosecado éstos parámetros deberán ser controlados de tal forma que se obtenga un equilibrio entre la velocidad de secado y la degradación de la materia orgánica (Adani y col., 2002).

El biosecado es una alternativa de solución en el manejo de los RSU de tipo orgánico, este bioproceso se basa en la generación de calor metabólico de los microorganismos presentes de forma natural, beneficiando la eliminación de agua del material. El calor que produce la biomasa, la humedad inicial del material y la velocidad de flujo de aire son parámetros que controlan el biosecado (Adani, 2002). La velocidad de flujo de aire influye en la temperatura de la biomasa afectando el proceso de secado, mientras que el grado de degradación de la materia orgánica afecta la energía calorífica y la estabilidad del producto final (Sugni y col., 2005). En el proceso de biosecado, cuando la biomasa se somete a una velocidad de flujo de aire baja, se favorece la degradación aerobia pero la eliminación de agua es inadecuada, esto se debe a que el aire es utilizado principalmente para el suministro adecuado de oxígeno; y viceversa, si se tiene una alta velocidad de flujo, la corriente se lleva más agua secando el material pero retrasa el proceso de degradación microbiológico por alterar la actividad de agua. Por lo tanto para lograr una reducción satisfactoria de agua de manera homogénea se debe mantener una combinación adecuada de la velocidad de flujo de aire y temperatura de secado (Sugni y col., 2005).

Actualmente en países de Europa se está impulsando la recolección selectiva y el tratamiento mecánico-biológico, que consiste en una reducción de tamaño de los residuos seguida de un proceso de degradación aeróbica (biosecado) y opcionalmente puede compactarse el producto final antes de su disposición final. Este proceso puede tener sus variantes y dependiendo de éstas, el producto puede ser utilizado como combustible, alimentación de biorreactores anaerobios o simplemente dispuesto en vertederos, en la Figura 3 se presentan algunas aplicaciones del producto estabilizado (Martínez, 2007).



Figura 3. Aplicaciones del residuo bioestabilizado.

Los parámetros utilizados en el secado de residuos se utilizan temperaturas de 40 – 70°C, humedad relativa de 40-60% y velocidades de aireación de 0.3-1.16 L de aire/min kg de materia orgánica (Kulcu y Yaldiz, 2004); éstos difieren de los empleados en el secado de alimentos propuestos por Krokida y col. (2003). Sin embargo, cuando se controla la humedad y características nutricionales y microbiológicas de los residuos durante el proceso, se puede obtener un material que puede formularse como alimento para animales (Pinachoa y col., 2005).

Una manera de comprender la transformación de la materia orgánica durante los primeros días del biosecado, es analizar el proceso de composteo. El efecto principal de este proceso es la liberación de energía en forma de calor debido a la acción microbiana.

Al inicio del composteo, el consorcio microbiano es el propio de los residuos, con el tiempo se multiplican hasta un máximo dependiendo de las condiciones ambientales y nutrimentales, y finalmente por estas mismas condiciones cesa el desarrollo y la actividad microbiana; la generación de energía sigue el mismo comportamiento: mínimo-máximo-nulo, por lo que el momento de mayor actividad es importante, ya que la disminución de la humedad afecta la actividad microbiana.

El concepto de composteo se refiere al proceso aerobio en el cual diferentes microorganismos conducen a la mineralización de la mayor parte de la materia orgánica, quedando un producto final que tiene ácidos húmicos y fúlvicos estables y considerable cantidad de nutrientes. Durante el proceso, la fracción orgánica es parcialmente degradada en dióxido de carbono y agua, convierte compuestos inestables de amonio en formas orgánicas estables, reduce el volumen de los desechos de 40 hasta 60% dependiendo del origen de los residuos y por las temperaturas que se alcanzan se destruyen patógenos. Dependiendo de la naturaleza de los residuos, pueden mezclarse con otros sub-productos para lograr una composición adecuada en cuanto a nutrientes, por ejemplo se recomienda que la relación inicial C/N sea de 25 a 35; cuando el material a comportar tiene exceso de agua, se utilizan agentes texturizantes (paja, residuos de algodón, aserrín y astillas) para mejorar la estructura, evitar compactación y mejorar el flujo de aire al interior de la pila (Cayuela y col., 2006).

La calidad y el costo de producción de la composta dependen del tipo de proceso empleado. Además, el volumen a procesar, la humedad, porosidad y otras características de la materia prima afectan la eficiencia de los microorganismos aerobios por lo que el método de aireación es uno de los parámetros de optimización más importantes.

Los tres métodos de aireación más usados en el composteo son: a) La **aireación natural**, la más barata y simple, no requiere instalaciones y se lleva a cabo por simple difusión y convección, gobernada por el área de superficie expuesta y por parámetros como temperatura y porosidad; una ventaja de este método es que al voltear la pila (material en montón acomodado en forma trapezoidal) periódicamente se logra una buena homogenización y las desventajas son la dificultad para controlar la temperatura y la fácil pérdida de nitrógeno. b) La **aireación pasiva** requiere la instalación de ductos bajo las pilas para mejorar la convección, creada por la diferencia de temperaturas entre el material y el ambiente; Sartaj y col. (1997) encontraron que con la aireación pasiva se tiene una mejor velocidad de composteo en relación con la aireación activa, y c) La **aireación activa** requiere la instalación de canales de ventilación y/o sopladores para empujar aire a través de las pilas. Una forma de llevar a cabo el proceso de composteo con aireación forzada, se ha definido como un buen método para reducir la pérdida de nitrógeno por volatilización (Sánchez - Monedero y col., 1997); tiene desventajas como: la limitada homogenización de la pila, la formación de gradientes de temperatura y la necesidad de agregar mayor cantidad agua debido a una mayor evaporación, además de lo ya mencionado, un mayor enfriamiento de las pilas y pérdida de nitrógeno cuando la aireación es excesiva.

Las tecnologías de aireación varían según el método de suministro de aire, el control de temperatura, la forma de mezclado o volteado del material y el tiempo requerido. La eficiencia del

composteo se ha evaluado en diferentes tipos de residuos orgánicos, se han presentado resultados similares en producto final pero con diferencias en tiempos y perfil de temperaturas, por ejemplo, en las pilas de aireación forzada la fase termofílica es más prolongada y su aparición es más tardía (Baeta-Hall y col., 2005 y Barrington y col., 2003). En el experimento realizado por Kulcu y Yaldiz (2004) se empleó un reactor de composteo que proveía aire (a diferentes velocidades) con un soplador por la parte superior, el material de composteo se ventiló por convección natural, donde como es sabido ocurre una acumulación de CO₂ y una deficiencia de O₂; el material usado para el proceso fue una mezcla de pasto, tomate, pimiento y berenjena; se concluye que la mejor velocidad de secado fue de 0.4 L aire/min kg de materia orgánica, una mayor velocidad produce un enfriamiento del sistema debido a que hay una mayor transferencia de calor, a velocidades menores el suministro de oxígeno para el proceso aerobio puede ser insuficiente.

La aireación pasiva depende del diseño apropiado de los canales de ventilación. Los ductos deben proveer suficiente aire considerando la limitada fricción provocada por la baja diferencia de presiones producida por las fuerzas de flotación térmica debidas a la masa de aire tibio en la composta. Las fuerzas viscosas que ocurren dentro de los mismos ductos de ventilación, expresadas en términos de diferencia de presión, dependen de la velocidad del aire y del tamaño de la tubería. Los flujos convectivos de aire en los ductos dentro de la composta han sido poco documentados. Barrington y col., (2003) utilizan el número de Grashof para predecir el flujo de aire a través en la pila de aireación pasiva considerando el perfil de temperaturas a través del tiempo. El número de Grashof tiene un papel similar al número de Reynolds, el primero representa la relación entre las fuerzas de flotación y viscosas, y el segundo representa la relación entre las fuerzas viscosas e inerciales; dicho número es adimensional e incluye parámetros como: altura de la pila, área transversal de la pila, porosidad de la composta, densidad del aire a temperatura ambiente, temperaturas de la composta y del aire ambiente y viscosidad del aire.

Cayuela y col. (2006), estudiaron el efecto de mezclar un residuo de la producción de aceite de oliva (constituido de pulpa de aceituna, mucílago, pectina, aceite y agua) con un agente texturizante: a) paja y estiércol de oveja, para incrementar la concentración de N₂ y dar efecto texturizante y b) tallos de uvas, para mejorar la estructura. Usaron aireación forzada, ventilando durante 1 minuto cada cuarto de hora durante 30 días (a una velocidad en la cual la temperatura del aire se mantuviera en 55 °C), y volteo mecánico, cada cuatro días durante 2 meses. En la aireación forzada se observó un perfil irregular de temperaturas, porosidad pobre y formación de vías preferenciales de aire, lo que provocó que se obtuviera un producto heterogéneo. En el volteo mecánico, el tamaño de las pilas afecta el control de la temperatura, las pilas pequeñas no

alcanzan las temperaturas que favorecen el desarrollo termofílico y pilas muy grandes alcanzan temperaturas tan altas que inhiben el proceso microbiano, además de ser más difícil el suministro de oxígeno al interior de ésta.

Independientemente del método de aireación que se utilice, hay tres factores principales que determinan la velocidad del proceso: 1) La temperatura, que divide el proceso en tres fases: mesofílica, termofílica y de enfriamiento. En la fase mesofílica la actividad de los microorganismos psicrófilos y mesófilos tiende a incrementar la temperatura hasta valores de 40 a 60 °C. Durante la fase termofílica la temperatura limita a los organismos mesófilos y promueve el desarrollo de los termófilos, independientemente del tipo de técnica que se utilice para la aireación, esta fase es la que dura más tiempo, y termina cuando la temperatura comienza a disminuir debido al agotamiento de la materia orgánica. 2) El pH, su valor depende del tipo de materia prima y, 3) El contenido de humedad, el cuál debe mantenerse entre 50 y 60%. Durante el proceso se debe adicionar agua para mantener una perfecta actividad microbiológica (Zhu y col., 2004).

La evolución del proceso de composteo se evalúa en términos del grado de descomposición de la materia orgánica, pérdida de nitrógeno y calidad del producto final. Los análisis fisicoquímicos y microbiológicos se realizan de acuerdo al tipo de material utilizado (que puede ser desde residuos simples, como desechos de material de poda, hasta residuos más complejos como desechos industriales de alta humedad y poca porosidad) y a la disposición del producto (en relleno sanitario, en re-acondicionamiento de suelos o como materia prima en otro proceso), y pueden ser: materia orgánica, contenido de humedad, materia seca, cenizas, lignina, celulosa, nitrógeno total, *Escherichia coli*, huevos de helminto, índice de germinación, etc.

2.3. Justificación

El mayor problema en el manejo de los residuos sólidos es el transporte y el espacio requerido para su disposición final en rellenos sanitarios. Por tal razón debe mejorarse la eficiencia del pre-tratamiento y procesamiento de los residuos que permita reducir la masa y el volumen de éstos; en particular en operaciones que permitan el reciclaje y/o la valorización económica del residuo, aunado a una disminución en las emisiones contaminantes, sobre todo durante la descomposición de la materia orgánica.

2.4. Hipótesis

El biosecado en invernadero puede disminuir por lo menos en un 50% la cantidad de masa total en residuos con alto contenido de humedad

2.5. Objetivos

2.5.1. General

Analizar la reducción de masa por biosecado en invernadero, de residuos orgánicos con alto contenido de humedad.

2.5.2. Específicos

- *Cuantificar la pérdida de masa en pilas de residuos sometidas al proceso de biosecado en invernadero.*
- *Cuantificar la reducción de materia orgánica en los residuos tratados, como medida de degradación.*
- *Medir la reducción de masa, volumen y materia orgánica en los residuos utilizados, para mejorar su disposición.*

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales y reactivos

Residuos orgánicos

Los residuos utilizados para el trabajo experimental de esta investigación se obtuvieron del Mercado de Flores y Hortalizas de la Central de Abastos de la Ciudad de México. El día 24 de octubre del 2006 se transportaron 1800 kg de residuos a la planta de composta de IPN, donde se llevaron a cabo los experimentos. Los residuos estuvieron conformados por una mezcla de vegetales con alto contenido de humedad, en particular lechuga orejona, cuya composición se reporta en la Tabla 3 (Instituto Nacional de Nutrición Salvador Zubirán, 2007).

Tabla 3. Composición de lechuga por 100 g de porción comestible

<i>Componentes:</i>	<i>Lechuga romana</i>	<i>Lechuga orejona</i>
Agua (g)	96	95
Proteínas (g)	1	1.4
Grasas (g)	0.3	0.3
Cenizas (g)	0.5	0.5
Carbohidratos totales (g)	2.2	2.8

En la mezcla de residuos también había tiras de yute, que al inicio no se percibieron y que son usadas para amarrar los vegetales; como el yute no se detectó si no hasta avanzado el proceso, no se obtuvieron resultados de su composición ni de su degradación.

El proceso de biosecado se llevó a cabo en invernaderos (ver Figura 4), contruidos de los siguientes materiales:

- Tres marcos metálicos triangulares de 1.16 m de alto x 2.2 m de ancho.
- Plástico invernadero (cortes de 8 x 8 m).
- Tarima metálica de 2 x 3 m, con red de alambre con orificios de 0.9 x 0.9 cm.

- Ducto metálico triangular de 0.25 m de alto x 2.5 m de largo, cubierto por malla metálica con orificios de 0.7x0.7 cm. El área de flujo del ducto (área transversal) es de 0.036 m².

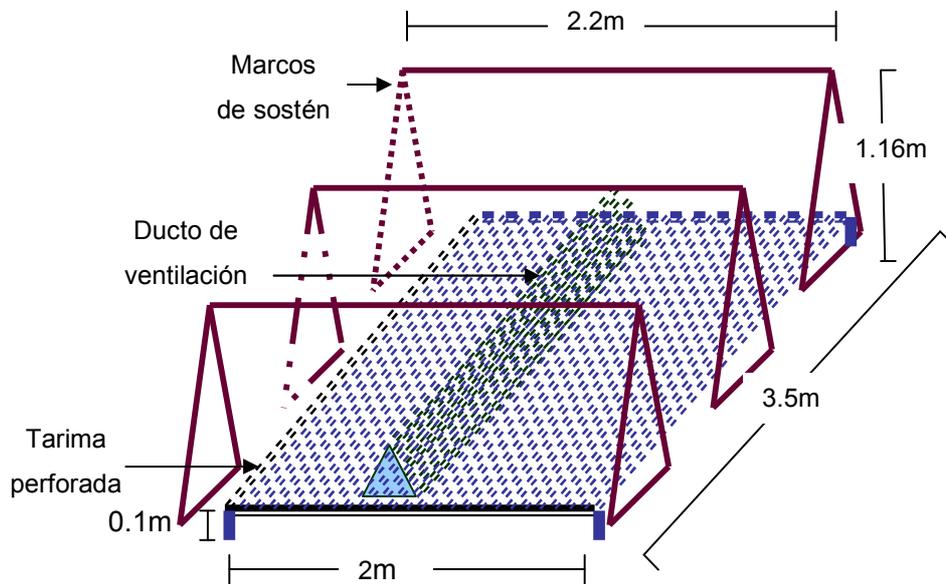


Figura 4. Estructura usada para el invernadero

El efecto de los componentes del invernadero durante el biosecado se describe a continuación:

Invernadero. Permitió mantener una mayor temperatura del aire dentro del invernadero respecto al exterior y proteger los residuos de la lluvia; Para mejorar el proceso se hacen recambios completos del aire una vez al día, levantando el plástico de los lados norte y sur durante una hora.

Tarima. Las funciones fueron: a) permitir el drenado de los lixiviados producidos y b) favorecer el intercambio del aire del invernadero con el exterior en la base de los residuos.

Ducto. Por estar construido con malla metálica permitió el intercambio de aire y CO₂ por la parte inferior de la pila. También favoreció la liberación de lixiviados, disminuyendo la saturación del aire dentro del invernadero.

Para la preparación y manejo de las pilas se utilizaron los siguientes materiales: balanza con capacidad de 100 kg, machetes, botes de plástico de 20 L, palas, bieldo, guantes de carpa, carretilla, lazo y canastillas cúbicas de malla plástica de 25 cm por lado.

Para el registro de humedad y temperatura del aire se utilizó un higrómetro marca HANNA instruments HI9065. Para determinar las propiedades correspondientes del aire se utilizó una carta psicrométrica proporcionada por la Universidad Autónoma de Chapingo (ver en anexos).

La temperatura de los residuos se registró con termómetros bi-metálicos TEL-TRU 0-150 C.

La toma de muestras para los análisis en laboratorio se realizó en botes de plástico de 1 litro.

El proceso de biosecado se desarrolló en la planta de composta del Instituto Politécnico Nacional, ubicada en la unidad profesional de Zacatenco, en la Delegación Gustavo A. Madero del D. F.

3.2. Preparación de pilas

Se prepararon seis pilas en invernadero y una a la intemperie (pila testigo), en dirección norte sur (dirección más común del viento), para permitir un mejor flujo de aire a través de los ductos y durante el recambio de aire del invernadero.

Recambio de aire y ventilación. Se descubrieron los lados norte y sur del invernadero diariamente durante una hora, para hacer el cambio completo del aire, en el presente trabajo a esto se le llama: "*recambio de aire*". Al destapar el invernadero en los lados norte y sur, el área de flujo de aire es de 2.32 m² por invernadero. Se utilizaron ductos en las pilas 1, 2, 3 y 4 para permitir el contacto del aire con los residuos de la pila en la parte inferior.

La preparación de las pilas se realizó de la siguiente manera:

- A. Se trituró aproximadamente 0.9 Ton de residuos y con estos se formaron las pilas 3, 4 y 6.
- B. Con los otros 0.9 Ton de residuos se formaron las pilas 1, 2, 5 y 7 (pila testigo).

La cuantificación del peso inicial en cada pila se realizó pesando los residuos en botes de plástico y distribuyéndolos en cada pila en forma trapezoidal. Las características de las siete pilas se muestran en la tabla 4. En la Figura 5 se aprecia la pila de residuos dentro del sistema invernadero.

Tabla 4. Tratamientos estudiados en siete pilas de investigación

No de pila	Material entero / triturado	kg de Residuos	Invernadero	Ducto de ventilación
1	Entero	284.5	Si	Si
2	Entero	325.3	Si	Si
3	Picado	221.4	Si	Si
4	Picado	248.9	Si	Si
5	Entero	324.8	Si <td No	
6	Picado	254.5	Si	No
7 (testigo)	Entero	93.2	No	No

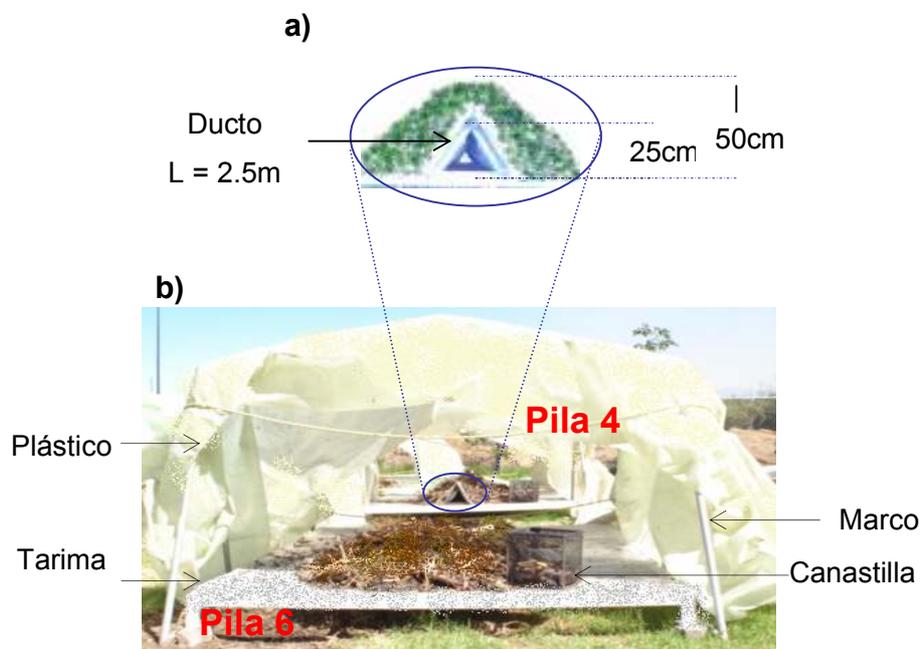


Figura 5. a) Pila de residuos sobre el ducto, b) Vista frontal de las pilas 4 y 6

3.3. Mediciones y análisis

Pérdida de masa. Se utilizó una canastilla cúbica de malla plástica (de 0.015 m³, 25cm por lado) en cada pila. Estas canastillas permitieron hacer el seguimiento de la pérdida de peso de una misma muestra para todo el proceso. En cada canastilla se colocaron entre 2 y 3 kg de residuos (ver Tabla 5) y se introdujeron entre la pila para que se sometieran a las mismas condiciones de proceso y así representar la pérdida de peso de la pila entera.

Tabla 5. Cantidad de residuos en canastas de control

<i>Canastilla de:</i>	<i>kg de residuos</i>
Pila 1	2.18
Pila 2	4.49
Pila 3	4.59
Pila 4	5.77
Pila 5	7.36
Pila 6	4.86

Registro de temperatura y humedad relativa del aire. Se registraron datos de temperatura y humedad relativa del aire, dentro y fuera de los invernaderos, a las 9:00, 11:00 (después del recambio) y 14:00 horas. Para el registro de estos dos datos se usó un higrómetro marca HANNA instruments HI9065.

Volumen. La medición del volumen inicial en cada pila de residuos se realizó en botes de plástico 0.02m³, y el volumen final en bolsas de polietileno. Esta determinación se hizo al mismo tiempo que se cuantificó el peso total de los residuos de cada pila, en base a la norma *MMX-AA-019-1985*. También se midió la masa del material seco y las tiras de yute en el residuo final, separando las porciones con un bielgo y pesando en la báscula electrónica.

Registro de la temperatura de los residuos. La medición de temperatura se realizó en el centro y superficie de cada pila, a las 9:00, 11:00 (después del recambio del aire) y 14:00 horas. Se usaron termómetros metálicos TEL-TRU de 0-150°C.

Muestreo para los análisis de humedad, materia orgánica y nitrógeno total. Se colectaron muestras de 10 g aproximadamente en botes de plástico. La muestra se tomó a una altura media de la pila de los residuos. Los análisis de humedad, materia orgánica y nitrógeno total se realizaron en el laboratorio de Tecnología Ambiental de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI).

Determinación de la humedad de los residuos. En el laboratorio se hicieron análisis de humedad diariamente por el método gravimétrico en base a la norma *NMX-AA-052-1985*. El método se basa en la determinación de la cantidad de agua expresada en gramos que contiene una muestra. La determinación de la masa de agua es la diferencia de peso entre la masa de residuo húmedo y la masa de residuo seco. La temperatura de secado fue de 65 °C. Para la determinación se utilizó una balanza electrónica digital, Sartorius CP3245, con precisión de 0.001g (ver anexos).

Análisis de materia orgánica. La materia orgánica se cuantificó según el método de la norma *NMX-AA-021-1985*. La determinación se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y la generación de calor al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado. El dicromato de potasio residual se valora con sulfato ferroso (ver anexos).

Análisis de nitrógeno total. La determinación se cuantificó en base a la norma *NMX-AA-24-1984* cada siete días. Se basa en el método de Kjeldahl que consiste en convertir todos los componentes del nitrógeno oxidados tales como nitratos y nitritos a nitrógeno reducido a sulfato de amonio (ver anexos).

Balance de masa. Se generó el balance de masa en base a las corrientes de entrada y de salida del proceso, considerando lixiviados, vapor, y la materia orgánica degradada

$$R_o = R_f + L + MO_d + AE$$

¹ Zapien S/F. Reporte de tesis para obtener el grado de Ingeniero en Sistemas Ambientales del IPN. Trabajo aún no presentado.

Donde:

R_o es la cantidad total inicial de residuos en cada pila más la cantidad inicial de residuos en cada canastilla.

R_f es la masa total de residuos final del proceso más la cantidad de residuos no recuperados (en las muestras diarias y en mermas).

L es la cantidad de lixiviados *estimada*, ya que no fue cuantificada. Para la estimación se utilizó la información de la grafica de pérdida de peso vs tiempo, se obtuvo la ecuación del periodo lineal de todos los tratamientos y posteriormente se hizo una extrapolación en el tiempo inicial, la diferencia del valor real con el extrapolado se considero como la cantidad no cuantificada de lixiviados. Los resultados de la estimación corresponden con los encontrados por Zapien (S/F¹) donde 22% del peso inicial se perdió en forma de lixiviados durante los primeros dos días, el resto del tiempo la lixiviación fue despreciable. El experimento de Zapien fue un composteo en reactor, con una mezcla de residuos parecida a la del presente trabajo, que consistió de: a) hortalizas (95.8%), b) material de poda (2.4%), c) lodos de una planta de tratamiento de aguas (0.9%), d) residuos animales (0.4%) y e) material texturizante (0.5%).

MO_d es la cantidad de materia orgánica degradada (materia orgánica inicial menos materia orgánica final).

AE es la cantidad de agua evaporada que se elimina en el aire de secado. Se obtuvo mediante una balance de masa cuyas corrientes involucradas se aprecian en la Figura 6.

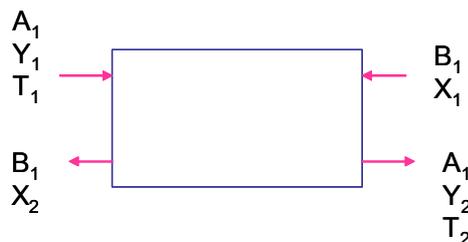


Figura 6. Balance de masa en las pilas tratadas.

Donde:

A_1 : masa de aire seco (kg de aire seco)

B_1 : masa de sólido seco (kg de residuo seco)

Y_1 : concentración másica de agua en el aire a la entrada (kg agua/kg aire seco)

Y_2 : concentración másica de agua en el aire a la salida (kg agua/kg aire seco)

X_1 : concentración másica de agua en el residuo a la entrada (kg agua/kg residuo seco)

X_2 : concentración másica de agua en el residuo a la salida (kg agua/kg residuo seco)

T_1 : Temperatura de bulbo seco en el aire al inicio (entrada)

T_2 : Temperatura de bulbo seco en el aire al final (salida)

La ecuación utilizada para el balance fue:

$$A_1 Y_1 + B_1 X_1 = A_1 Y_2 + B_1 X_2$$

La masa de sólido seco se calculó con los datos de masa inicial total y porcentaje de sólido de los residuos (%sólido = 100-% de humedad) :

$$B_1 = R_0 * \%sólido$$

Conociendo B_1 y con los datos de contenido de humedad experimentales se calculó el agua evaporada de los residuos:

$$AE = B_1 (X_1 - X_2)$$

Como dato adicional se determinó la masa de aire seco requerida. Se localizan los puntos Y_1 y Y_2 en la carta psicrométrica, considerando que el aire mínimo necesario en un proceso de secado es aquel en el cual sale saturado (Valiente, 2001), se despeja A_1 de la ecuación del balance:

$$A_1 = B_1 \frac{(X_1 - X_2)}{(Y_2 - Y_1)}$$

Con la información de A_1 se calculó el volumen de aire en m^3/kg de aire seco a las condiciones de entrada (con la humedad Y_1) con la siguiente ecuación:

$$V_H = \left(\frac{Y_1}{18} + \frac{1}{29} \right) \frac{RT}{P}$$

Por último se obtuvo el volumen de aire en $m^3/día$ multiplicando por la masa de aire seco y dividiendo entre el tiempo del proceso:

$$V = V_H \frac{A_1}{t}$$

Las corrientes de entrada fueron: el flujo de aire después del recambio del día actual y al residuo con la humedad en ese momento (11:00hrs). Si suponemos que el biosecado se comportó como un proceso adiabático se considera entonces que la mínima cantidad de aire a utilizar sería la

requerida para que saliera saturado con vapor de agua; entonces con las condiciones de entrada del aire se sigue la línea de saturación adiabática en la carta psicrométrica hasta llegar a la saturación para conocer la temperatura y la humedad final del aire (ver Figura 7). Las unidades utilizadas fueron: kg de agua / kg de aire seco para la humedad del aire y kg de agua / kg de sólido seco para el residuo.

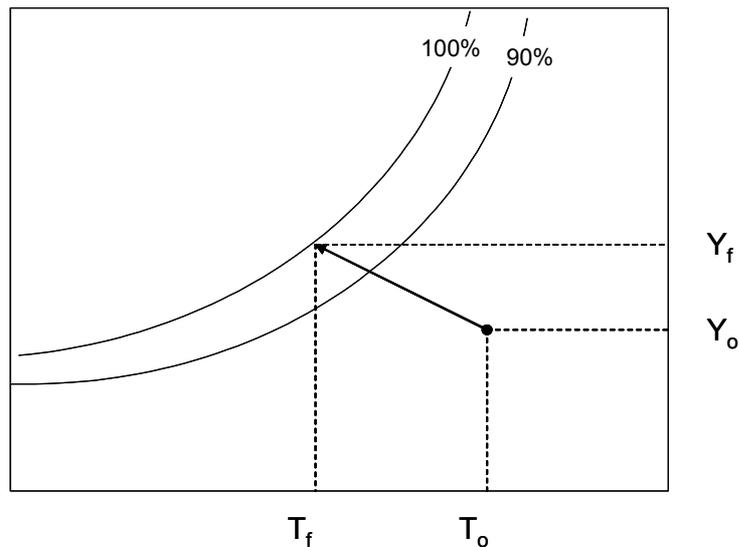


Figura 7. Uso de carta psicrométrica para conocer las condiciones de saturación del aire

Curva de secado. En el secado de sólidos, el contenido de humedad X , es la unidad común de representar la pérdida de humedad, éste representa los kg de agua por kg de sólido seco de material a secar. La curva de secado es el gráfico que describe la disminución del contenido de humedad X (kg de agua/kg de materia seca) respecto a tiempo. Para el secado, en el periodo de velocidad constante, es posible estimar el tiempo necesario mediante estas curvas o por predicciones de coeficientes de transferencia de masa y de transferencia de calor:

- a) Estimación del tiempo a partir de la curva de secado. Se localizan la humedad inicial y la humedad que se quiere alcanzar, se leen los tiempos correspondientes y se obtiene la diferencia.
- b) Estimación del tiempo a partir de datos experimentales como área superficial expuesta. Para conocer las velocidades de secado (R), se utilizó la siguiente expresión:

$$R = \frac{Ls}{A} * \frac{dX}{dt}$$

Donde R se expresa en kg de agua/ h m², L_s/A es una relación de los kg de sólido seco usado en una área superficial expuesta al secado (en m²), el término dX/dt son las pendientes de las tangentes de la curva. Se gráfica el “contenido de humedad promedio” en el eje x (kg de agua/kg de residuo seco) y en el eje y el valor de R.

Al integrar la ecuación de la velocidad de secado en el periodo constante se tiene que el tiempo es:

$$t = \frac{L_s}{A * R} * (X_1 - X_2)$$

y para el periodo decreciente,

$$t = \frac{L_s}{A} * \frac{(X_1 - X_2)}{(R_1 - R_2)} \ln \frac{R_1}{R_2}$$

c) Estimación del tiempo de secado a partir de ecuaciones básicas de transferencia de calor. Partiendo de que las pilas tienen contacto con el aire en un área expuesta determinada, podemos calcular el coeficiente de transferencia de calor, la velocidad de secado R y con éstos el tiempo de secado (Mc Cabe, 2002).

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor es necesario conocer la velocidad másica del aire de secado, G:

$$G = \frac{P * V * PM}{R * T * A}$$

Donde P es la presión del aire, V es la velocidad del aire, PM es el peso molecular del aire, R es la constante de los gases ideales, T es la temperatura del aire y A es el área expuesta.

Con éste dato se calcula el coeficiente de transmisión de calor:

$$h_y = 0.0128 * G^{0.8}$$

La velocidad de secado se calcula como:

$$R_c = \frac{h_y (T - T_i)}{\lambda_i}$$

Para calcular la velocidad de evaporación, m_v, se utilizó la siguiente ecuación:

$$m_v = R_c * A$$

Y dividiendo entre la masa a evaporar, se obtuvo el tiempo de secado:

$$t = \frac{m_v}{m}$$

Balance de energía. Este análisis se realizó para calcular los cambios de entalpía que sucedieron durante la eliminación de vapor de agua mediante el aire de secado, y poder determinar la eficiencia energética del proceso. El proceso de biosecado fue considerado como un proceso de saturación adiabática, donde el sólido está expuesto al aire de secado de dos formas, de circulación transversal (sobre ambas caras de la capa de sólidos) y a través del sólido. El gas entrante (aire) está en contacto con líquido (agua), como resultado de la difusión y la transferencia de calor entre el gas y el líquido, el gas sale en condiciones de humedad y temperatura diferentes a aquellas con las que entró (Treybal, 2001). La Figura 8 muestra la representación teórica del contacto gas-líquido.

Con los datos de humedad relativa y temperatura del aire a la entrada, se determinaron las humedades y entalpías del aire; se utilizó la carta psicrométrica (a una presión de 585 mmHg) para conocer las propiedades del aire a la salida, a partir de los datos HR y T, considerando que la saturación del aire se da en 22 horas, es decir, los valores iniciales fueron los correspondientes al registro después del recambio del día actual (11:00) y los finales al registro antes del recambio del día siguiente (9:00). Dado que el secado se consideró como un proceso adiabático, se determinó la entalpía en la saturación a la temperatura inicial y la entalpía en la saturación adiabática y se tabularon sus diferencias.

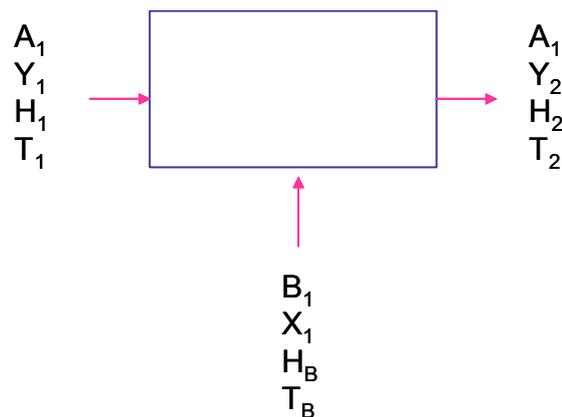


Figura 8. Proceso de secado adiabático gas - líquido

Donde:

A_1 : masa de aire seco (kg de aire seco)

B_1 : masa de sólido seco (kg de residuo seco)

Y_1 : concentración másica de agua en el aire a la entrada (kg agua/kg aire seco)

Y_2 : concentración másica de agua en el aire a la salida (kg agua/kg aire seco)

H_1 : entalpía en el aire a la entrada

H_2 : entalpía en el aire a la salida

H_B : entalpía del líquido

T_1 : Temperatura del aire en la entrada

T_2 : Temperatura del aire en la salida

T_B : Temperatura del líquido

La ecuación del balance de entalpía se obtiene a partir de la ecuación del balance de agua del sistema y sin considerar otras corrientes de entrada y salida de energía.

$$A_1 * H_1 + B_1 * H_l = A_1 * H_2$$

No se determinó la irradiación solar debido a que no es parte del alcance de este trabajo, por lo tanto no es posible calcular el calor debido al efecto invernadero. Tampoco se determinó la capacidad calorífica del residuo, además esta en función del grado de degradación del residuo. Debido a que los resultados fueron dependientes de variables no controladas como la energía debida a la irradiación solar y la rápida saturación del aire, para el análisis de entalpías sólo se supuso una comparación entre la entalpía del aire bajo las condiciones iniciales y la entalpía en las condiciones de salida consideradas como saturación adiabática. La diferencia de éstas es la energía necesaria para que el aire, (con las condiciones iniciales diarias de T y Y), elimine el agua evaporada calculada a partir de los datos de contenido de humedad. Dicha energía es $\Delta H = H$ de saturación adiabática – H del aire en condiciones de entrada (T y Y después del recambio).

Análisis estadístico. Se realizó análisis de Anova con la posterior prueba de Tukey con los datos de pérdida de peso de todos los sistemas con invernadero como tratamientos y de la pila testigo como control.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Condiciones climáticas y cambios físicos de los residuos tratados

Clima

El proceso de biosecado se desarrolló durante los meses de octubre y noviembre del año 2006. Durante el experimento el clima del medio ambiente fue variado, ver Tabla 6:

Tabla 6. Clima y temperatura ambiente durante el proceso

<i>Días</i>	<i>Clima, temperatura</i>
1 - 4	Soleado, 23.5 – 32°C
5 - 7	Frío y lluvioso, 10.4°C
8 - 21	Soleado, 23 – 30°C
22	Lluvioso, 17 – 23°C
23 - 35	Medio nublado, 12 – 23°C

La temperatura del aire dentro de los invernaderos fue mayor respecto al exterior, en promedio 10°C, dependiendo del clima; la humedad dentro del invernadero también fue mayor que en el exterior, llegando a la saturación en las pilas sin ducto y durante los primeros días del proceso. En el anexo 1 se reportan los datos de los seis tratamientos y del ambiente (pila testigo).

Las condiciones climatológicas afectaron la temperatura y la humedad del aire de secado. La humedad del aire es un parámetro importante, si la humedad del aire es baja, se acelera el proceso de secado y viceversa (Krokida y col., 2003); por esto es importante reducir la humedad relativa del aire en el interior de los invernaderos realizando cambios completos con un aire más seco.

Cambios físicos de los residuos

Los residuos empleados presentaron una humedad inicial del 95.4%. Éstos, en su mayoría lechugas, son producidos en cualquier época del año, y son transportados y enviados a la planta de composta de Bordo Poniente, para ser procesados, sin algún tratamiento previo y sin mezclarlos con otro tipo de residuo (Robles y col., 2003).

Aunque el objetivo de este experimento no es llevar a cabo adecuadamente el proceso de composteo, se sabe que un factor importante en el procesamiento biológico de los desechos orgánicos es tener una adecuada relación C/N y C/P. Además, al tener residuos de diferente estructura y tamaño, se puede mejorar la porosidad al interior de las pilas favoreciendo el suministro de oxígeno, y así disminuir el riesgo de formación de micro-ambientes anaerobios (Sundberg y col., 2006); sin embargo, se trabajó con residuos cuyas características ya se mencionaron, pues son esas las condiciones en que son apilados para el composteo.

Por otro lado, los residuos de hortalizas son fácilmente biodegradables, lo cual favoreció una rápida degradación inicial durante la primera semana de tratamiento; esta degradación también promovió una rápida liberación de agua (no predecible por lo que no fue cuantificada), causada por el rompimiento de los tejidos celulares, aumentando así la producción de lixiviados (ver Figura 9) desde el momento en que los residuos fueron depositados en el suelo, continuó durante la trituración y el pesado, y disminuyó después de las primeras 48 horas.



Figura 9. Liberación de lixiviados

En el presente estudio no se utilizó una mezcla de residuos balanceada como es recomendable en el composteo, si no de residuos apilados y húmedos de hortalizas. Bajo estas condiciones, la biodegradación de los residuos y la producción de lixiviados transformaron la estructura original de la pila en un residuo compacto y saturado en agua durante los primeros nueve días del proceso, siendo más afectadas las pilas de los residuos triturados. Este cambio en la porosidad de las pilas, también causado por la presión del montón de residuos, dificultó la circulación del aire afectando la degradación aerobia y por consiguiente el aumento de temperatura en los residuos. Para atenuar este efecto, se realizaron volteos cada 72 horas, durante diez días con el objetivo de airear y homogenizar el material, sin embargo, continuó la compactación y la formación de zonas de anaerobiosis.

Uno de los componentes de los residuos fueron las tiras de yute, las cuales se usan para amarrar flores y hortalizas. Este material es de difícil degradación debido a que su componente principal es la celulosa, bajo la forma de ligno celulosa (Centro Textil de Castahal, 2007), ver composición en la Tabla 7.

Tabla 7. Composición química del yute

<i>Elementos</i>	<i>%</i>
Ceniza	0.70
Agua	9.72
Grasas Cerosas	0.36
Extracto acuoso	1.06
Celulosa	64.10
Substancias incrustantes	24.06

Bajo condiciones de composteo, durante la etapa termofílica, se favorece el crecimiento de hongos capaces de producir enzimas que hidrolizan los polisacáridos, encontradas comúnmente en compostas y en suelo (Maheshwari y col., 2000). Cuando la materia de fácil degradación se agota, las fuentes de carbono disponibles para el crecimiento de los hongos termofílicos serán principalmente constituyentes ligno-celulolíticos. Estas condiciones podrían permitir la degradación total o parcial de estas tiras de yute, siendo éste otro aspecto a analizar

Las tiras de yute produjeron un efecto de esponjamiento y aunque los residuos de hortalizas fueron totalmente deshidratados al final del proceso, el volumen final de las pilas se afectó (ver Figura 10). Una operación mecánica como el prensado disminuiría aún más el volumen final del residuo.



Figura 10. Residuos a los 35 días del proceso

Es importante mencionar que desde el inicio las muestras tomadas para los análisis fueron residuos de hortaliza, por ser el más perceptible y abundante en la pila, por lo que los resultados de humedad, de materia orgánica y de nitrógeno total durante todo el proceso no consideran a las tiras de yute, por lo tanto no se cuantificó la degradación de éste último componente.

Como el yute afectó al volumen final de los residuos se determinó la proporción de residuo de hortalizas secas y de yute, para saber el efecto de la presencia del yute. La proporción promedio, al final del proceso, fue de: 40% p/p de residuo y 60% p/p de tiras de yute en las pilas de material entero, y de 20% p/p de residuo y 80% p/p de tiras de yute en las pilas de material picado. La diferencia en las proporciones se debió a que las pilas con material picado lixiviaron más, por lo que hubo mayor pérdida de masa del residuo; no significó que el yute pudiera mejorar la degradación aerobia, es decir no actuó como agente texturizante.

Reducción del volumen

En la Figura 11 se aprecia como el volumen disminuyó durante el proceso, de un 100% inicial hasta un 20 a 25 % en las pilas con invernadero. Para la pila testigo el volumen sólo se redujo hasta un 43% respecto al volumen inicial debido a que no se protegió de la lluvia.

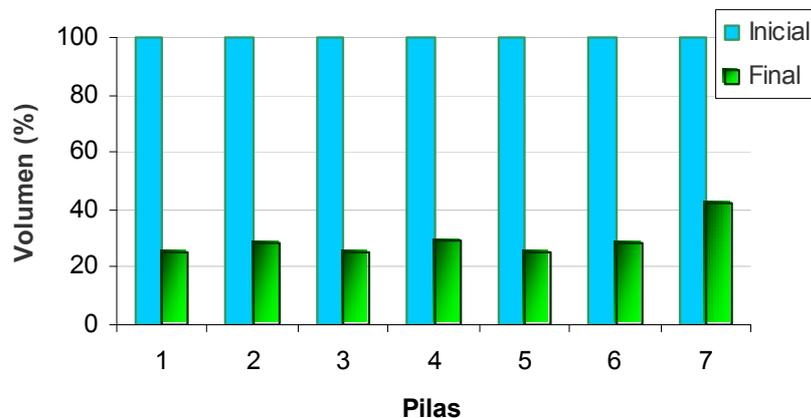


Figura 11. Reducción de volumen

Con los datos de cantidad y humedad de yute se realizaron los cálculos correspondientes para conocer la masa inicial y final de los residuos sin yute; se consideró que por ser un material de difícil degradación, la cantidad de yute seco fue la misma durante todo el proceso. Todos los cálculos para el balance de masa se realizaron despreciando este material.

4.2. Pérdida de peso

El registro diario del peso de las canastillas de control permitió conocer el comportamiento de la pérdida de peso. Un resultado importante es la función del invernadero durante el biosecado, en la pila testigo (pila 7), que no tuvo invernadero, el peso fue variable a lo largo del proceso debido a la constante incorporación de agua en forma de rocío o de lluvia. Durante los primeros 15 días del proceso se observó una reducción del 20% en el peso de la pila 7; en las pilas con invernadero, la pérdida de peso, ΔW , fue de 80% para el mismo periodo de tiempo (ver Figura 12). Estadísticamente se encontró que la pila 7 (control) fue diferente a los seis tratamientos con invernadero (ver anexo estadístico); estas diferencias se debieron principalmente a que esta pila estuvo totalmente expuesta a la lluvia.

Respecto a las pilas con invernadero no se encontró diferencia significativa (ver anexo estadístico), al utilizar residuos picados o enteros. En la gráfica a de la Figura 12 se representa el comportamiento del secado utilizando ductos, y se observa que la disminución de peso se da rápidamente durante los primeros cinco días; en la gráfica b están representadas las pilas 5 y 6 sin ducto, y se observa como esta disminución es más uniforme hasta los 10 días.

Aunque la diferencia no es significativa, se encontró que el uso de los ductos fue benéfico para la eliminación de masa en forma de lixiviados, independientemente de utilizar residuos picados o enteros, debido a que hubo mayor superficie de escurrimiento (ver Tabla 8).

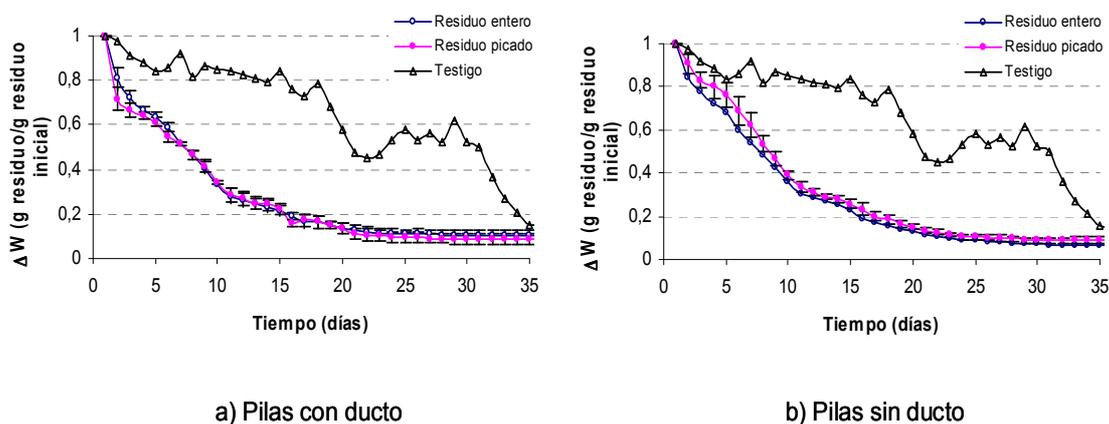


Figura 12. Pérdida de peso en canastillas de control

Generación de lixiviados

Es importante señalar que no se realizó la medición de lixiviados durante el proceso, debido a que en un experimento que precedió a este trabajo, se observó que en pilas de composta de dos toneladas, donde los residuos tenían una humedad similar, no se observó lixiviación, a pesar de que en el primer día se les agregó más de cincuenta litros de agua a cada pila. En el presente trabajo sí hubo lixiviados a pesar de que fueron pilas de 250 kg en promedio, con una altura de 25cm; la liberación de agua se debió a la ruptura de los tejidos celulares. Por ser éste un dato importante en la pérdida de peso, se procedió a hacer la estimación; se utilizó la información expresada en las gráficas de pérdida de peso y se consideró que para todos los tratamientos, el periodo que comprende los días 3 al 11 representan una disminución de peso lineal dada básicamente por la evaporación del agua y en menor medida por la degradación de la materia orgánica. Supuesto lo anterior, se obtuvo la ecuación de dicho periodo, se realizó una extrapolación al día cero para estimar el valor inicial, y la diferencia con el valor inicial real fue la cantidad de lixiviados estimada.

En la tabla 8 se presentan los kg de lixiviados estimados en cada pila, supuestamente generados en los dos primeros días.

Tabla 8. Estimación de pérdida de agua por lixiviados por pila

<i>Pila</i>	<i>kg de lixiviados</i>
1	42.68
2	48.80
3	44.28
4	49.78
5	32.48
6	25.45
7	8.94

En promedio, en las pilas con material entero y con ducto, hubo una producción de lixiviados del 15% respecto del peso inicial; en las pilas con material picado y con ducto fue del 20%; para la pila de material entero y sin ducto fue del 10%, y para la pila de material picado y sin ducto fue de 5%. La cantidad de lixiviados generados supuestos en las pilas con ducto corresponden con los reportados por Zapien (ver en materiales y métodos).

La pérdida de peso de los residuos, monitoreada con las canastillas, debió corresponder con la disminución de humedad, sin embargo en la Figura 13 se observa una variabilidad del porcentaje de humedad a lo largo del proceso debido a lo heterogéneo de los residuos y al muestreo realizado. A partir del día 21 se alcanzó la humedad más baja del proceso en todos los tratamientos, sin embargo la lluvia de éste día modificó nuevamente estos valores, aspecto a considerar si los residuos no tuvieran el invernadero.

Sugni y col. (2005) sostienen que para llevar a cabo un proceso de biosecado debe haber un control de la velocidad de secado durante la etapa inicial, tal que si ésta es lenta permite que los procesos metabólicos involucrados degraden la mayor cantidad de materia orgánica. En éste experimento la velocidad fue lenta dado que se utilizó un flujo de aire natural convectivo y sin alcanzar la mejor eficiencia de los procesos metabólicos debido a las características ya mencionadas de los residuos.

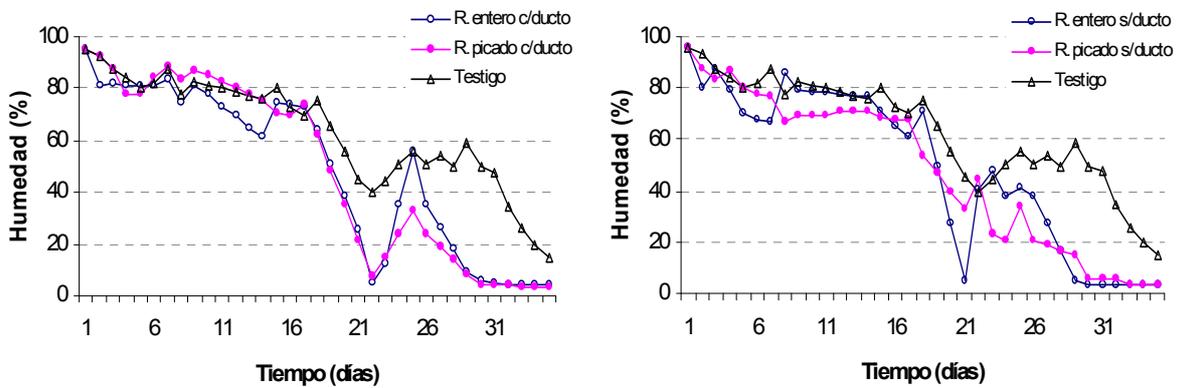


Figura 13. Humedades diarias de los residuos

4.3. Secado de los residuos

El secado de sólidos, en particular de residuos orgánicos, es complejo por la heterogeneidad en su composición, y por consiguiente por la forma apilada en que se disponen. La importancia de este análisis es tener un resultado cuantitativo de la rapidez del secado aún con datos dependientes de parámetros no alcanzados en este trabajo.

Para hacer éste análisis se usaron los datos del contenido de humedad sin la cantidad de lixiviados estimada, ya que el proceso de secado es diferente a un *escurrido*. En la curva de secado de los residuos, el valor de X inicial, común en todos los tratamientos, es de 21.22 kg de agua/kg de residuo seco y corresponde con la humedad inicial del residuo en porcentaje, que es del 95%, determinado experimentalmente. La curva de secado (Figura 14) indica como en todos los tratamientos hay una pérdida constante de agua durante los primeros 11 días, después ésta disminución es más lenta.

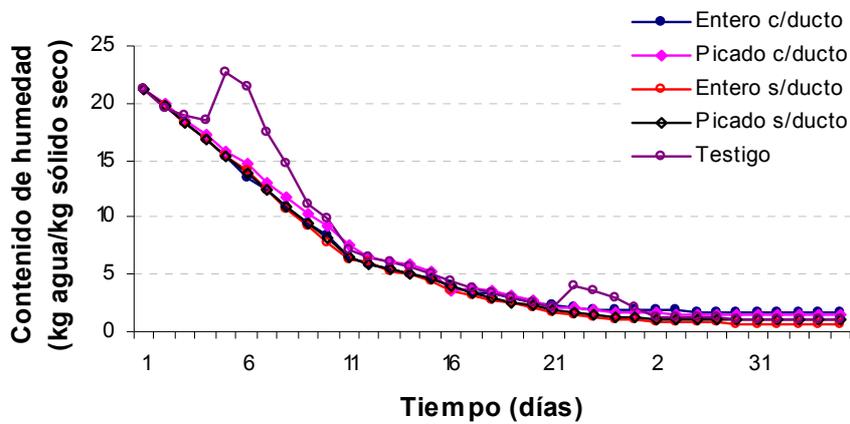


Figura 14. Curvas de secado de todas las pilas

En la curva se observa como la pila testigo tiene un comportamiento parecido al resto de los tratamientos, sin embargo se ven reflejados los días de re-humectación debido a la lluvia (días 4 y 21). Ante éstos resultados se podría decir que el secado sin invernadero puede ser efectivo si hay protección de la lluvia.

La estimación de los tiempos de secado se realizó de tres formas diferentes (ver materiales y métodos), lo que permitió conocer mejor la velocidad del proceso.

1. Método gráfico. Se dividió el proceso en dos etapas, para la primera se ajustan los puntos de la curva del 1 al 11 de manera lineal y para los días 12 al 22 se ajustan al modelo exponencial de Henderson y Pabis. Los resultados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros de la velocidad de secado constante y decreciente

Pila	$X = X_0 + \frac{dx}{dt}t$			$X = X_0 \exp^{(-kt)}$		
	X_0	$\frac{dx}{dt}$	R^2	X_0	k	R^2
1	21.793	-1.4100	0.9994	6.40	0.0939	0.9618
2	21.815	-1.4599	0.9989	6.00	0.1147	0.9645
3	22.009	-1.4636	0.9990	6.17	0.1403	0.9771
4	21.753	-1.2257	0.9969	8.00	0.1014	0.9433
5	21.894	-1.4628	0.9990	7.00	0.1450	0.9943
6	21.857	-1.4440	0.9995	7.04	0.1361	0.9938
7	24.408	-1.417	0.7773	6.48	0.0868	0.9031

Donde X_0 representa los kg de agua/kg de residuo seco; la constante k o dx/dt son los kg de agua/kg de residuo seco día, y t el tiempo en días.

Por ejemplo para determinar el tiempo necesario para disminuir la humedad desde X_0 hasta 10 kg de agua/kg de residuo seco en la pila 2 será de 8.09 días ó 194 h.

2. Método del cálculo de las velocidades de secado (R), se utilizó la siguiente ecuación:

$$R = \frac{Ls}{A} * \frac{dX}{dt}$$

En la Figura 15 a, se observan las dos velocidades de secado para la pila 2: la velocidad de secado constante (donde se inicia con un contenido de humedad de 21.22 g agua/g de sólido seco hasta un valor de 6 kg de agua/kg de sólido seco) y la velocidad decreciente, que se presenta a partir del día 12. Estos comportamientos son similares para las seis pilas con invernadero.

Para la pila testigo no se apreciaron las mismas velocidades, debido a que no hay un control del flujo de agua en los residuos, ver Figura 15 b.

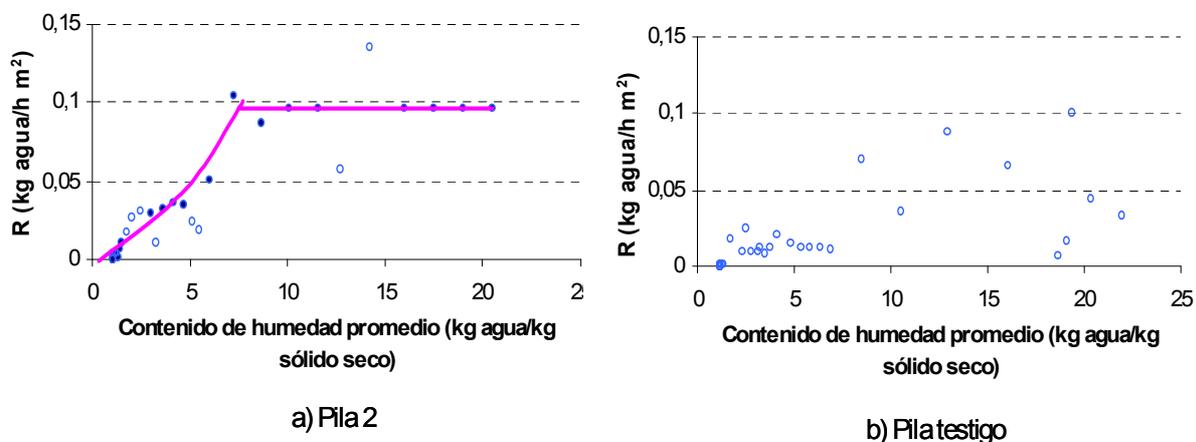


Figura 15. Graficas de velocidades de secado de las pilas 2 y 7

En general, las velocidades de secado constantes *promedio* para los seis tratamientos fueron de 0.08 kg de agua/h m², para esto se utilizó una relación L_s/A de 1.33 kg de residuo seco/m², que resultó de dividir los kg de sólido seco totales en los residuos entre el área de secado, considerando que el área expuesta es de dos superficies de 4 m² cada una. En la tabla 10 se indican los valores de las velocidades de secado de todas las pilas.

Tabla 10. Valores de las velocidades de secado constante en todas las pilas

Pila	L_s/A (kg rs/m ²)	R (kg agua/h m ²)	dx/dt (kg rs/h)
1	1.36	0.08	0.06
2	1.56	0.10	0.06
3	1.00	0.06	0.06
4	1.12	0.06	0.05
5	1.64	0.10	0.06
6	1.29	0.08	0.06
7	0.60	0.04	0.07

Con esto es posible calcular los tiempos de secado (en horas) dentro del periodo de velocidad constante mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{Ls}{A * R} * (X_1 - X_2)$$

De igual forma, el tiempo de secado necesario para disminuir la humedad hasta 10 kg de agua/kg de residuo seco de acuerdo a la ecuación es de: 187 h o 7.8 días; este valor coincide con el experimental, según se aprecia en la Figura 13.

3. Método a partir de la estimación de coeficientes de transferencia de calor. Se utilizaron los parámetros de la Tabla 11, donde se supusieron la velocidad de flujo de aire y el área superficial del material considerando dos superficies de 4 m².

Tabla 11. Parámetros para calcular tiempo de secado

PARÁMETROS		
Área de la pila	8	m ²
T de bulbo húmedo del aire:	21.9	°C
T de bulbo seco del aire:	28.6	°C
Velocidad del aire:	0.2	m/s
Presión del aire:	0.77	Atm
Constante R:	0.082	m ³ atm/ kgmol K

Los resultados encontrados con estas ecuaciones, considerando una pérdida de humedad del 50% son los siguientes:

$$G = 649.45 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$$

$$h_v = 3.126 \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

$$R_c = 0.037 \text{ kg/m}^2 \text{ h}$$

$$m_v = 0.30 \text{ kg/h}$$

$$t = 213 \text{ h } \text{ ó } 8.86 \text{ días}$$

Al comparar los resultados de los diferentes métodos se encontró que el valor de la velocidad en el método gráfico es de 0.08 kg/m² h en promedio en las pilas con invernadero (se convirtió de kg de agua/ kg de residuo día a kg de agua/m² h) y corresponde con el método que utiliza la relación L/A, con estas velocidades, el tiempo de secado para disminuir la humedad al 50% fue de 8 días.

La velocidad de secado que se obtuvo con el cálculo del coeficiente de transferencia de calor es de 0.037 kg agua/m²h con un tiempo de 9 días para la misma disminución de humedad; esto es debido al hecho de que en este cálculo se parte de dos suposiciones.

Si los residuos y las condiciones del proceso lo hubieran permitido, en el biosecado se hubieran logrado temperaturas más altas (de 40 a 50 °) por mayor tiempo, por lo tanto, el tiempo de secado habría disminuido, pero se inhibiría antes el proceso aerobio por la falta de humedad, retrasando también la degradación de la materia orgánica.

Otra consideración importante es la velocidad de aire de secado, pues el uso de un ventilador, como lo hacen Kumar y Tiwari (2006) aumentaría la eliminación de agua; sin embargo es importante controlar dicha velocidad y temperatura del aire, debido a que el objetivo del biosecado es eliminar el agua de los residuos obteniendo un producto estable y útil (Adani, 2002).

Sacilik y col. (2006) en su experimento de secado de tomate, realizan una serie de combinaciones de los parámetros obtenidos con los modelos descritos en la tabla 2; obtienen un arreglo matemático en función de a, b, k y T (con a, b y k dependientes de T y MR), que puede estimar la M en cualquier momento del proceso de secado.

En la presente investigación el modelo de simulación sólo se adaptó a la humedad inicial y al tiempo de secado, sin embargo pueden considerarse variables como área de secado y, temperatura, humedad relativa y velocidad de flujo del aire.

4.4. Balance de masa

El balance de masa propuesto fue:

$$R_o = R_f + L + MO_d + AE$$

La masa inicial (R_o) y final (R_f) de residuos se midieron directamente, la masa de lixiviados (L) fue estimada y la masa de materia orgánica degradada (MO_d) y agua evaporada (AE) fueron calculadas.

Respecto a la cantidad de materia orgánica degradada se obtuvo un valor inicial de 81% en base seca, lo que corresponde a 3.7% en base húmeda, sin embargo los resultados semanales fueron heterogéneos en el transcurso del proceso. En la figura 16 a, se observa que la disminución de la materia orgánica durante la primer semana fue de 35%, en promedio, respecto al valor inicial para

las pilas con residuo entero, al igual que en las pilas con residuo picado, excepto en la pila 6 (con invernadero, con material picado y sin ducto) donde el porcentaje de materia orgánica sólo disminuyó 15%, ver Figura 16 b; Esta diferencia se debió a que en dicha pila se formaron por más tiempo zonas de anaerobiosis, limitándose el proceso la degradación; sin embargo después del día 22 se alcanzan los mismos valores en los seis tratamientos con invernadero, teniendo en promedio un 35% de materia orgánica. A partir de éste día, los parámetros de materia orgánica y pérdida de peso se detienen excepto en la pila 7, donde el porcentaje de materia orgánica continúa disminuyendo hasta llegar a un valor final de 25%; esto se debió a que los residuos de dicha pila fueron constantemente humedecidos, por lo que se permitió la acción microbiana por más tiempo.

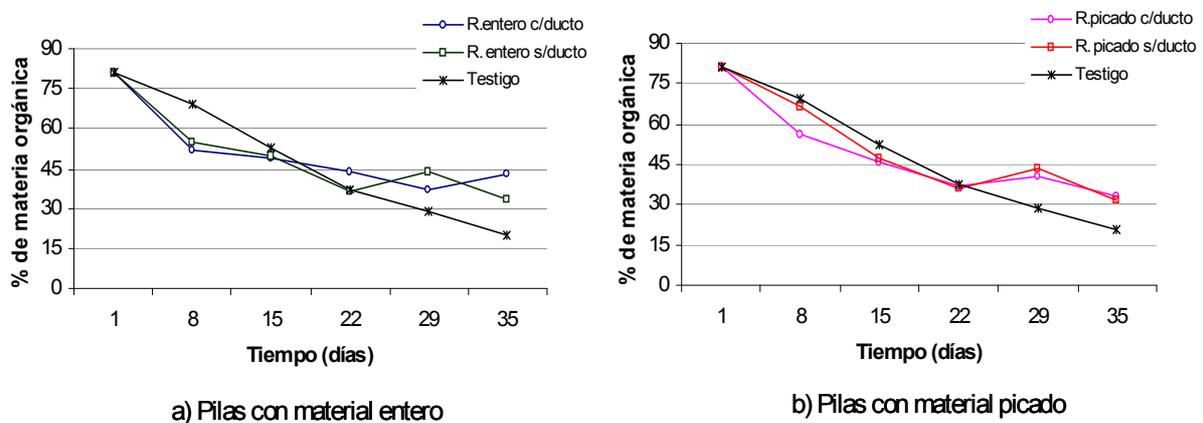


Figura 16. Porcentaje de Materia orgánica.

En la biodegradación de la materia orgánica se obtiene como principales productos del metabolismo microbiano CO₂ y agua, en este experimento no se cuantificó la cantidad de CO₂ generada, en su lugar se realizaron cálculos a partir de las cantidades iniciales y finales de materia orgánica, y a la diferencia se le consideró como la cantidad degradada. En la tabla 12 se presentan las cantidades calculadas y los porcentajes de degradación durante los 35 días en cada pila.

Tabla 12. Degradación de materia orgánica

	<i>Pila 1</i>	<i>Pila 2</i>	<i>Pila 3</i>	<i>Pila 4</i>	<i>Pila 5</i>	<i>Pila 6</i>	<i>Pila 7</i>
kg de residuo seco iniciales	11.97	13.78	9.87	11.00	14.02	10.39	4.12
kg de residuo seco finales	10.24	11.85	9.67	10.91	8.64	9.55	2.26
kg de materia orgánica iniciales	9.72	11.18	8.01	8.93	11.38	8.43	3.35
kg de materia orgánica finales	4.36	5.18	3.29	3.59	2.86	3.05	0.46
% de degradación	55.16	53.65	58.89	59.84	74.83	63.77	86.19

El menor porcentaje de degradación se presentó en las pilas con invernadero y con ducto de ventilación (pilas 1, 2, 3 y 4), que en promedio fue de 56%, esto se debió a que los ductos permitieron una mayor eliminación de agua lo que provocó la disminución de la actividad microbiana, retrasando el proceso de degradación.

En la pila sin ducto y con material entero (pila 5) la degradación fue de 74% ya que la humedad se mantuvo por más tiempo; el efecto de picar el material sin colocar ducto (pila 6) tuvo un efecto de mayor degradación que en las pilas sin ducto, pero menor que en donde se uso material picado, esto quiere decir que el picar inhibió más rápido la acción microbiana por la falta de humedad. La pila testigo presentó la mayor degradación de materia orgánica, 86%, ya que mantuvo por más tiempo una humedad adecuada para la degradación.

Respecto a la cantidad de agua evaporada, se consideró el balance de masa descrito en la sección de materiales y métodos. Los resultados obtenidos para las siete pilas considerando un tiempo de secado de 35 días, se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados del total de agua evaporada

Pila	Agua evaporada (kg)	Agua evaporada (%)
1	199.21	90.46
2	230.41	91.50
3	155.04	91.41
4	173.21	92.10
5	239.83	88.63
6	183.43	91.82
7	66.80	80.79

El porcentaje de agua evaporada es mayor al 88 % en las pilas con invernadero y del 80% en la pila testigo, considerando que en ésta última se tiene un secado directo al sol no controlado.

En la Tabla 14 se aprecia un resumen de los materiales involucrados en el balance.

Tabla 14. Resultados del balance de masa por pila

Pila	R _o (kg)	=	R _f (kg)	+	L (kg)	+	MO _d (kg)	+	AE (kg)*
1	284.5	=	17.51	+	42.68	+	5.32	+	199.21
2	325.3	=	19.99	+	48.80	+	6.00	+	230.41
3	221.4	=	12.16	+	44.28	+	4.72	+	155.04
4	248.9	=	14.32	+	49.78	+	5.34	+	173.21
5	324.8	=	17.59	+	32.48	+	8.52	+	239.83
6	254.5	=	24.83	+	25.45	+	5.38	+	183.43
7	93.2	=	26.80	+	8.94	+	2.89	+	66.80

*la cantidad de AE se obtuvo considerando que el aire de salida está saturado

Se observa que hubo diferencia en el balance de los resultados experimentales y calculados, de acuerdo a la ecuación teórica propuesta. La diferencia tiene varias causas, la principal es que sólo se consideró un tiempo de lixiviación de sólo dos días (por lo que este parámetro deberá ser mejor controlado y cuantificado a lo largo del proceso), el error en la estimación de los lixiviados, la

pérdida no cuantificada en mermas a lo largo de todo el proceso, y a los errores en los métodos utilizados en la cuantificación de materia orgánica.

Debido a que este fue un experimento exploratorio, no se midió la velocidad del aire de secado, en su lugar se determinó el flujo de aire necesario teórico para eliminar el agua a evaporar reportada en la tabla 13; el cálculo se hizo para los 35 días obteniéndose los siguientes resultados promedio: 550 m³/día en las pilas con material entero y con ducto, 352 m³/día en las pilas con material picado y con ducto, 481 m³/día en la pila con material entero sin ducto, 296 m³/día en la pila con material picado sin ducto y 226 m³/día en la pila testigo. Los resultados fueron función de la humedad absoluta del aire a la entrada y a la salida del proceso y de la cantidad de residuo inicial en cada pila, por eso es que los flujo requeridos son diferentes y que en la pila testigo el flujo requerido fue menor, debido a que la cantidad de residuos fue menor y a que el aire del ambiente siempre tuvo una humedad absoluta más baja que la que presentaron los invernaderos.

Conforme el material a secar va perdiendo humedad, se requiere menor flujo de aire bajo ciertas condiciones de humedad; por este efecto se obtuvo que la humedad absoluta antes del recambio fue mayor que la registrada después del recambio durante los primeros días del proceso, y conforme el residuo fue perdiendo humedad, la diferencia fue disminuyendo.

En la figura 17 se presenta el perfil de flujos de aire calculado en m³/día para la pila 1, se observa como la lluvia del día 3 aumentó el requerimiento del aire en el proceso.

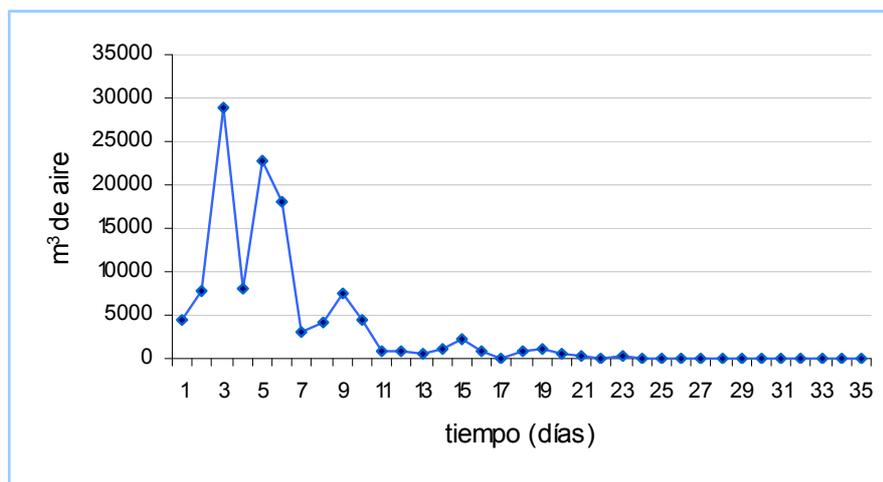


Figura 17. Flujo de aire calculado en m³/día para la pila 1.

Una alta humedad relativa del aire de secado es inconveniente en la eficiencia del proceso, pues se ha reportado, que la disminución del tiempo de secado en un secador de túnel, respecto a un secador solar directo, se debe a que en el secador de túnel la temperatura es mayor y la humedad relativa es menor, favoreciendo así la eliminación de agua libre (Sacilik y col., 2006). Un sistema de invernadero como el del presente trabajo es similar al secador de túnel, sin embargo no fue posible utilizar un secador para eliminar en lo posible la humedad del aire de entrada.

Efecto del ducto de ventilación y de la trituración de los residuos:

En la Figura 18 se representan los datos de humedad relativa después del recambio, se encontró que en las pilas con ducto y material entero el valor de la humedad fue del 70 % en promedio la mayor parte de tiempo, caso contrario en las pilas con ducto y material picado, donde el valor de la humedad fue más variable, debido al bloqueo los flujos naturales de ventilación al interior de la pila, llegando en momentos la saturación, ver Figura 18 a. En las pilas sin ducto la humedad relativa del aire fue de 90% la mayor parte del tiempo, siendo las más altas en comparación con el resto de las pilas, y llegando a la saturación durante los días de lluvia (días 5, 6, 7, 22, 23), ver Figura 18 b. La pila 7 actuó como un control de secado directo al sol, la humedad relativa del aire se mantuvo alrededor del 50%, excepto en días de lluvia, cuando se alcanzaron valores del 80%. Para el día 20 la humedad relativa del aire dentro de los invernaderos es más constante, con valores de 70 a 90% en las diferentes pilas; para el día 31, cuando los residuos ya alcanzaron la mínima humedad, la humedad relativa del aire se mantiene pues ya no hay evaporación de agua, además el clima en los últimos días es frío y seco.

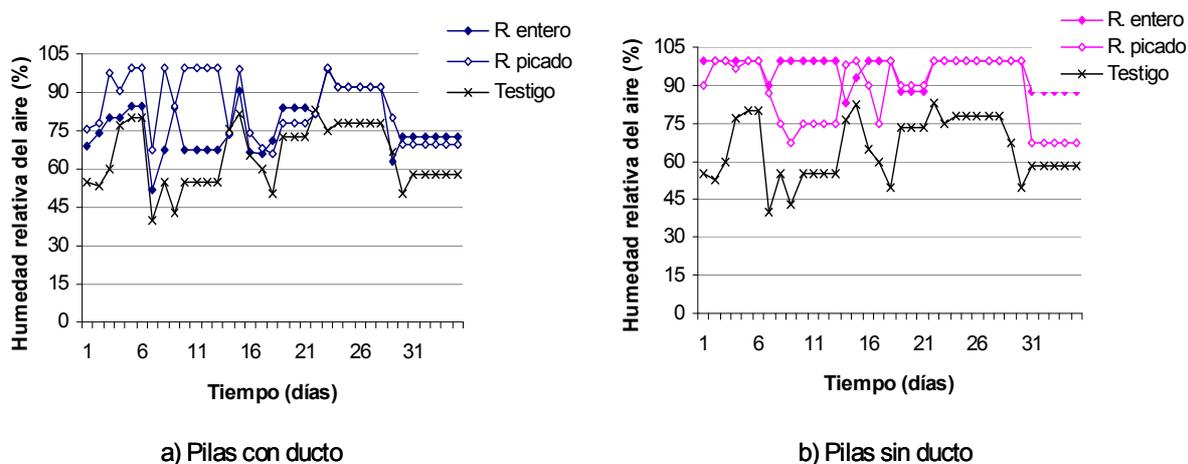


Figura 18. Humedad relativa del aire dentro de los invernaderos y del ambiente (Pila testigo)

Para mantener una humedad relativa baja del aire dentro del invernadero, Kumar y Tiwari (2006) usaron un ventilador para aumentar el flujo de aire y acelerar el proceso de eliminación del vapor de agua, por lo sería interesante analizar el la evolución del proceso de biosecado controlando éste parámetro.

Humedad y volumen final de los residuos:

En la Figura 19 se presenta la humedad final de los residuos en cada pila, y como se esperaba, la humedad fue menor en las pilas con invernadero respecto a la testigo. La pila 5, conformada de material entero y sin ducto, perdió menos humedad que el resto de las pilas con invernadero, con un valor final de 6.83%; en la pila testigo la lluvia modificó el contenido de agua en los residuos, obteniendo a los 35 días una humedad de 14.64%, la cual también es útil si se considera al proceso como un pre-tratamiento de residuos con alto contenido de humedad.

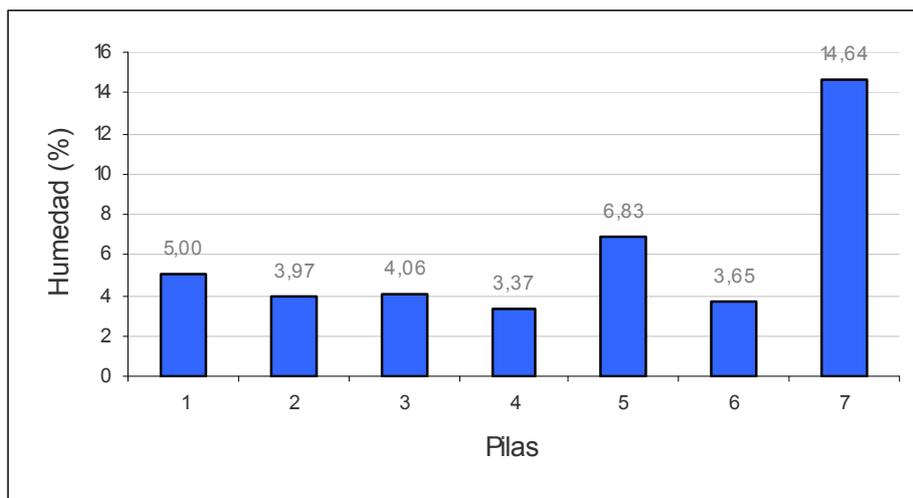


Figura 19. Humedad final de los residuos en cada pila

4.5. Temperatura

Tr: temperatura en los residuos

Monitorear la temperatura de los residuos en el centro y en la superficie de la pila permitió encontrar las diferencias entre estos dos puntos. Durante los primeros quince días hubo

diferencias entre éstas dos temperaturas, después de este tiempo, que coincide con la disminución del peso en un 75% ya no hay más diferencias, ver el caso de la pila 1 en la Figura 20. La temperatura en la superficie superó la temperatura del aire de entrada (T_{aire}) durante los primeros trece días, excepto después de la drástica disminución de la temperatura ambiente que se presentó los días 5 y 6, lo cual provocó que la temperatura de los residuos en la superficie fuera menor que la del aire de entrada en los días 7 y 8.

Cayuela y col. (2006) reportan que en condiciones de composteo, las temperaturas que se alcanzan son de 45 a 50°C. Las temperaturas alcanzadas fueron bajas debido al pequeño tamaño de las pilas y a la humedad inicial alta (95%). Con un tratamiento previo como un mezclado con residuo menos húmedos o con residuos inoculados, se podría alcanzar un desarrollo termofílico para favorecer una mayor eliminación de vapor de agua.

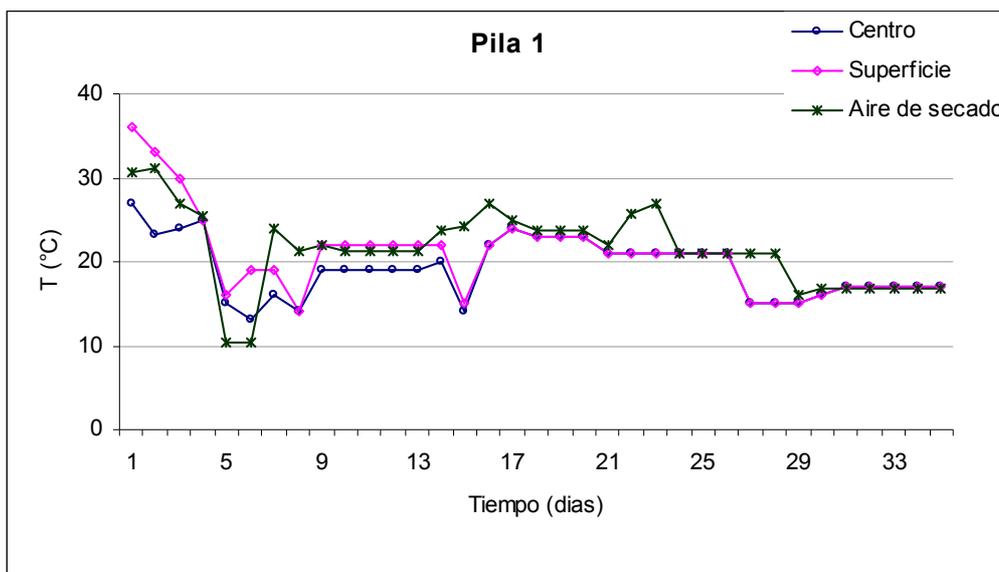


Figura 20. Comportamiento de temperaturas de residuos en pila con ducto

El análisis estadístico realizado con las temperaturas en centro y superficie de todos los tratamientos y el control (y después del recambio de aire), presentó diferencias significativas durante los primeros quince días del proceso (ver anexo estadístico). Con estos resultados se tiene que las temperatura del centro y superficie son siempre diferentes en todas las pilas con ducto y en la pila control.

En las pilas donde no hubo ducto, estas dos temperaturas son las mismas en la mayor parte del proceso debido a que no hay enfriamiento en la parte inferior de los residuos (ver Figura 21).

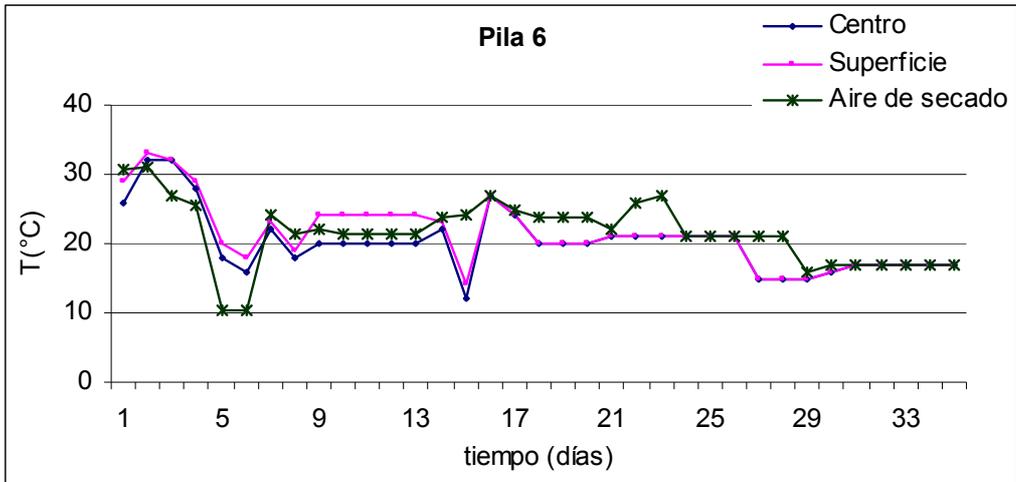


Figura 21. Comportamiento de temperatura de residuos en pila sin ducto.

Los resultados nos permiten suponer que la temperatura de la superficie es mayor que la del centro en las pilas con ducto, por dos aspectos: 1) mayor calentamiento por el efecto invernadero y 2) mayor degradación aerobia por una mejor aireación.

Además de las diferencias entre las temperaturas en el centro y en la superficie se encontraron diferencias de todos los tratamientos respecto a la evolución del proceso. Se analizaron las temperaturas en la superficie de todas las pilas de residuos y se observaron dos comportamientos: del día 1 al 13 y del 14 al 35 (ver Figura 22); éstos coinciden con los periodos de velocidad de secado constante y decreciente que se mencionaron en el punto 4.3.

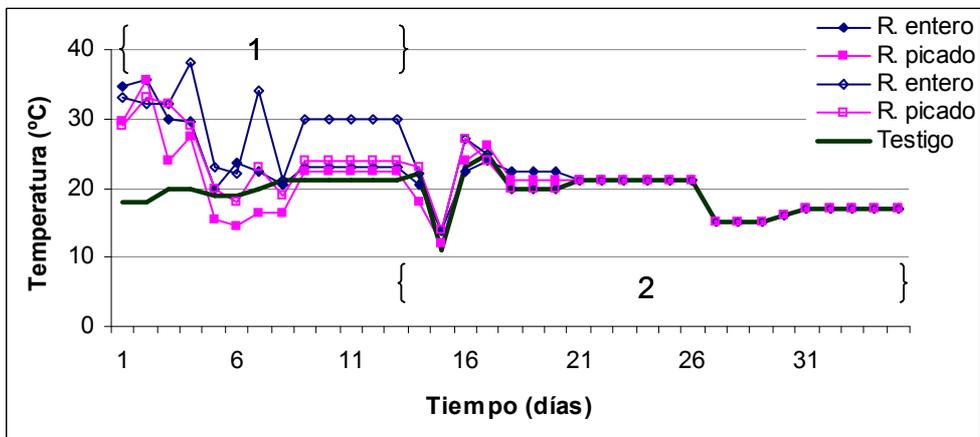


Figura 22. Temperatura superficial de residuos de las siete pilas

Dentro del primer comportamiento o periodo de velocidad constante, se presentaron las temperaturas más altas en los residuos, 30 – 36 °C (del día 1 al 4) y con una temperatura promedio del aire del invernadero entre 25 (para las pilas con ducto) y 35°C (para las pilas sin ducto). De acuerdo con la literatura (Finstein y Hogan, 1993), las temperaturas mesofílicas (alrededor de 35°C) o moderadamente termofílicas (40 – 45 °C) son más efectivas que las termofílicas (55 – 70 °C) para propósitos de degradación, cuando la humedad y la concentración de oxígeno son óptimos.

Respecto al lo anterior se consideró que el periodo de mayor generación de calor, debido a la biodegradación, fue durante los primeros cuatro días. La lluvia de los días 5, 6 y 7 trajo una disminución en la temperatura ambiente (de 30 a 10°C) así como las nuevas condiciones ocasionadas por los lixiviados (disminución de porosidad y formación de zonas con alto contenido de agua), afectaron la temperatura del residuo y por consiguiente alteraron las condiciones mesofílicas logradas. Después de ésta alteración climática volvió a aumentar la temperatura de la pila de residuos, pero sin alcanzar las temperaturas inicialmente logradas.

En el segundo comportamiento, o periodo de velocidad decreciente, la temperatura de los residuos ya no se afecta por la temperatura del aire del invernadero, la temperatura es la misma en las siete pilas.

Relación de la temperatura de los residuos (T_r) con la del aire dentro del invernadero (T_a) y la del medio ambiente (T_m):

En la figura 23 se presentan T_a , T_m y T_r de la pila 1, se observa que al inicio del proceso la temperatura del residuo es mayor que la del aire del invernadero, lo que indica un efecto de calentamiento independiente del efecto invernadero a pesar de que en esos días el clima es caluroso y soleado. Con el transcurso del tiempo se observa que la T_r disminuye, al grado de ser semejante a la temperatura ambiente registrada a las 9 hrs., y esto coincide con el día en que se ha perdido la mayor cantidad de agua (día 9). T_a es 5 grados mayor que T_r , en promedio.

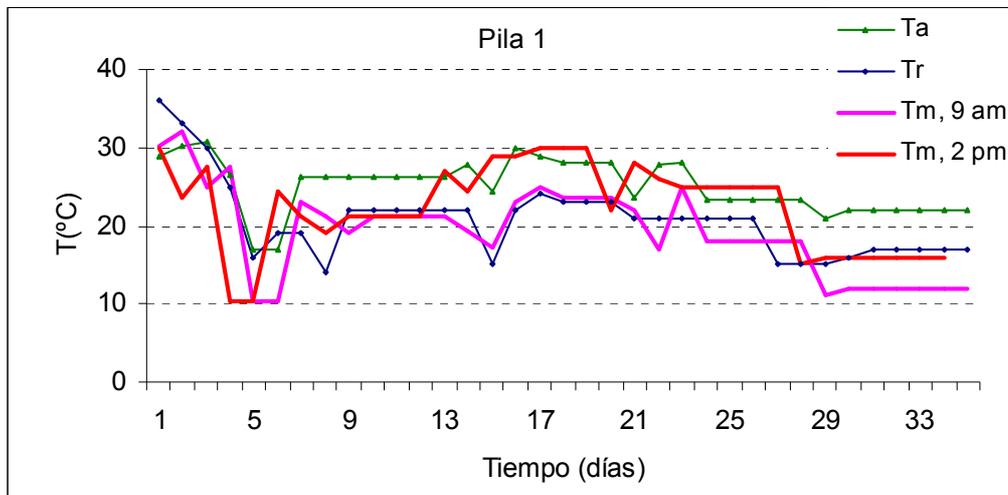


Figura 23. Temperaturas de residuos, invernadero y ambiente

La pila testigo es estadísticamente diferente del resto de los tratamientos. Las temperaturas Ta, Tm y Tr son las mismas en la pila testigo cuando se ha perdido la mayor cantidad de agua. La tabla con las diferencias significativas se encuentra en el anexo estadístico.

Las temperaturas del aire dentro del invernadero fueron diferentes a las temperaturas de los residuos en todas las pilas, así como a la temperatura del medio ambiente.

La temperatura del aire del invernadero de la pila 1 es diferente de la temperatura del aire de los invernaderos de las pilas 4, 5 y 6; la temperatura del aire de los invernaderos de las pilas 1, 2 y 3 son diferentes del aire de la pila 6.

La temperatura de los residuos de la pila 2 es diferente de la temperatura de los residuos de la pila 4; la temperatura de los residuos de la pila 5 es diferente de la temperatura de residuos de las pilas 1, 3, 4 y 6; y la temperatura de los residuos de la pila 4 es diferente de la temperatura de los residuos de la pila 6.

En general, para todo el proceso las temperaturas del aire dentro de los invernaderos, las temperaturas de los residuos y la temperatura del ambiente fueron diferentes. La temperatura del aire en los invernaderos también varía entre sí, siendo diferentes las pilas 5 y 6 que no tienen ducto.

La temperatura del aire dentro de los seis invernaderos fue superior (entre 5 y 10 °C) a la temperatura del ambiente. Particularmente, las pilas sin ducto de ventilación alcanzan las temperaturas más altas (hasta 35°C) como se aprecia en la Figura 24 b. Para las pilas con ducto

se obtuvo que las formadas por residuos picados alcanzan temperaturas de 3 grados más que las pilas con residuos enteros, debido a que en los residuos picados limitaron el flujo del aire a través del ducto, manteniendo el aire caliente por más tiempo (Figura 24 a). El aire del medio ambiente siempre presentó una temperatura menor que el aire de todos los invernaderos, entre 5 y 10 grados en promedio.

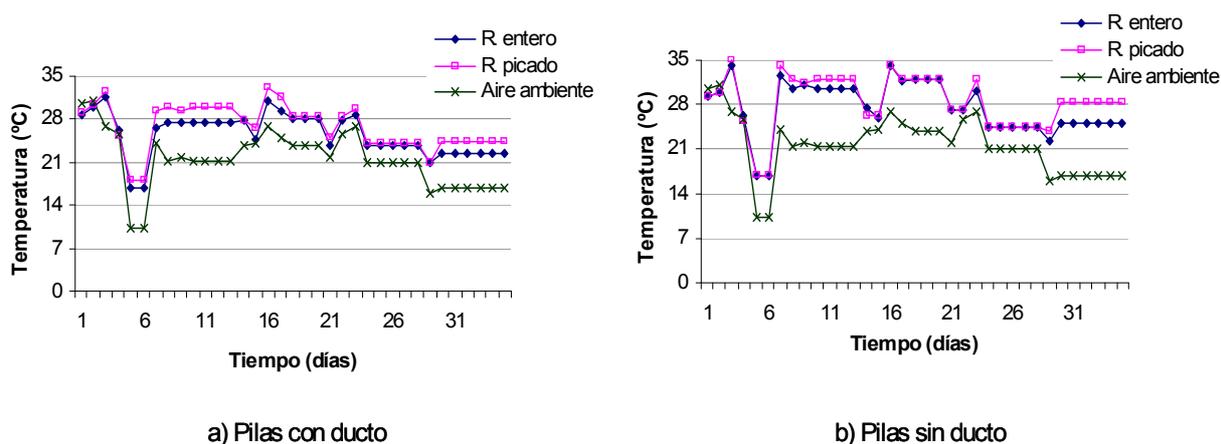


Figura 24. Temperatura del aire dentro de los invernaderos y del ambiente.

4.6. Efecto de biosecado

El proceso de secado en invernadero fue resultado de dos efectos: 1) la concentración de energía solar en forma de calor al interior del invernadero, y 2) la generación de calor metabólico debido a la actividad microbiana aerobia de los residuos; este último efecto le da al proceso el nombre de biosecado.

El invernadero tiene como función principal en este trabajo, aumentar la temperatura del sistema respecto al exterior y por consiguiente, aumentar más rápidamente la temperatura del sólido húmedo que se encuentre dentro. Por sí mismos, los residuos no pueden tener una temperatura mayor a la del aire, a menos que exista un proceso de generación de calor resultado de la degradación metabólica realizada por los microorganismos presentes; este fenómeno se presentó al menos en los primeros cuatro días según las temperaturas alcanzadas presentadas en la Figura 22.

Después de que se alteraron las condiciones mesofílicas por la baja drástica de la temperatura ambiente y de que se eliminó el mayor contenido de agua (por evaporación y por lixiviación) la

temperatura de los residuos volvió a aumentar, pero ya no superó a la temperatura ambiente; esto indica que aunque continuó la degradación de la materia orgánica (de acuerdo a lo reportado en la Figura 16), la limitada generación de calor metabólico no fue suficiente para eliminar agua de los residuos como lo fue la energía del efecto invernadero.

En el tratamiento de residuos domésticos por biosecado realizado por Adani (2002), se muestra una fase Lag de 15 horas, donde se alcanzaron temperaturas de 45, 60 y 70°C, a partir de las cuales se inició la aireación forzada para mantener estas temperaturas en diferentes reactores. Estos autores dejaron que el biosecado continuara hasta que la temperatura de los residuos (T_r) fuera igual a la temperatura ambiental lo que indicó el final del proceso. Para este autor, ésta disminución de temperatura en el centro de los residuos indicó el abatimiento de la actividad microbiana debido a la limitación de agua (efecto de secado) y/o a la degradación completa de la materia orgánica degradable (efecto de degradación). El agua es esencial para la actividad microbiana, por lo que la degradación con un bajo contenido de humedad podría disminuir esa descomposición (Adani y col. 2002).

En nuestro experimento la disminución temprana de temperatura en el residuo no se debe a la falta de nutrientes o de agua, sino a las condiciones climáticas inconvenientes.

4.7. Balance de energía

El biosecado se consideró como un proceso de saturación adiabática. Como resultado de la difusión y la transferencia de calor entre el gas y el líquido, el gas sale en condiciones de humedad y temperatura diferentes a aquellas con las que entró.

Con la ecuación del balance de agua se obtiene la ecuación del balance de entalpía:

$$A_1 * H_1 + B_1 * H_l = A_1 * H_2$$

Sin embargo como las condiciones del aire no se controlaron, hay días donde las condiciones del aire de entrada son de saturación; por lo tanto no se puede tomar como referencia para el requerimiento energético a lo largo del proceso.

Los resultados de la comparación entre la entalpía del aire bajo las condiciones de entrada y la entalpía en la saturación adiabática se obtuvo una energía: $\Delta H = H$ de saturación adiabática – H bajo las condiciones de entrada.

Tabla 15. Energía necesaria para eliminar agua.

Dia	ΔH (Kcal)						
	Pila 1	Pila 2	Pila 3	Pila 4	Pila 5	Pila 6	Pila 7
2	28364.67	19877.51	11749.79	5826.09	0.00	2691.70	54653.35
3	45114.57	49097.28	29464.37	28785.85	0.00	0.00	17955.58
4	117628.26	45612.06	0.00	7141.76	0.00	0.00	4835.00
5	40352.20	11340.42	15454.99	0.00	0.00	3627.56	0.00
6	30493.00	15491.86	0.00	0.00	0.00	0.00	4613.21
7	24214.30	5920.32	0.00	0.00	0.00	0.00	13344.10
8	23530.60	51867.19	26437.86	32190.37	17579.55	21298.02	53309.05
9	26882.93	29086.00	0.00	0.00	0.00	30406.02	38570.76
10	16604.29	16720.80	7762.28	0.00	0.00	29004.56	15637.81
11	28519.38	23176.91	0.00	0.00	0.00	25805.43	21026.42
12	5984.61	8877.44	0.00	0.00	0.00	7328.13	2578.34
13	5092.19	3146.12	0.00	0.00	0.00	5552.82	2661.46
14	3963.76	3791.11	0.00	0.00	0.00	5363.88	2570.90
15	5284.85	4222.78	2951.43	5490.25	4258.56	267.86	1446.78
16	2727.27	1377.14	320.17	0.00	2068.13	0.00	1219.23
17	5075.78	7189.78	4653.86	0.00	0.00	3012.32	3548.69
18	0.00	1898.24	542.13	4498.07	0.00	2157.80	1178.12
19	2918.20	3281.08	2654.94	4286.57	0.00	0.00	1616.47
20	3323.86	1708.89	662.85	3286.22	1291.94	952.46	798.09
21	1764.38	1302.39	844.51	2926.48	1155.95	853.93	715.53
22	492.66	562.16	103.06	1076.76	499.17	338.78	0.00
23	356.92	434.91	125.60	878.44	0.00	0.00	889.98
24	112.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1276.45
25	0.00	30.02	0.00	77.58	0.00	0.00	1353.15
26	0.00	29.67	0.00	75.36	0.00	0.00	694.78
27	0.00	58.67	8.95	36.57	0.00	0.00	35.56
28	0.00	57.30	8.87	36.02	0.00	0.00	34.86
29	0.00	55.94	8.80	35.46	0.00	0.00	34.17
30	0.00	163.26	61.16	69.98	0.00	0.00	35.89
31	0.00	76.65	0.00	69.84	0.00	0.00	0.00
32	0.00	0.00	0.00	69.27	33.36	0.00	0.00
33	0.00	75.66	0.00	0.00	49.14	0.00	0.00

34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Los resultados de la Tabla 15 muestran como la entalpía del aire es positiva en todo momento en las pilas 1 y 2 (que contienen material entero y ducto), lo que significa que las condiciones al interior del invernadero favorecen la evaporación del agua. Los valores de cero en las pilas 3 y 4 indican la afectación por el residuo picado que obstruyó el flujo de aire, provocando que el aire no eliminara agua por estar inicialmente saturado. Los resultados de las pilas 5 y 6 muestran como la mayor parte del tiempo, el aire de secado no fue útil por tener una humedad relativa muy alta (mayor a 80%) debido a la compactación de los residuos y a la ausencia del ducto.

En teoría, la energía necesaria para evaporar el agua es proporcional a la cantidad de masa a evaporar considerando el calor latente de vaporización del agua a la temperatura de los residuos en la superficie. En el presente trabajo, la energía calculada mediante la diferencia de entalpías, obtenidas de la carta psicrométrica, es mayor que la teórica (ver anexos). Esta diferencia se debió a que en el experimento se supone una saturación al siguiente día, siendo que durante los primeros días del proceso, todos los invernaderos se saturaban en las primeras horas, por lo que existen energías calculadas de cero. Lo anterior indica que un recambio del aire diario de una hora no es suficiente debido al que el interior se satura rápidamente.

4.8. Nitrógeno total

Los análisis de laboratorio indican que el nitrógeno total inicial fue de 1.99% en base seca, sin embargo este valor puede no ser constante en toda la pila debido a la composición heterogénea de los residuos; además la concentración de nitrógeno a lo largo del proceso depende de la biodegradación de los residuos (ver Figura 25).

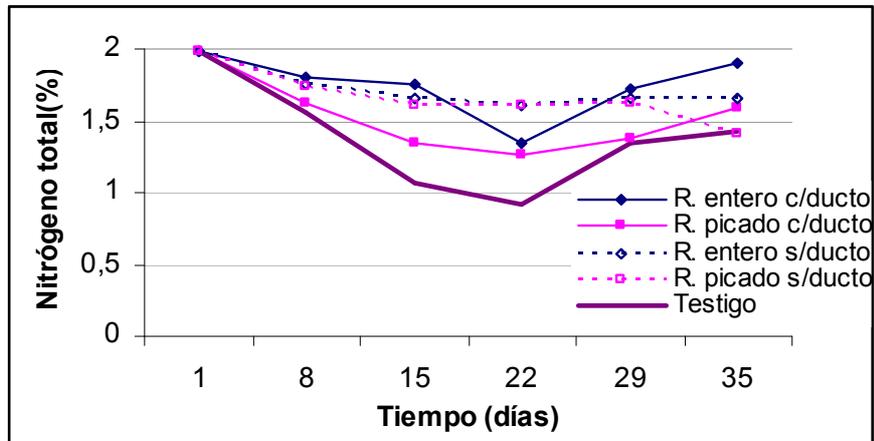


Figura 25. Porcentaje de nitrógeno total durante el proceso.

Los resultados muestran que dentro del periodo de secado constante, el nitrógeno disminuyó un 50% en la pila control, un 30% en las pilas con material picado y sólo un 15% en las pilas con material entero. Esta pérdida de nitrógeno correspondió con el periodo de velocidad de secado constante y con la disminución de la materia orgánica, debido al proceso de biodegradación. Después del día 22 la tendencia cambió (salvo para las pilas 4 y 7) mostrando un aumento de este elemento, esto se debió probablemente a que durante el resto del proceso se degradó de manera más lenta la materia orgánica nitrogenada.

Al igual que en la disminución de materia orgánica, los lixiviados también afectaron en esta disminución, debido a que éstos también contienen materia orgánica y nitrógeno orgánico y/o amoniacal.

Tognetti y col. (2007) reportaron una disminución global de la concentración de nitrógeno total en sus tratamientos de composteo con residuos triturados y no triturados, sin embargo la pérdida de nitrógeno total fue especialmente notable en los tratamientos con residuos no triturados. En el presente trabajo el efecto es contrario, los residuos triturados presentaron una mayor disminución de la concentración del nitrógeno. Estos resultados no corresponden con los obtenidos en nuestro experimento, en parte por la no cuantificación del nitrógeno en los lixiviados y por la diferencia en el tipo de residuo y condiciones del proceso.

4.9. Resumen de los parámetros del residuo.

En la Tabla 16 se resumen los parámetros de los residuos antes y después de los 35 días de tratamiento:

Tabla 16. *Parametros iniciales y finales de los residuos*

<i>Parámetro</i>	<i>Inicial</i>	<i>Final en pilas con invernadero</i>	<i>Final en pila Testigo</i>
Humedad	95.48%	3-6%	14.6%
Volumen	100%	25%	42%
Masa	100%	5-9%	18%
M. O.	81.16%	40%	20%
N. total	1.99%	1.25-1.75 %	1.25%

Cuando comparamos los resultados iniciales con los de composición de lechuga (tabla 3 de la sección 3.1), se tiene que la humedad inicial de los residuos utilizados en el presente trabajo corresponde con el valor teórico de 95.5%. La materia orgánica (M. O.) de 3.65%, en base húmeda, tiene relación con el contenido de carbohidratos totales teórico (3.2 – 3.8%). Por último, el nitrógeno total inicial calculado es de 0.09% en base húmeda (que representa el 1.99% en base seca) y al considerar un factor de 13 para convertir el nitrógeno en proteína corresponde, el valor es de 1.17% que corresponde con el 1% de proteína en base húmeda.

5. CONCLUSIONES

1. El biosecado de residuos hortícolas es un proceso que reduce la masa y el volumen, debido a la evaporación del agua y a la degradación parcial de la materia orgánica.
2. En este trabajo se observaron dos velocidades de secado en todas las pilas: una velocidad constante con una duración de 11 días, seguida de una velocidad decreciente con una duración de 22 días.
3. La mayor pérdida de peso se dio en el periodo de secado constante (60-70%) y en menor proporción en el periodo decreciente (20-30%). La reducción de la materia orgánica fue de 50% y 15%, respectivamente.
4. No se alcanzó la fase termofílica o por lo menos una fase mesofílica estable e independiente de las condiciones climáticas debido a las características del residuo. Las temperaturas alcanzadas en los residuos durante los primeros cuatro días fueron de 30 a 36 °C, por lo que la reducción de masa debida a la evaporación se debió en mayor medida al efecto del invernadero que al biosecado.
5. Los ductos de ventilación mejoraron la pérdida de peso en forma de lixiviados, siendo mayor en las pilas con residuos triturados.
6. La rápida saturación del aire dentro de los invernaderos y su permanencia hasta el recambio del siguiente día, indicó que los recambios de aire realizados no fueron suficientes para tener una eliminación eficiente de dicho vapor.
7. El método para la determinación de nitrógeno fue deficiente ya que no hubo una tendencia en los resultados, por lo que se deben considerar todas las vías de su transformación, En general la pérdida final fue entre 5 y 30% en los tratamientos con invernadero y del 30% en la pila testigo.
8. Se obtuvo un residuo biosecado de disposición más segura para el ambiente: se reducen los lixiviados y la generación de biogás; la estabilización de los residuos se debió a la disminución de la humedad y de la materia orgánica.
9. La reducción del volumen permitirá menores costos en el transporte y disposición.

6. RECOMENDACIONES

1. Analizar el comportamiento y tiempo de biosecado usando pilas de mayor tamaño, con material texturizante, y/o mezclando con residuos con menos contenido de humedad, para evitar la compactación ocasionada por la liberación de lixiviados y favorecer el desarrollo mesofílico o termofílico durante un mayor periodo.
2. Recurrir a la técnica de cultivo iniciador para activar el metabolismo de degradación aerobia y alcanzar en menor tiempo temperaturas termofílicas, aumentando de esta forma la producción de calor en la pila y haciendo al biosecado menos sensible a los cambios drásticos de temperatura ambiente.
3. Hacer los recambios de aire con mayor frecuencia durante los primeros días del biosecado o mejorar el intercambio de aire con sopladores o ventiladores en los ductos.
4. Cuantificar los lixiviados para determinar las proporciones de pérdida de agua lixiviada y evaporada, y considerarlas en los cálculos de pérdida de peso.
5. Determinar la irradiación solar y la capacidad calorífica del residuo para poderlos considerar en el balance energético y estimar el calor debido al efecto invernadero.
6. Utilizar una pila con residuos estériles para diferenciar el calor del efecto invernadero y el calor metabólico generado por los organismos presentes en los residuos. Con estos datos comparar la pérdida de masa debida al secado en invernadero y la pérdida de masa debida al biosecado.
7. Para evitar problemas como la humidificación del aire del invernadero y el uso de ductos se recomienda analizar el secado directo al sol con protección durante la lluvia y por la noche, como método alternativo.
8. Realizar un muestreo más representativo, es decir, que abarque diferentes puntos en centro y superficie de la pila de residuos; también utilizar más canastas muestreadoras para dar seguimiento a la pérdida de peso.
9. Los análisis de materia orgánica y nitrógeno total no son indicadores suficientes de degradación, se deben utilizar análisis más completos como: la relación de sólidos volátiles y sólidos totales, la medición de CO₂ y O₂, la estimación de la biomasa involucrada por el método del INT (Iodofenil-nitrofenil-feniltetrazolio).

10. Debido a que este trabajo fue exploratorio, se recomienda un experimento en condiciones controladas de laboratorio como: temperatura y flujo de aire, temperatura de los residuos, composición de residuos (relación adecuada C:N y humedad) y controles con residuos estériles, para poder diferenciar los calores involucrados.
11. Se recomiendan análisis de caracterización del producto obtenido como: i) contenido energético para disponerlo como combustible, ii) análisis fitotóxicos y microbiológicos (como índice de germinación, huevos de helminto, *E. coli*, patógenos, etc.), para su disposición en suelos y ii) análisis cualitativos para su disposición como ingredientes de un alimento balanceado para animales.

7. REFERENCIAS

1. Adani, F., Baidoa, D., Calcaterrab, E. y Genevinia, P. 2002. The influence of biomasa temperatura on biostabilization-biodrying of municipal solid waste, *Bioresource Technology*, Volumen 83: 173-179
2. Aversa, M., Curcio, E., Calabro, V., Iorio, G., 2007, An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. *Journal of Food Engineering*, Volumen 78: 922-932.
3. Baeta-Hall, L., Céu Sáàgua, M., Bartolomeu, M. L., Anselmo, A. M., y Rosa, M. F., 2005, Biodegradation Of Olive Oil husks in composting aereated piles, *Bioresource Technology*, Volumen 96: 69-78.
4. Barrington, S., Choinière, D., Trigui, M. y Knight, W., 2003, Compost convective airflow under passive aereation, *Bioresource Technology*, Volumen 82: 259-266.
5. Cayuela, M. L., Sánchez-Montero, M. A. y Roig, A., 2006, Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes, *Process Biochemistry*, Volumen 41: 616-623.
6. Centro Textil de Castahal, 2007. Composición química de yute. Disponible en www.castanhal.com.br/espanhol/juta.htm. Consultado el 25 de Marzo.
7. Dias, S. R. S., Futana, F. P. L., Garvalho, J. A., Couto, H. S., Jr., y Ferreire, M.A., 2004, Investigation of food drain drying with pulsting air flows. *International Communicationes in Heat and Mass Transfer*, Volume 31, Issue 3, p. 387-395
8. El-Beltagy, A., Gamea, G. R. y Amer E sa, A. H., 2007, Solar drying characterisitics of strawberry, *Journal of Food Engineering*, Volumen78: 456-464.
9. Finstein, M. S., Hogan, J. A., 1993. Integration of compostig process microbiology, facility structureand decision-making. En: Hoitink, H. A. J., Keener, H. M., *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and UtilizationAspects*. The Ohio State University, Wooster, OH, 1-23
10. Gobierno del D. F. 2007. Dirección General de Servicios Urbanos del Gobierno del D. F. Disponible desde www.obras.df.gob.mx/servicios-urbanos/residuos/rec-trans-sel-final.html. Consultado el 30 de Abril.
11. Iguaz, A., Esnoz, A., Martínez, G., Lopez, A. y Vírseda, P. 2003. Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. *Journal of Fodd Engineering*. Volumen 59: 151-160.
12. Instituto Nacional de Nutrición Salvador Zubirán, 2007. Composición química de los alimentos. Disponible desde www.innsz.mx/alimentos/ml_scroller/cd2.html. Consultado el 18 de Mayo.
13. Jain, D. y Tiwari, G. N., 2004. Effect of greenhouse on crop drying under natural and torced convection II. Thermal modeling and experimental validation. *Energy Conversion Management*, Volumen 45: 765-783.
14. Jain, D., 2005, Modeling the performance of greenhouse with packed bed thermal storage on crop drying aplication, *Journal of Food Engineering*, Volumen 71: 170-178.

15. Jiménez Cisneros, B. E., 2001, Residuos Sólidos (Capítulo V) en La contaminación en México, causas, efectos y tecnología apropiada, Ed. Limusa, México. 453-545.
16. Karathanos, V. T. y Belessiotis, V. G. , 1997, Sun and artificial air drying kinetics of some agricultural products. *Journal of Food Engineering*, Volumen 31: 35-46.
17. Khraisheh, M. A. A., McMinn, W. A. M. y Magee, T. R. A., 2004, Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International*, Volumen 37: 497-503.
18. Kreider, S. F. y Kreith, F., 1981. *Solar Energy Handbook*. New York, USA: McGrawHill Book. Co.
19. Krokida, M. K., Karathanos, V. T., Maroulis, Z. B. y Marinos-Kouris, D. 2003, Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering*, Volumen 59: 391-403.
20. Kulcu, R. y Yaldiz, O., 2004, Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes, *Bioresource Technology*, Volumen 93: 49-57.
21. Kumar, A. y Tiwari, G. N., 2006, Thermal modelling of a natural convection greenhouse drying system for jaggery: an experimental validation, *Solar Energy*, Volumen 80: 1135-1144.
22. Lee, S. K., Young, R. E., Schiffman, P. M., y Coggins, C. W., 1983, Maturity Studies of Aroca Fruit base on Picking Dates and Dry Weight. *Journal of the American Society fo Agricultural Science*, Volumen 180: 390-394.
23. Liwarska-bizukojc, E. y Ledakowicz, S., 2003. Estimation of viable biomass in aerobic biodegradation processes of organic fraction of municipal solid wastw (MSW), *Journal of Biotechnology*, Volumen 101:165-172.
24. Louka, N., y Allaf, K., 2004, Expansion ratio and color improvement of dried vegetables texturized by a new process (controlled sudden decompression to the vacuum application to potatoes, carrots an onions). *Journal of Food Engineering*, Volumen 65: 233-243.
25. Maheshwari, R., Bharadwaj, G., Mahalingeshwara, K. B., 2000. Thermophilic Fungi: their phisilogy and enzymes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, American Society for Microbiology, Volumen 64: 461-488.
26. Martínez, C. L., 2007, El tratamiento Biológico Mecánico. Disponible en www.agenda21donostia.com/cas/mesasdetrabajo/trat_biologico_mecanico.pdf. Consultado el 30 de Abril.
27. McCabe, Smith, Harriot, *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*, 2002, McGraw Hill, 6ª ed, México.
28. Miller, W. M. 1983, Energy storage via desiccant for food agricultural applications. *Energy and Agriculture*, Volumen 2: 341-354.
29. Mondini, C., Contin, M., Leita, L. y De Nobili, M., 2002, Response of microbial biomasa to air-drying and rewetting in soils and compost, *Geoderma*, Volumen 105: 111-124.
30. Mulet, A., Berna, A., y Rosello, C., 1989, Drying of carrots, Drying models. *Drying Technology*, Volumen 7, Issue 3, p. 537-557.

31. Mwithiga, G. y Kigo, S. N., 2006, Performance of a solar dryer with limited su tracking capability, *Journal of Food Engineering*, Volumen 74: 247-252.
32. Nagaya, K., Li, Y., Jin, Z., Fukumuro, M., Ando, Y., y Akaishi, A., 2006, Low-temperature desiccant-based food drying system with airflow and temperature control. *Journal of food engineering*, Volumen 75: 71-77.
33. Nuortioa, T., Kytöjokib, J., Niskaa, H. y Bräysyb, O., 2006, Improved route planning and scheduling of waste collection and transport, *Experts Systems with aplicaciones*, Volumen 30.
34. Okano, H., 1998, Honeycomb rotor type dehumidifiers: comparison between honeycomb rotor type dehumidifiers and various dehumidifying systems and explanation on their outlines. *Clean Technology*, Volumen 3: 33-37.
35. Perry, Green, Maloney, 1992, *Manual del Ingeniero Químico*, McGraw Hill, 6ª ed, México.
36. Pinachoa, A., García-Encinaa, P. A., Sanchob, P., Ramosoc, P. y Márquezc, M.C., Study of drying systems for the utilization of biodegradable municipal solid wastes as animal feed, *Waste Management*.
37. Robles, M. F., 2005, *Generación de Biogas y Lixiviados en los rellenos sanitarios*, Ed. IPN, México.
38. Robles, M. F., Durán, P. E., Sánchez, N. J., 2003, Como Aprovechar desechos sólidos en centrales de abasto, *Teorema Ambiental Agro*, No. 40, México.
39. Sacilik, K., Keskin, R. y Elicin, A. K. 2006, Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato, *Journal of Food Engineering*, Volumen 73: 231-238
40. Sánchez-Monedero, MA., Bernal, MP., Roig, A., Cegarra, J. y García, D., 1997, The effectiveness of de Rutgers system and the addition of bulking agent in reducing N-losses during composting, In: Van Cleemput O, Hofman G, Vermoesen A. Editors. *Progress in nitrogen cycling studies*. Dordrecht: Kluwer academic, p. 133-139.
41. Sartaj, M., Fernandes, L. y Patni, N. K., 1997. Performance of forced, passive and natural aireation methods for composting manure slurries, *Transactions of de ASAE*, Volumen 40, Issue 2, p. 457-463.
42. Sato, K., Katahira, M., y Toji, E., 1997, Drying characteristics of raw bulb and dehumidifier air and moisture content distribution of different bulb parts. *Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery, Tohoku Branch*, Volumen 44: 43-46.
43. SEMARNAT, 2004, *Guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003*, México.
44. Sugni, M., Calcaterrab, E. y Adani, F., 2005, Biostabilization–biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow, *Bioresource Technology*, Volumen 96: 1331-1337.
45. Sundber, C., Leonardsson, J., Östensson, E., y Jönsson, H., 2006, Biological Food Waste Treatment – a thermoacidophilic process instead of composting?, *Biological Waste Management, ORBIT, Alemania*, 417-423.
46. Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994, *Gestión Integral de Residuos Sólidos*, McGraw Hill, Volumen 1, España.

47. Tognetti, C., Mazzarino, M. J., Laos, F., 2007, Improving the quality of municipal organic waste compost, *Bioresouce Technology*, Volumen 98:1067-1076.
48. Valiente, A., 2001 *Problemas de Balance de Materia y Energia*, 2ª edicion , Ed. LIMUSA, México.
49. Weimer, K. y Kern, M., 1996, *Mechanical-Biological Treatment of Residual Waste Based on the Dry Stabilate Method*. Abfall-Wirtschaft, M. I. C. Baeza-Verlag publisher, Witzenhausen, Germany.
50. Zhu, N., Ding, C., Xiong, Y y Qian H.,2004, Performance characteristics of three aereation systems in the swine manure composting, *Bioresource Technology*, Volumen 95: 319-326.

8. ANEXOS

ANEXO 1. Registro de datos de temperatura y humedad relativa del aire

Dia	Pila 1			Pila 2		
	Humedad Relativa (%)			Temperatura (°C)		
	9:00	11:00	14:00	9:00	11:00	14:00
1	83	66	70	33,4	28,9	30
2	80	70	75	34	30,1	30
3	80	80	67	28	30,7	24,5
4	81,2	68	73	30,4	26,4	28,4
5	85	85	85	17	17	17
6	85	85	85	17	17	17
7	60,7	50,2	56	24,5	26,2	25,8
8	60	60	60	26,2	26,2	26,2
9	86	86	86	26,3	26,3	26,3
10	60	60	60	26,2	26,2	26,2
11	60	60	60	26,2	26,2	26,2
12	60	60	60	26,2	26,2	26,2
13	60	60	60	26,2	26,2	26,2
14	79	69	69	21,8	27,7	27,7
15	80	91	91	19	24,3	24,3
16	75	70	70	27	30	30
17	72	72	72	29	29	29
18	70	70	70	28	28	28
19	83	83	83	28	28	28
20	83	83	83	28	28	28
21	83	83	83	23,7	23,7	23,7
22	80	80	80	27,9	27,9	27,9
23	98	98	98	28,2	28,2	28,2
24	95	95	95	23,3	23,3	23,3
25	95	95	95	23,3	23,3	23,3
26	95	95	95	23,3	23,3	23,3
27	95	95	95	23,3	23,3	23,3
28	95	95	95	23,3	23,3	23,3
29	63	63	63	21	21	21
30	76	76	76	22	22	22
31	76	76	76	22	22	22
32	76	76	76	22	22	22
33	76	76	76	22	22	22
34	76	76	76	22	22	22
35	76	76	76	22	22	22

Dia	Pila 1			Pila 2		
	Humedad Relativa (%)			Temperatura (°C)		
	9:00	11:00	14:00	9:00	11:00	14:00
1	100	72	70	33,4	28,9	30
2	100	78	75	34	30,1	30
3	80	80	68	28	32,2	24,7
4	92,7	92	97	31,2	26,1	28,1
5	85	85	85	17	17	17
6	85	85	85	17	17	17
7	81	54	66	23,3	26,9	27,2
8	75	75	75	28,8	28,8	28,8
9	82	82	82	28,7	28,7	28,7
10	75	75	75	28,8	28,8	28,8
11	75	75	75	28,8	28,8	28,8
12	75	75	75	28,8	28,8	28,8
13	75	75	75	28,8	28,8	28,8
14	81	78	78	22,5	27,7	27,7
15	80	91	91	19	24,8	24,8
16	65	63	63	27	32	32
17	60	60	60	29,7	29,7	29,7
18	72	72	72	28	28	28
19	84,3	84,3	84,3	28	28	28
20	84,3	84,3	84,3	28	28	28
21	84,3	84,3	84,3	23,7	23,7	23,7
22	83	83	83	27,9	27,9	27,9
23	100	100	100	29	29	29
24	90	90	90	24,1	24,1	24,1
25	90	90	90	24,1	24,1	24,1
26	90	90	90	24,1	24,1	24,1
27	90	90	90	24,1	24,1	24,1
28	90	90	90	24,1	24,1	24,1
29	63	63	63	21	21	21
30	69	69	69	23,1	23,1	23,1
31	69	69	69	23,1	23,1	23,1
32	69	69	69	23,1	23,1	23,1
33	69	69	69	23,1	23,1	23,1
34	69	69	69	23,1	23,1	23,1
35	69	69	69	23,1	23,1	23,1

Dia	Pila 3					
	Humedad Relativa (%)			Temperatura (°C)		
	9:00	11:00	14:00	9:00	11:00	14:00
1	100	72	72	36	29,2	32
2	100	78	75	37	30,5	32
3	100	100	73,6	29	32,7	25,5
4	94,3	82	87	32,4	25,2	27,2
5	100	100	100	18	18	18
6	100	100	100	18	18	18
7	100	69,3	61,8	26,8	29	27,2
8	100	100	100	29,5	29,5	29,5
9	92	92	92	28,9	28,9	28,9
10	100	100	100	29,5	29,5	29,5
11	100	100	100	29,5	29,5	29,5
12	100	100	100	29,5	29,5	29,5
13	100	100	100	29,5	29,5	29,5
14	81	74	74	22,2	27,7	27,7
15	95	97,6	97,6	20	25,7	25,7
16	82	78	78	27,2	32	32
17	83	83	83	31,8	31,8	31,8
18	65	65	65	29,5	29,5	29,5
19	84,2	84,2	84,2	29,5	29,5	29,5
20	84,2	84,2	84,2	29,5	29,5	29,5
21	84,2	84,2	84,2	24,9	24,9	24,9
22	84	84	84	28,3	28,3	28,3
23	100	100	100	29,6	29,6	29,6
24	93	93	93	24	24	24
25	93	93	93	24	24	24
26	93	93	93	24	24	24
27	93	93	93	24	24	24
28	93	93	93	24	24	24
29	80	80	80	21	21	21
30	72	72	72	24,2	24,2	24,2
31	72	72	72	24,2	24,2	24,2
32	72	72	72	24,2	24,2	24,2
33	72	72	72	24,2	24,2	24,2
34	72	72	72	24,2	24,2	24,2
35	72	72	72	24,2	24,2	24,2

Dia	Pila 4					
	Humedad Relativa (%)			Temperatura (°C)		
	9:00	11:00	14:00	9:00	11:00	14:00
1	100	80	80	34,6	29	32
2	100	78	78	35	30	33
3	90	95	73,1	30	32,4	25,2
4	99,9	100	90	31,6	25,6	27,6
5	100	100	100	18	18	18
6	100	100	100	18	18	18
7	80	65	69,2	29	29,7	28
8	100	100	100	30,5	30,5	30,5
9	77	77	77	29,6	29,6	29,6
10	100	100	100	30,5	30,5	30,5
11	100	100	100	30,5	30,5	30,5
12	100	100	100	30,5	30,5	30,5
13	100	100	100	30,5	30,5	30,5
14	87	74	74	22,5	27,8	27,8
15	97	100	100	20	27,3	27,3
16	70	70	70	27	34	34
17	54	54	54	31,2	31,2	31,2
18	67	67	67	27,5	27,5	27,5
19	72	72	72	27,5	27,5	27,5
20	72	72	72	27,5	27,5	27,5
21	72	72	72	25,2	25,2	25,2
22	80	80	80	28,3	28,3	28,3
23	100	100	100	30	30	30
24	92	92	92	24,3	24,3	24,3
25	92	92	92	24,3	24,3	24,3
26	92	92	92	24,3	24,3	24,3
27	92	92	92	24,3	24,3	24,3
28	92	92	92	24,3	24,3	24,3
29	80	80	80	21	21	21
30	68	68	68	24,7	24,7	24,7
31	68	68	68	24,7	24,7	24,7
32	68	68	68	24,7	24,7	24,7
33	68	68	68	24,7	24,7	24,7
34	68	68	68	24,7	24,7	24,7
35	68	68	68	24,7	24,7	24,7

Dia	Pila 5					
	Humedad Relativa (%)			Temperatura (°C)		
	9:00	11:00	14:00	9:00	11:00	14:00
1	100	100	90	35,4	29,3	32
2	100	100	90	35,6	30	33
3	100	100	98	30	34,2	26,5
4	100	100	95	33,7	26,4	28,4
5	100	100	100	17	17	17
6	100	100	100	17	17	17
7	100	90	92	30,6	32,5	32,4
8	100	100	100	30,6	30,6	30,6
9	100	100	100	31	31	31
10	100	100	100	30,6	30,6	30,6
11	100	100	100	30,6	30,6	30,6
12	100	100	100	30,6	30,6	30,6
13	100	100	100	30,6	30,6	30,6
14	95	83	83	23,5	27,5	27,5
15	100	93	93	19	25,9	25,9
16	100	100	100	27,5	34	34
17	100	100	100	31,7	31,7	31,7
18	100	100	100	32	32	32
19	88	88	88	32	32	32
20	88	88	88	32	32	32
21	88	88	88	27,2	27,2	27,2
22	100	100	100	27,3	27,3	27,3
23	100	100	100	30,3	30,3	30,3
24	100	100	100	24,3	24,3	24,3
25	100	100	100	24,3	24,3	24,3
26	100	100	100	24,3	24,3	24,3
27	100	100	100	24,3	24,3	24,3
28	100	100	100	24,3	24,3	24,3
29	100	100	100	22,2	22,2	22,2
30	100	100	100	25	25	25
31	88	88	88	25	25	25
32	88	88	88	25	25	25
33	88	88	88	25	25	25
34	88	88	88	25	25	25
35	88	88	88	25	25	25

Dia	Pila 6					
	Humedad Relativa (%)			Temperatura (°C)		
	9:00	11:00	14:00	9:00	11:00	14:00
1	100	90	95	36,8	29,2	30
2	100	100	95	37	30	34
3	100	100	82	32	35	26,4
4	100	97	95	32,7	25,4	27,4
5	100	100	100	17	17	17
6	100	100	100	17	17	17
7	93	87	87,2	30,3	34,1	34
8	75	75	75	32	32	32
9	67	67	67	31,4	31,4	31,4
10	75	75	75	32	32	32
11	75	75	75	32	32	32
12	75	75	75	32	32	32
13	75	75	75	32	32	32
14	83	98	98	23	26,2	26,2
15	100	100	100	20	26,3	26,3
16	100	90	90	27,5	34	34
17	75	75	75	31,9	31,9	31,9
18	100	100	100	32	32	32
19	90	90	90	32	32	32
20	90	90	90	32	32	32
21	90	90	90	27,2	27,2	27,2
22	100	100	100	27,3	27,3	27,3
23	100	100	100	32	32	32
24	100	100	100	24,3	24,3	24,3
25	100	100	100	24,3	24,3	24,3
26	100	100	100	24,3	24,3	24,3
27	100	100	100	24,3	24,3	24,3
28	100	100	100	24,3	24,3	24,3
29	100	100	100	23,7	23,7	23,7
30	100	100	100	28,5	28,5	28,5
31	67	67	67	28,5	28,5	28,5
32	67	67	67	28,5	28,5	28,5
33	67	67	67	28,5	28,5	28,5
34	67	67	67	28,5	28,5	28,5
35	67	67	67	28,5	28,5	28,5

Pila 7						
Dia	Humedad Relativa (%)			Temperatura (°C)		
	9:00	11:00	14:00	9:00	11:00	14:00
1	50	55	52	30,3	30,6	27,7
2	56	53	50	32	31	30
3	53	60	59	25	27	23,5
4	80	77	97	27,5	25,5	27,5
5	80	80	80	10,4	10,4	10,4
6	80	80	80	10,4	10,4	10,4
7	49,5	40	40,6	23	24	24,3
8	55	55	55	21,3	21,3	21,3
9	45	43	45	19	21,9	19
10	55	55	55	21,3	21,3	21,3
11	55	55	55	21,3	21,3	21,3
12	55	55	55	21,3	21,3	21,3
13	55	55	55	21,3	21,3	21,3
14	75	76	82	19,3	23,7	27,1
15	78	82	91	17,2	24,1	24,3
16	62	65	65	23	27	29
17	60	60	60	25	25	29
18	50	50	50	23,7	23,7	30
19	73	73	73	23,7	23,7	30
20	73	73	73	23,7	23,7	30
21	73	73	73	21,9	21,9	21,9
22	88	83	83	17	25,7	28
23	75	75	75	25	27	26
24	88	78	88	18,1	21	25
25	88	78	88	18,1	21	25
26	88	78	88	18,1	21	25
27	88	78	88	18,1	21	25
28	88	78	88	18,1	21	25
29	80	67	70	11	16	15
30	58	50	58	12	16,9	16
31	58	58	58	12	16,9	16
32	58	58	58	12	16,9	16
33	58	58	58	12	16,9	16
34	58	58	58	12	16,9	16
35	58	58	58	12	16,9	16

ANEXO 2. Análisis estadístico

I. Análisis de pérdida de peso de las siete pilas durante los 35 días.

Tabla de ANOVA:

FUENTE	GL	SC	CM	F cal	F tab (a:0,05)	F tab (a:0,01)
Tratamiento	6,00	43653,88	7275,64705	11,7742638	2,45	3,53
Error	238,00	1,47E+05	617,93			
Total	244,00	190720,74				

Conclusión: $F_{cal} > F_{tab}$ » si hay diferencias significativas

Diferencia de medias de la prueba LSD:

	1	2	3	4	5	6	7	
	29,15	26,81	25,16	28,25	27,76	30,87	65,85	
1	29,15	0,00	-2,34	-4,00	-0,90	-1,39	1,72	36,70
2	26,81		0,00	-1,66	1,44	0,95	4,06	39,04
3	25,16			0,00	3,09	2,60	5,72	40,70
4	28,25				0,00	-0,49	2,62	37,60
5	27,76					0,00	3,11	38,09
6	30,87						0,00	34,98
7	65,85							0,00

Conclusión: El tratamiento 7 es diferente del resto de los tratamientos

II. Análisis de pérdida de peso de las seis pilas con invernadero durante los 35 días.

FUENTE	GL	SC	CM	F cal	F tab (a:0,05)	F tab (a:0,01)
Tratamiento	5,00	672,14	134,427857	0,21355011	2,56	3,75
Error	204,00	1,28E+05	629,49			
Total	209,00	129088,29				

Conclusión: $F_{cal} < F_{tab}$ » no hay diferencias significativas.

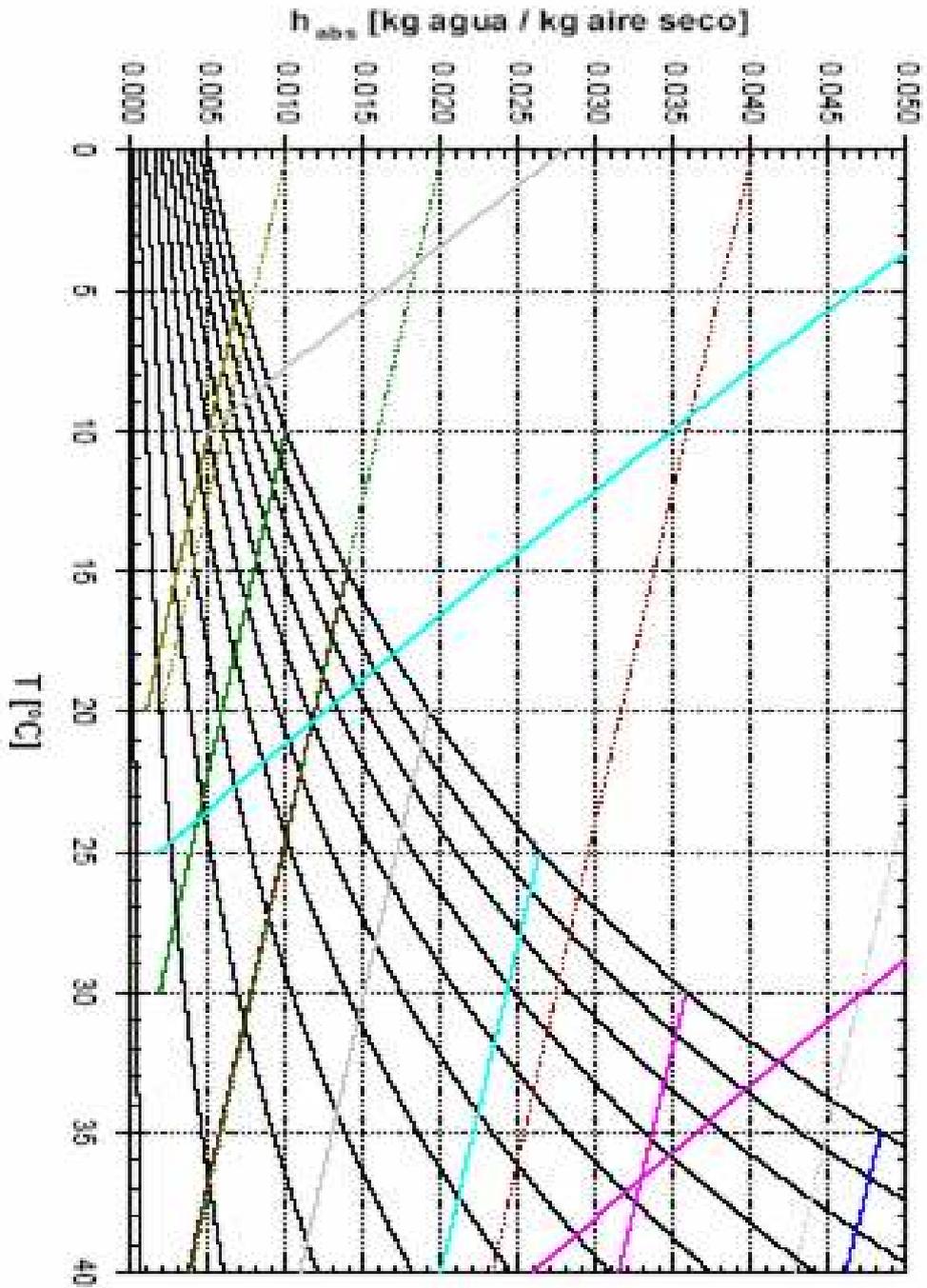
III. Tabla de ANOVA del análisis de temperaturas en centro y superficie de las seis pilas, después del recambio y durante los primeros nueve días.

FUENTE	GL	SC	CM	F	F tablas(0,05 y 0,01)	
Tratamiento	8,00	1062,96	132,869627	13,1271736	2,29	3,23
Bloques	11,00	3447,236168	313,385106	30,9616335	2,12	2,9
Error	88,00	8,91E+02	10,1217239			
Total	107,00	5400,90				

IV. Tabla de ANOVA del análisis de temperatura de residuos, aire en invernadero y aire ambiente durante los 35 días el proceso.

FUENTE	GL	SC	CM	F	F tablas(0,05 y 0,01)	
Tratamiento	32,00	3529,99	110,312094	13,8327972	1,87	2,44
Bloques	12,00	6105,20634	508,767195	63,7978411	2,12	2,9
Error	384,00	3,06E+03	7,9746773			
Total	428,00	12697,47				

ANEXO 3. Carta Psicrométrica



Carta de Humedad
para Chapingo, Méx.
585 mm Hg

ANEXO 4. Energías calculadas a partir de los calores latentes, $Q = \text{masa de agua a evaporar} * \lambda$

Dia	Q (Kcal)						
	Pila 1	Pila 2	Pila 3	Pila 4	Pila 5	Pila 6	Pila 7
2	9144.38	10681.14	6717.87	6635.73	11317.46	8809.18	5005.73
3	8707.57	10109.29	5913.58	5989.88	10654.73	8354.65	1690.92
4	7832.37	9093.90	451.15	5605.23	9800.49	7679.60	685.78
5	7373.03	8285.13	5379.72	5355.97	9047.46	7416.12	586.22
6	7601.96	11136.21	4510.20	2686.25	7087.32	7045.34	3928.75
7	6019.57	4239.58	5306.12	7188.55	9172.40	6526.82	11364.23
8	5685.93	6418.22	4287.55	4402.45	6805.33	5791.38	6160.64
9	5210.12	5798.99	3764.79	4142.31	6090.42	4980.17	7032.72
10	2572.97	4656.07	4771.53	4103.56	5279.44	3739.46	2173.58
11	5485.60	4634.10	1379.98	6921.54	4571.00	4206.23	3833.81
12	1151.12	1775.00	1629.66	1865.09	907.72	1194.47	470.12
13	979.47	629.05	501.39	1168.59	1610.89	905.10	485.27
14	762.42	758.01	461.47	281.07	413.63	874.30	468.76
15	975.77	1033.07	612.69	1132.43	1358.49	783.86	419.43
16	1346.62	993.39	816.15	4785.66	1782.72	863.43	462.96
17	842.02	798.67	860.36	1167.78	840.79	1066.20	572.20
18	0.00	225.81	130.33	425.07	340.64	353.96	189.24
19	343.56	618.68	365.25	711.37	482.79	425.86	227.66
20	277.25	571.13	199.88	641.18	436.81	385.94	206.31
21	147.17	435.27	254.66	570.99	390.83	346.01	184.97
22	114.52	248.57	41.88	243.38	229.66	186.86	234.24
23	111.15	135.33	40.45	226.79	156.94	171.96	319.26
24	107.78	84.70	26.01	210.19	169.69	142.79	287.33
25	0.00	20.25	0.00	64.53	55.02	26.10	510.81
26	0.00	20.02	0.00	62.69	53.03	25.60	262.28
27	35.93	39.59	8.67	30.42	34.02	25.11	13.42
28	35.76	38.89	8.65	30.14	33.33	24.76	13.24
29	35.38	37.96	8.58	29.67	32.44	24.27	12.97
30	105.02	37.04	25.53	29.21	37.86	23.77	12.71
31	0.00	18.04	0.00	14.36	27.40	0.00	0.00
32	0.00	0.00	0.00	14.23	17.77	0.00	0.00
33	0.00	0.00	0.00	0.00	26.18	0.00	0.00
34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Determinación del contenido de humedad por gravimetría.

1. Lavar e identificar los crisoles o cápsulas de porcelana a utilizar
2. Secar en la estufa durante 8 horas como mínimo a 105°C.
3. Sacar el crisol, enfriar y pesar en una balanza analítica con precisión de 0.001g (con ayuda de pinzas para crisol y desecado). Repetir a intervalos de una hora hasta lograr peso constante.
4. Colocar de 5 a 10 gramos de la muestra húmeda en el crisol frío y de peso constante conocido.
5. Pesar el crisol con la muestra y registrarlo.
6. Introducir el crisol con la muestra en la estufa a 65°C y dejarlo 24 h.
7. Sacar el crisol de la estufa, enfriar y pesar. Repetir la operación hasta peso constante.
8. Cálculos:

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{Peso del crisol con muestra húmeda} - \text{Peso del crisol con muestra seca}}{\text{Peso de muestra seca}} \times 100$$

Determinación de materia orgánica.

1. Pesar 0.5g de muestra seca y tamizada en un matraz Erlenmeyer de 500 ml. Procesar un testigo sin muestra.
2. Adicionar 10 ml de dicromato de potasio 1N girando el matraz cuidadosamente para que entre en contacto con toda la muestra.
3. Agregar 20 ml de H₂SO₄ concentrado y agitar durante un minuto.
4. Reposar 30 minutos
5. Añadir 100 ml de agua destilada
6. Añadir 10 ml de H₃PO₄ concentrado
7. Adicionar 5 a 10 gotas de difenilamina
8. Titular con sulfato ferroso 0.5 N hasta el vire de violeta oscuro a verde
9. Cálculos:

$$\% \text{ MO} = (V_1 * N_1 - V * N * F) * K / P$$

Donde: $V_1 = 10 \text{ ml}$, $N_1 = 1 \text{ N}$, $V = \text{volumen de sulfato ferroso gastado}$, $N = 0.5 \text{ N}$, $F = (10 * N_1) / (B * N)$ (donde B es el volumen de sulfato ferroso gastado en la titulación del blanco), $K = 0.69$ y $P = \text{g de muestra}$.

Determinación de nitrógeno total.

1. Pesar 40mg de muestra y 0.1 g de ácido salicílico en un trozo de papel arroz y envolver.
2. Colocar la envoltura en un matraz Kjeldahl, adicionar 3 ml de ácido sulfúrico concentrado y agitar.
3. Reposar 30 minutos.
4. Agregar 1g de Tiosulfato de sodio, disolver y reposar 5 min.
5. Calentar en el digestor Kjeldahl hasta que ya no exista presencia de vapores.
6. Agregar 1g de sulfato de potasio y 0.1g de sulfato de cobre. Seguir calentando hasta obtener una solución clara.
7. Enfriar el matraz y agregar la solución, perlas de vidrio y granalla de zinc a un matraz de destilación de 1 litro. Enjuagar con 15 ml de agua destilada.
8. Montar el dispositivo de destilación colocando sobre el matraz un embudo de destilación con 15 ml de NaOH 10 N.
9. Calentar la parrilla del destilador Kjeldahl y agregar el NaOH.
10. Recibir el destilado en 5ml de ácido bórico al 4%. Destilar hasta obtener aproximadamente 25 ml.
11. Adicionar 3 gotas del indicador mixto rojo de metilo y verde bromocresol. Titular con HCl 0.1 N hasta vire de verde a rosa.
12. Cálculos:

$$\% \text{Nitrógeno total} = V * N * 0.014 * 100 / P$$

Donde: V es el volumen de HCl utilizado en la titulación de la muestra, N es la normalidad del ácido de titulación y P son los gramos de muestra.