

## **Diseño, construcción y prueba de un prototipo automático para compostaje**

### **Design, construction and tests of an automatic prototype for composting**

*Rigoberto Longoria Ramírez<sup>1</sup>, Marco Antonio Oliver Salazar<sup>2\*</sup>, Julio Torres Sandoval<sup>2</sup>, José Luis González Rubio Sandoval<sup>2</sup>, Gerardo Maximiliano Méndez<sup>1</sup>.*

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Ambiental, Instituto Tecnológico de Nuevo León. Av. Eloy Cavazos # 2001. Col. Tolteca, Cd. Guadalupe, Nuevo León, México.

<sup>2</sup>Coordinación de Ingeniería Mecatrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Interior Internado Palmira s/n col. Palmira. Cuernavaca, México.

(Recibido el 10 de enero de 2012. Aceptado el 09 de octubre de 2013)

#### **Resumen**

En este trabajo se presenta el diseño, construcción y validación experimental de un prototipo de compostador. El prototipo realiza el compostaje de los residuos sólidos orgánicos de manera automática y su diseño está basado en las necesidades de tratamiento de los residuos generados en los hogares y en los requerimientos propios del proceso de compostaje para efectuarlo de manera adecuada. Este dispositivo tiene la capacidad de procesar, en forma continua, 3 kg diarios de residuos sólidos orgánicos. Los residuos introducidos al prototipo permanecen en el compostador por un tiempo de 30 días, período en el cual se transforman en composta. El control del prototipo se realiza con un microcontrolador, teniendo las siguientes funciones; monitoreo y control de temperatura, aireado frecuente de residuos, mezcla del material y control del desplazamiento del material sobre las bandas (desde la alimentación hasta la salida del dispositivo) para lograr un procesamiento continuo de los residuos.

Los resultados de las pruebas arrojaron una composta de color pardo oscuro, sin malos olores, con temperaturas al final del proceso cercanas a la ambiental; todas estas características propias de una composta biológicamente estable.

----- **Palabras clave:** Composta, prototipo automatizado, residuos sólidos orgánicos

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: +52 + 777 + 362 - 7770 ext. 212, fax: +52 + 777 + 362 - 7795, correo electrónico: moliver@cenidet.edu.mx (M. Oliver)

## Abstract

In this work the design, prototype construction and experimental validation of a composter is presented. The prototype performs the composting process of organic solid residues in an automatic form and the design is based on the treatment residues generated at home and on the composting proper process requirements to be carried out in a suitable way. This device has the property of processing, in a continuous way, 3 kg of solid organic residues per day. The residues introduced in the prototype remain inside for a 30-day period, time in which they are transformed into compost. The control of the prototype is achieved by a microcontroller, having the following functions; temperature control, air flow provision (aerobic decomposition), material stirring for a uniform decomposition and material movement over the band (from the entrance up to the exit of the device) to achieve a continuous processing of the residues. The resulting tests provided a compost with a dark color, without smells, and at room temperature. All of these conditions were indicators of a stable compost.

----- *Keywords:* Compost, automatic prototype, solid organic residues

## Introducción

México, al igual que otros países, enfrenta grandes retos en el manejo integral de sus residuos sólidos municipales. De acuerdo a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la generación nacional de residuos sólidos municipales (RSM), estimada en el año 2000 fue de 84,200 toneladas diarias. El 50 % de ese total fue dispuesto en tiraderos a cielo abierto sin recibir tratamiento, lo que generó fuertes problemas de contaminación [1].

La composición de los RSM es de origen orgánico en un 52 %, generándose el 70 % de los RSM en los hogares, de acuerdo a estudios realizados por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) en México en el año 2001 [2]. Entre los residuos sólidos orgánicos domésticos (RSOD) más comunes se encuentran los de comida y jardinería, que ocupan el 45 % del total de los RSM [1].

Una alternativa viable a este problema es el diseño de un dispositivo compostador capaz de procesar los residuos sólidos orgánicos generados diariamente en los hogares (cada familia típica

de cinco integrantes genera alrededor de 3 kg diarios).

Algunas de las ventajas del dispositivo son; que utiliza la técnica del compostaje aerobio que es una de las técnicas más recomendadas para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos [2] y que permite aprovechar el producto final obtenido (composta) como enmienda para el mejoramiento del suelo o como material para las plantas. También se evita la contaminación y fauna nociva por la descomposición de los residuos, disminución de gastos de transporte de los RSOD, pues son tratados en el lugar donde se generan.

Actualmente en México se comercializan dispositivos compostadores con la limitación de que requieren de la intervención del usuario para lograr un proceso de compostaje adecuado. Otra limitante de estos equipos comerciales es que generalmente se crean problemas de malos olores, descomposición inadecuada de los residuos, contaminación del medio ambiente o del suelo, debidos a la baja calidad del producto final obtenido.

En este trabajo se presenta el diseño, construcción y validación de un compostador que lo distingue de otros diseños al dar como resultados una composta biológicamente estable al presentar una temperatura uniforme en los diferentes puntos de la cámara, así como consistencia en color y ausencia de malos olores. Este compostador entrega 1.7 Kg/día de material que al secarse da una masa de 407 g. con una humedad de 76% con un tiempo de proceso de 27 días. El contenido de materia orgánica es de 47.95%, con una cantidad total de nitrógeno de 3.12% y una relación carbono/nitrógeno (C/N) de 15:1. Estos valores cumplen con las normas chilena y europea.

El compostaje es definido como un proceso bioquímico de descomposición aerobia de los residuos sólidos orgánicos, donde participan microorganismos que transforman la materia orgánica heterogénea en un producto homogéneo y estable [3]. El compostaje puede ser dividido en tres etapas diferenciadas según la temperatura del material en el proceso: Etapa mesófila inicial con duración aproximada de 2 a 3 días, donde la temperatura sigue un comportamiento ascendente que inicia con la temperatura ambiente hasta alcanzar los 40 °C; etapa termófila con duración variable, en ella la temperatura se incrementa por encima de los 40 °C, pudiendo alcanzar los 75°C; etapa mesófila final o de maduración con duración variable, donde la temperatura desciende de los 40°C hasta alcanzar la temperatura ambiente. En esta última etapa se alcanza la estabilidad biológica del material y se da por terminado el proceso [4- 5].

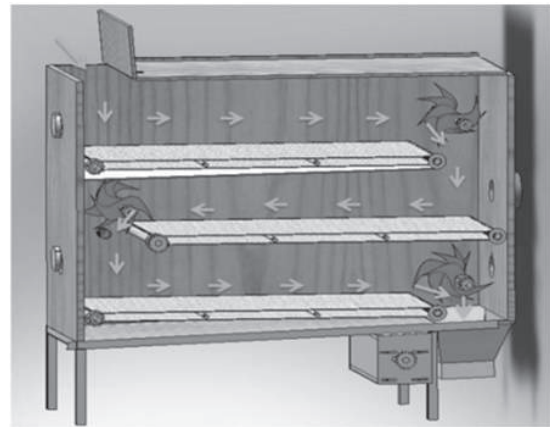
La forma en la cual se desarrolla el proceso de compostaje depende de diferentes variables, tanto físicas (tamaño de partícula, espacio poroso o huecos entre el material, dimensiones del sistema de compostaje, aireación, temperatura y humedad del material) como químicas (relación carbono-nitrógeno, contenido de oxígeno y acidez o alcalinidad del medio, pH) [6]. Los valores deseados de las variables físicas y químicas, que permiten el compostaje aerobio adecuado se presentan en la tabla 1.

**Tabla 1** Variables de control en el prototipo [6, 7]

<b>Factor</b>	<b>Valor Recomendado</b>
Tamaño de partícula	1 a 2 cm
Temperatura en la etapa termófila	40 a 65°C
Humedad del material	40 al 60 %
Oxígeno	15 a 21% en el aire
Relación C:N	30:1
pH	6.5 a 8.5

### Método de compostaje y materiales

El prototipo de cámara de compostaje que se propone en este trabajo y el flujo de material a través de ella es el que se presenta en la figura 1.



**Figura 1** Flujo del material a través de la cámara de compostaje

Al compostar los residuos sólidos orgánicos en el prototipo, se tiene un flujo de ellos que inicia con la introducción del material a la cámara de compostaje a través de la puerta de alimentación, quedando ésta sobre la primera banda (sección uno). La banda se desplazará 133 mm por día permitiendo que el material permanezca por un periodo de 7.5 días antes de caer a la segunda banda. En este tiempo se espera se efectúen las dos primeras etapas del proceso de compostaje (etapas mesófila y termófila). La primera flecha con aspas ubicada al final de la primera banda permite desmenuzar y facilitar la caída del material a la siguiente banda.

La segunda banda de la cámara de compostaje recibirá el material que cae de la primera banda y lo transporta 95 mm por día, manteniendo los residuos por un periodo de 10.5 días antes de caer a la tercera banda. La flecha con aspas ubicada al final de la segunda banda realiza la misma función de desmenuzando que la anterior.

Los residuos que caen a la tercera banda son transportados a 83 mm por día, permitiendo que el material permanezca durante 12 días antes de caer al recipiente recolector. Al final de la banda también se cuenta con una tercera flecha con aspas que realiza la misma función de desmenuzando que las dos primeras.

El material que cae de la tercera banda es recibido en un recipiente recolector que almacena el producto final del proceso y cuenta con la capacidad para recibir el material procesado de siete días. En total el proceso de compostaje tendrá una duración de 30 días.

Los factores físicos, químicos y biológicos juegan un papel determinante para lograr un compostaje

óptimo, en tiempo y por calidad del producto, ver tabla 2, [8].

De la figura 1 se puede observar que se seleccionó un reactor cerrado, horizontal, continuo, con la alimentación de residuos en la parte superior, sistema de ventilación y salida de producto en la parte inferior. Este diseño es adecuado respecto a la economía de espacio donde puede ser emplazado dentro del hogar y por la instalación de las bandas transportadoras del material durante el proceso de compostaje.

Los sistemas abiertos de compostaje en los hogares (principalmente en zonas densamente pobladas) no son una opción, debido a los espacios reducidos. Por otro lado, se requiere de un control adecuado del proceso de compostaje (para minimizar la generación de olores y de organismos perjudiciales, entre otros) y que los factores climáticos no lo afecten. En la tabla 3 se hace una comparación de características entre sistemas de compostaje abiertos y cerrados.

**Tabla 2** Niveles aceptables y óptimos de factores físicos y químicos para el compostaje

<b>Núm.</b>	<b>Factor considerado</b>	<b>Intervalo aceptable</b>	<b>Valor óptimo</b>
	Composición inicial de la mezcla, relación C/N (%)	25 a 35 : 1	30:1
	Potencial de hidrógeno en la mezcla inicial, pH	6.5 a 8.5	7
	Contenido de humedad de la mezcla durante el compostaje (%)	40 – 60	60
	Contenido de oxígeno en el aire dentro de la cámara de compostaje (%)	> 5 %	Mínimo: 10 %
	Temperatura en la etapa termófila (°C)	Entre los 40 y 65	60
	Tamaño de partícula de los materiales (cm)	En general de 1 a 5 cm y para materiales leñosos 1 a 2 cm.	1- 2 cm

Fuente [3, 9-11]

**Tabla 3** Estudio comparativo entre los sistemas de compostaje abiertos y cerrados

<b>Elementos de comparación</b>	<b>Sistemas abiertos</b>	<b>Sistemas cerrados</b>
Superficie	Grande	Reducida
Tecnología	Sencilla	Sofisticada
Sistema	Discontinuo/semicontinuo	Semicontinuo/Continuo
Inversión	De baja a moderada	De elevada a muy elevada
Costos de explotación	Variables según estructurales	Elevados
Consumo energético	Bajo/medio	Medio elevado
Mano de obra	Variable según la instalación	Más especializada
Duración de la descomposición	Semanas	De 3 a 15 días
Olores	Problemas si no hay aireación	Aireación controlada

La composición de los residuos orgánicos permite conocer los materiales que los constituyen, sus propiedades físico-mecánicas y químicas para el proceso de diseño.

Determinar los materiales presentes en los residuos sólidos orgánicos de origen doméstico es muy complicado pues dependen de diferentes factores como: hábitos alimenticios de la familia, región y época del año. Una aproximación, para el caso de los residuos alimenticios se presenta en la tabla 4, basada en estudios realizados por algunas instituciones mexicanas, como el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), donde se publican los 20 productos alimenticios que generan mayor gasto a las familias mexicanas (de los tres estratos económicos: bajo, medio y alto) [12]; la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO) en su publicación de la lista de productos incluidos en la canasta básica [10, 13]; y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación (SAGARPA), donde se presentan los cultivos que ocupan la mayor superficie sembrada y los que alcanzan el más alto valor de producción en México [14].

**Tabla 4** Productos considerados como los más consumidos por los mexicanos

<i>Tipo de producto</i>	<i>Alimentos más consumidos por los mexicanos</i>
<i>Granos</i>	Maíz (tortilla) Frijol Arroz Trigo
<i>Hortalizas</i>	Jitomate Cebolla Papa Chile serrano y jalapeño
<i>Frutas</i>	Plátano Manzana Naranja Limón Mandarina
<i>Productos procesados</i>	Tortilla Pasta para sopa Pan de dulce Pan blanco: bolillo, telera, <i>baguette</i> Galletas dulces Azúcar blanca

De los cálculos de densidad y los datos de los residuos presentados en la tabla y considerando las proporciones de los residuos que permitan cumplir con los requerimientos de humedad y relación carbono nitrógeno para el compostaje, se encontró un intervalo de valores de la densidad entre 400 a 500 kg/m<sup>3</sup>. Debido a que el material que será introducido al dispositivo no debe ser comprimido y debe considerar el espacio poroso, se procedió a medirlo experimentalmente, obteniéndose un valor promedio de 202 kg/m<sup>3</sup>(valor utilizado en los cálculos para dimensionar la cámara de compostaje).

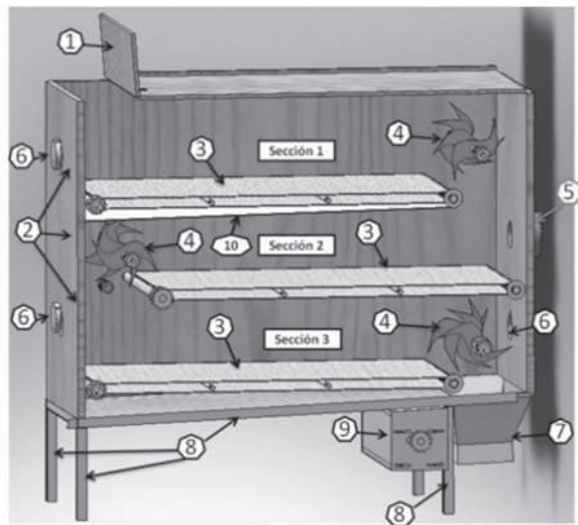
### Diseño del prototipo

- De lo indicado en las particularidades de los compostadores comerciales, se establecieron partes, mecanismos o sistemas principales con los cuales debe contar el prototipo:
- Cámara que aisle térmicamente el material del medio ambiente (cámara de compostaje).
- Mecanismo de descompactación y mezclado del material (aspas o a través de volteos).
- Mecanismo que evite mezclar el material que se encuentra en diferentes etapas de descomposición y permita un procesamiento continuo (división por secciones o realizando un flujo continuo de manera uniforme del material).
- Mecanismo que transporte el material a la salida del compostador (uso de bandas, aspas o tornillo sin fin).
- Depósito para el almacenamiento del material (recipiente de recolección).
- Sistema electrónico y control que permita la operación automática del compostador.
- Fuente de potencia y transmisión que facilite el funcionamiento de los demás mecanismos o sistemas (motor y transmisión por bandas, cadenas o bandas).
- Sistema de ventilación (uso de ventilador o extractor y vías de entrada y salida de aire).
- Soporte.



### Diseño mecánico

El prototipo diseñado cuenta con las siguientes partes (ver figura 2):



**Figura 2** Partes del prototipo

(1) puerta de alimentación, (2) Cámara de compostaje (con tres secciones), (3) Bandas transportadoras (Tres bandas), (4) Flecha con aspas para mover y mezclar los residuos (tres flechas), (5) Extractor, (6) Compuertas de

apertura para entrada de aire (tres entradas de aire), (7) Recipiente recolector, (8) Soporte o chasis, (9) Motor y sistema de transmisión, (10) Placa recolectora de líquidos lixiviados.

Se eligió un motor de baja velocidad y un sistema de transmisión por cadenas para permitir un buen control y precisión en el desplazamiento de las bandas, evitando así el deslizamiento y logrando un accionamiento eficiente de flechas con aspas y los rodillos de las bandas.

El extractor y las compuertas con las que cuenta el dispositivo permiten disminuir la temperatura elevada ( $>65^{\circ}\text{C}$ ), y airear el material frecuentemente mediante el suministro del oxígeno necesario para la descomposición aerobia y la extracción del exceso de humedad de los RSOD (considerando que la humedad máxima aceptada es de 60 %).

Las dimensiones de la cámara de compostaje dependen de las dimensiones de cada sección, limitadas por las bandas. El cálculo se realiza considerando la densidad de los residuos, la cantidad de material que estará sobre cada banda, y las pérdidas durante el proceso de compostaje, de acuerdo a lo mostrado en la tabla 5 (considerando los datos de la tabla 1).

**Tabla 5** Proporción de los residuos alimentados al compostador

Residuos	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad del material* (kg)	Pérdida de masa** (%)
Sección 1	200	22,5	0
Sección 2	300	31,5	22
Sección 3	400	36,0	47
Recipiente recolector	700	21,0	62

\*Corresponde a la cantidad de material almacenado por los días que mantendrá a los residuos, considerando que por cada día se recibirán 3kg.

\*\*Valores determinados al realizar pruebas de compostaje.

Para el dimensionamiento de la cámara de compostaje se consideraron los anchos de las bandas comerciales (500 mm). También se definió una longitud de la banda de 1000 mm.

Las dimensiones del prototipo final son longitud = 1.3m, ancho = 0.71m y altura = 1.2m.

Para la selección del motor se determinó la potencia requerida en el prototipo, considerando la potencia necesaria para mover las bandas y las flechas con aspas a plena carga, además de las pérdidas en el sistema de transmisión [15].

Para determinar la potencia a vencer para mover una banda se utilizó como base la referencia [16].

Finalmente el motor seleccionado tiene una potencia de 1/8HP (93.25W), la flecha gira con una frecuencia de rotación de 6 rpm y alimentación con corriente alterna de 110 a 120V.

Las flechas de las bandas y las flechas con aspas fueron analizadas de acuerdo a las cargas que actúan sobre ellas y se determinaron las secciones críticas en cada una, con lo cual se obtuvo el diámetro de la sección transversal de estas secciones [17].

Una representación del sistema de transmisión del prototipo se presenta en la figura 3.

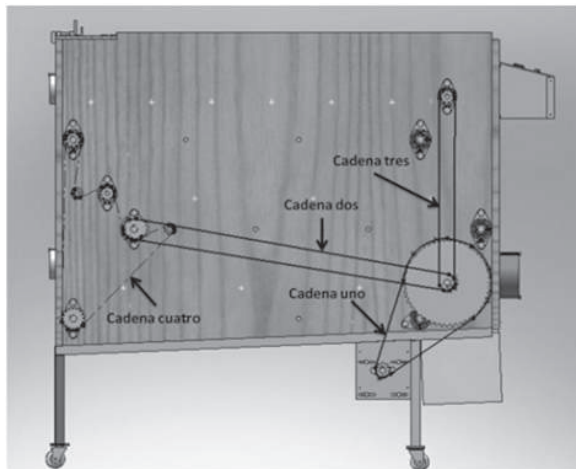


Figura 3 Vista frontal del prototipo

#### Diseño del sistema electrónico y de control

Para este sistema se utilizó el microcontrolador PIC16F84 y dos sensores de temperatura DS1624, un reloj de tiempo real DS1307 y la comunicación serial I<sup>2</sup>C, ver figura 4.

El microcontrolador fue programado en lenguaje ensamblador para monitorear la temperatura al interior de la cámara de compostaje. La temperatura es medida con el sensor DS1624 y regulada por el microcontrolador mediante un extractor que se enciende automáticamente cuando la temperatura del material compostado rebasa los 65°C y apagándose cuando ésta

baja a los 60°C (temperatura óptima para el proceso de compostaje, además de proveer de oxígeno suficiente al material). También el microcontrolador permite el despliegue en una pantalla de cristal líquido de la temperatura ambiente y la temperatura de los residuos para que el usuario monitoree el proceso de compostaje.

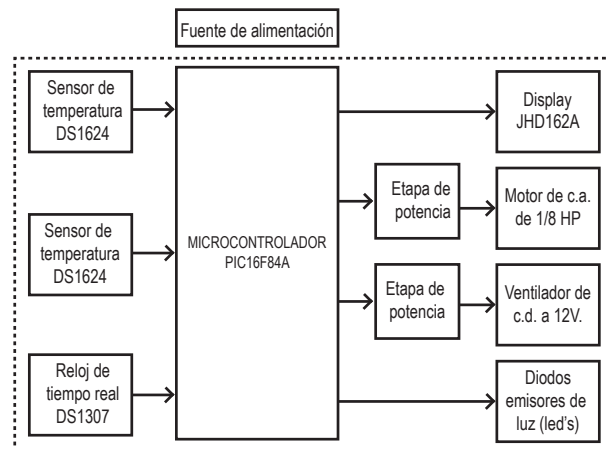


Figura 4 Diagrama de bloques del sistema de control

## Pruebas y resultados

La prueba de funcionamiento del prototipo fue realizada en un periodo de dos meses, donde diariamente se introdujeron 3 kg de residuos en las proporciones que se indican en la tabla 6.

Tabla 6 proporción de los residuos alimentados al compostador

Residuos	Proporción en la mezcla (%)
Residuos de granos	10
Residuos de frutas	30
Residuos de verduras	30
Recortes de pastos	10
Residuos de hojas	15
Recortes de hierbas	5

La primera porción de material que se introdujo a la cámara fue mezclada con composta madura para inocular los microorganismos que iniciaran la descomposición de la mezcla. Los residuos

introducidos a la cámara de compostaje fueron fraccionados en tamaños de 1 a 3 centímetros y mezclados uniformemente.

Con la mezcla se tiene una relación teórica de C:N de 32.9, que es un factor importante en el proceso de compostaje. El material fue aireado por un periodo de 5 minutos con el fin de suministrar el oxígeno requerido para la descomposición aerobia de los residuos. El motor se mantiene en operación por dos minutos diariamente (tiempo en el cual se alcanza el desplazamiento deseado de las bandas).

### Densidad

Se usaron 5 Kg de RSOD y el equipo para realizar la medición de densidad consistió en un recipiente rectangular o cuadrado de sección transversal conocida y constante en toda la altura

del recipiente, balanza de 10 Kg con resolución de 1 g y reglamilimétrica de 5m cm con escala de 1 mm. El procedimiento para la medición de densidad inició con vaciar los 5 Kg de RSOD en el recipiente con una caída suave y uniforme para simular la forme en que caen los residuos al interior de la cámara de compostaje. Este material fue nivelado pero sin ser comprimido. Se determinó el volumen que ocupan los residuos dentro del recipiente mediante la medición de altura y con ello se calcula la densidad.

La densidad promedio obtenida, de forma experimental, en las cinco repeticiones de la mezcla de RSOD fue de 202 kg/m<sup>3</sup>.

La figura 5 muestra las curvas del comportamiento de la temperatura de las 4 muestras que fueron compostadas con respecto al tiempo de iniciado el proceso de compostaje.

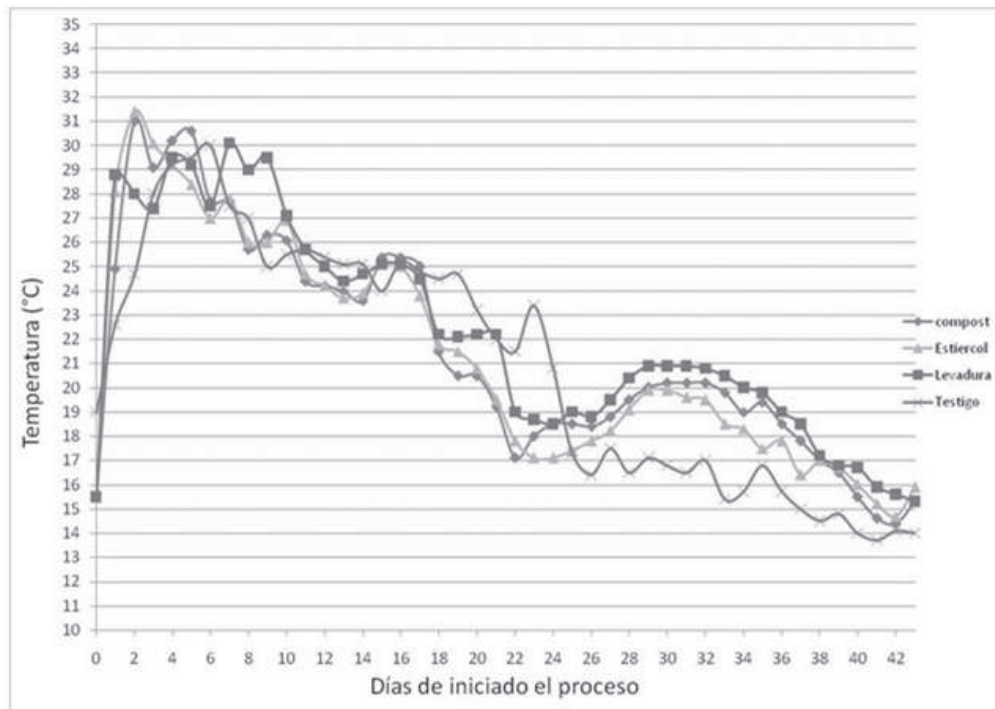


Figura 5 Comportamiento de la temperatura en el proceso de compostaje



La temperatura tiene un comportamiento similar para las muestras que utilizaron algún iniciador al principio de la prueba de compostaje, para el caso de la muestra testigo (que no utiliza iniciador) se presenta un aumento inicial de temperatura lento pero alcanza y rebasa la temperatura de las demás muestras en un tiempo breve, como se observa en la figura.

### ***Comprobación de la madurez por el método de observación directa***

El procedimiento para realizar esta prueba se basa en la observación de parámetros físicos (olor, color y temperatura) para determinar si la composta obtenida es estable.

De acuerdo a las observaciones realizadas durante la prueba de compostaje se puede decir que el material compostado en el prototipo, alcanzó una estabilidad adecuada, por las observaciones de color (pardo oscuro), ausencia de olores fuertes y desagradables, además, por el comportamiento de la temperatura al final del proceso, que ésta fue parecida e influenciada por la temperatura ambiente.

### ***Relación C/N y pH***

Para la medición del pH se emplearon contenedores pequeños, horno de secado y medidor de pH. El procedimiento consistió en tomar 5 muestras de aproximadamente 5 g cada una. Se le agrega agua destilada a cada una en una relación 1:5 (5 g de composta por 25 mL de agua destilada). Se mezcla por 5 segundos y se deja reposar por 10 minutos. Se lee el pH con el medidor previamente calibrado.

Las muestras analizadas fueron colectadas de la composta procesada en el prototipo, las cuales se dejaron secar a temperatura ambiente por un período de ocho días, posteriormente fueron molidas y homogeneizadas, finalmente se realizó el análisis para determinar el contenido de materia orgánica (M.O.) y contenido de nitrógeno total.

El contenido de materia orgánica (M.O.) fue de 47.95 %, el de nitrógeno total de 3.12 % y la

relación C/N de 15:1. Estos valores de acuerdo a la Norma Chilena y de la EPA corresponden a una composta de calidad adecuada para las plantas por su contenido de nitrógeno, y alto contenido de M.O., además de indicar una estabilidad del sustrato adecuada por la relación C/N que es menor al indicado por las mismas normas, de 20:1 para sustrato estable.

### ***Ensayo de germinación***

Esta prueba permite verificar el grado de madurez de la composta. Como equipo para llevar a cabo esta medición se utilizó una incubadora, 8 placas de Petri de 12 cm de diámetro, papel fieltro, semillas de rábano, agua destilada y sustrato de la composta.

El procedimiento consistió en formar una gran placa al colocar 8 placas petri limpias y desinfectadas sobre el papel fieltro (recortado de forma redonda) para cubrir el fondo. Se colocaron 10 semillas de rábano distanciadas y distribuidas uniformemente en el fondo de la placa. Se tomaron 4 placas Petri agregándoles 10 mL de agua destilada. A las 4 placas restantes se les agregó 10 mL de una solución resultante de mezclar residuos de composta con agua destilada a razón de 1 a 10 (10 g de composta: 100 mL de agua destilada) y reposada por una hora. Se realizó un centrifugado por 60 minutos a 1000 rpm y al finalizar se filtró la solución de la cual se tomaron los 10 mL para las placas Petri. Finalmente, las 8 placas fueron introducidas a una incubadora y se mantuvieron a una temperatura de 25°C ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) por 5 días, periodo en el cual se observó la germinación diariamente. Se determinó la germinación diaria de las semillas contabilizadas en forma separada para cada placa Petri. Al final de los 5 días se determinó la cantidad de semillas germinadas en las placas Petri testigo (con agua destilada) y en las placas Petri que utilizaron el sustrato de composta. Así se determinó el porcentaje de germinación de las semillas de rábano.

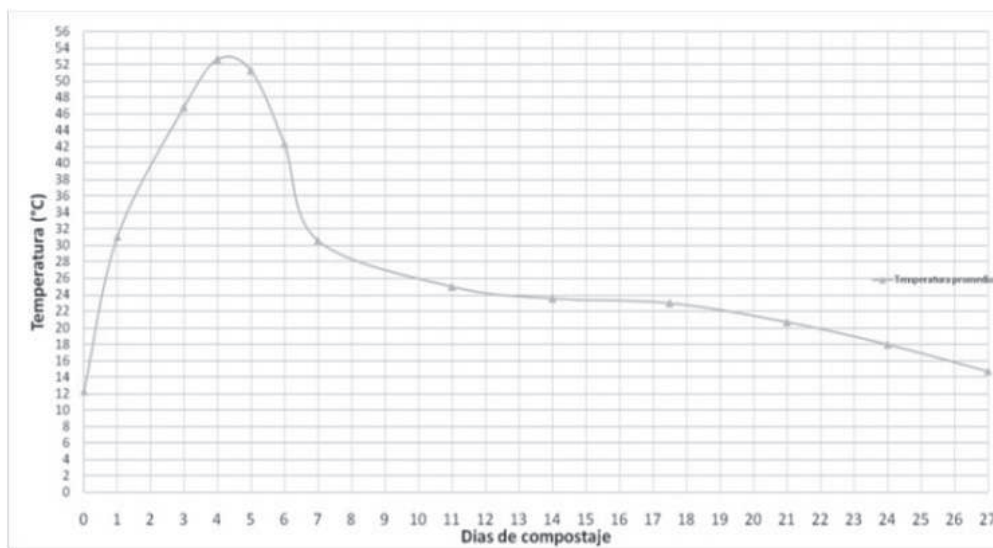
El resultado al determinar el índice de germinación promedio fue del 85 %, lo que indica que la composta es madura de acuerdo con

la Norma Chilena [18] y la norma aplicada en el estado de California de Estados Unidos [11] para determinar la madurez de la composta, indicando un índice de germinación mínimo de 80 % para considerar madura la composta.

### **Medición de temperatura**

La figura 6 muestra las curvas del comportamiento de la temperatura de las 4 muestras que fueron compostadas con respecto al tiempo de iniciado el proceso de compostaje.

Durante la prueba de funcionamiento se tomaron medidas de temperatura (termopar tipo K) en diferentes puntos de la cámara de compostaje, mismas que son representativas del material en las diferentes etapas del proceso después de haber introducido los residuos sólidos. En la figura 6 se presenta la temperatura promedio de las mediciones realizadas durante un mes con respecto al tiempo de avance del proceso. Las temperaturas se tomaron cuando el prototipo tenía material en cada una de las secciones de la cámara de compostaje.



**Figura 6** Gráfica de la temperatura de los RSOD compostados en el prototipo con respecto al tiempo de iniciado el proceso

### **Humedad**

El procedimiento para la obtención de humedad consistió en el uso del recipiente previamente identificado y pesado, en donde se vertió la muestra colectada y se introdujo a un horno de secado donde se mantuvo a 105°C por 24 horas hasta que las muestras alcanzaron un peso constante.

La composta obtenida al final del proceso fue de 1.7 kg., con una humedad de 76%. Al deshidratarse en el horno de secado, quedó con una masa final de 407g de composta de materia

seca. La apariencia del producto fue pardo oscuro, sin malos olores, y al secarse al sol resultó un material de fácil trituración y listo para ser empacado o usado.

### **Conclusiones**

Para que el proceso de compostaje se realice adecuadamente debe cumplirse con los requerimientos de los factores químicos y físicos presentados en la tabla 1. Al introducirse los residuos por primera vez al prototipo, deben mezclarse con algún iniciador (composta madura)

para inocular los microorganismos encargados de la degradación del material y provocar así el inicio del proceso de compostaje.

Para disminuir el exceso de humedad de la composta al final del proceso se coloca un dispositivo que capte los líquidos lixiviados y los transporte fuera del compostador. Otra alternativa es aumentar el tiempo de aeración.

La alimentación del compostador debe realizarse diariamente para evitar que la temperatura al interior de la cámara de compostaje descienda, ya que una baja en la temperatura provoca que el material no tenga una buena descomposición e higienización.

La prueba de germinación en la composta indica que presenta una estabilidad o madurez adecuada para su uso en las plantas, esto con base al cumplimiento de las exigencias de la Norma Chilena [18] y Normas Europeas [11].

La relación C:N de la composta obtenida en el prototipo (15:1), es otro indicador de su estabilidad o madurez y cumplimiento de las exigencias de las normas mencionadas. La composta obtenida en el compostador puede ser utilizada directamente en las plantas, lo que es ventaja comparativa con respecto a algunos compostadores comerciales que requieren de un tiempo de estabilización del material final.

El rendimiento del compostador durante la prueba fue de 0.407 kg de composta seca/día, aunque ésta puede incrementarse en dependencia de la densidad y el tipo de material que sea introducido al compostador.

Se consigue el diseño de un prototipo automático para preparar composta a partir de RSOD, con capacidad de procesamiento de los residuos generados por una familia de cinco integrantes, que es fácil y seguro de operar, con lo que se confirma la hipótesis planteada en esta investigación.

## Referencias

1. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales*. Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental-SEMARNAT. México DF., México. 2001. pp. 7-13.
2. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) 2002. *Estadísticas a propósito del día mundial del medio ambiente, bases conceptuales y procedimientos*. Organización Panamericana de la Salud. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx>; [http://www.consumosustentable.org/4\\_5.htm](http://www.consumosustentable.org/4_5.htm). Consultado: Diciembre 2009.
3. R. Avendaño, A. Daniella, C. Bonomelli. *El proceso de compostaje*. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile, Chile. 2003. pp 1-7.
4. M. Sauri, R. María, B. Castillo. "Utilización de la composta en procesos para la remoción de contaminantes". *Ingeniería Revista académica*. Vol. 006. 2002. pp. 55-60.
5. N. Trautmann, M. Krasny. *Composting in The Classroom*. Ed. National Science Foundation. Cornell Waste Management Institute and Cornell Center for the Environment. New York, USA. 1997. pp. 41-50.
6. Cornell composting. *The Science and Engineering of Composting*. Available on: <http://www.css.cornell.edu/compost/science.html>. Accessed: December 2009.
7. K. Nakasaki, M. Shoda, H. Kubota. "Effect of Temperature on Composting of Sewage Sludge". *Research Laboratory of Resources Utilization, Applied and Environmental Microbiology 50*. 6<sup>th</sup> ed. Ed. Tokyo Institute of Technology. Yokohama, Japan. 1995. pp. 1526-1530.
8. J. Torres Sandoval. *Diseño y construcción de un prototipo automático para preparar composta*. Tesis de Maestría en Ciencias. Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Cuernavaca, México. 2010. pp. 11-27.
9. R. Navarro. *Manual para hacer composta aerobica*. Ed. CESTA. Amigos de la Tierra. San Salvador, El Salvador. 1999. pp. 1-21.
10. Organización Panamericana para la Salud. *Organización Mundial de la Salud. Manual para la elaboración de compost bases conceptuales y procedimientos*. Ed. Pro Salute Novi Mundi. Montevideo, Uruguay. 1999. pp. 17-30.

11. F. Brinton. *Compost quality standards & guidelines*. Project Manager Final Report. New York State Association of Recyclers. Woods End Research Laboratory. Mount Vernon, USA. 2000. pp. 13-18.
12. I. Martínez, P. Villezca. “La alimentación en México: un estudio a partir de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares”. *Revistas de información y análisis*. No. 21. 2003. pp. 26-37.
13. C. Ponce, G. Mascareñas. Tutorial Canasta Básica: “¿De Cuanto es su Tasa Real Personal de Interés?”. *Fuente PROFECO*. 2005. pp. 1-4.
14. I. López, G. Rodríguez. *Los recursos fitogenéticos de México*. Informe Nacional Sobre el Estado de los Recursos Fitogénicos para la Agricultura y la Alimentación. Instituto de Manejo y Aprovechamiento de Recursos Fitogenéticos (IMAREFI). Departamento de Producción Agrícola, Universidad de Guadalajara. SAGARPA. Guadalajara, México. 2004. pp. 13-29.
15. J. Silveira. *Teoría y cálculo de máquinas agrícolas*. 1<sup>st</sup> ed. Ed. Pueblo y educación. La Habana, Cuba. 1999. pp. 20-49.
16. C. Villaseñor. *Máquinas de transporte y elevación en procesos agroindustriales*. Tesis en Ingeniería Agrícola. Depto. de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 1994. pp. 35-48.
17. R. Bundynas, J. Keith Nisbett. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 8<sup>th</sup>. ed. Ed. McGrawHill/ Interamericana S.A. México DF., México. 2008. pp. 146-170.
18. Instituto Nacional de Normalización. *Compost, clasificación y requisitos*. Norma Chilena Oficial NCh 2880. Santiago de Chile, Chile. 2004. pp. 1-10.