



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIONES Y  
ESTUDIOS SOBRE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO  
(CIEMAD)**

***OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE  
COMPOSTA PRODUCIDA A PARTIR DE LA  
FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS  
SÓLIDOS URBANOS QUE SE GENERAN EN  
LA CIUDAD DE MÉXICO***

Tesis que presenta:

**Ing. Ambiental Francisco Javier Barrón Santos**

Para obtener el grado de

***Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la  
Sustentabilidad***

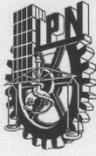
Directores

**DR. LUIS RAÚL TOVAR GÁLVEZ  
DRA. MARÍA EUGENIA GUTIÉRREZ CASTILLO**



México, D. F.

Julio 2013



SIP-14-BIS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México. D.F., siendo las 12:00 horas del día 05 del mes de julio del 2013 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIEMAD para examinar la tesis titulada:

"Optimización del proceso de composta producida a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que se generan en la Ciudad de México"

Presentada por el alumno:

BARRÓN  
Apellido paterno

SANTOS  
Apellido materno

FRANCISCO JAVIER  
Nombre(s)

Con registro: 

B	1	1	0	1	6	8
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad

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

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez

Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo

Dr. Jonathan Muthuswamy Ponniah

Dr. Juan Manuel Sánchez Núñez

Dra. María Teresa Núñez Cardona

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dra. Rosa Laura Meraz Cabrera





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México, D.F. el día 5 del mes de Julio del año 2013, el (la) que suscribe Francisco Javier Barrón Santos alumno(a) del Programa de Maestría en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad, con número de registro B110168, adscrito(a) al Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios Sobre Medio Ambiente y Desarrollo, manifiesto(a) que es el (la) autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del (de la, de los) Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez y Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo y cede los derechos del trabajo titulado **Optimización del proceso de composta producida a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que se generan en la Ciudad de México**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones [javier.barrons@gmail.com](mailto:javier.barrons@gmail.com) y [javbarrons@hotmail.com](mailto:javbarrons@hotmail.com) . Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Francisco Javier Barrón Santos

# CONTENIDO

Capítulo

Página

---

<b>CRÉDITOS</b> .....	i
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	ii
<b>ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS</b> .....	iii
<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>HIPÓTESIS</b> .....	5
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	5
<b>OBJETIVOS PARTICULARES</b> .....	5
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	5
2.1 Técnicas de manejo y aprovechamiento de la FORSU.....	6
2.2 Proceso de Composteo .....	8
2.2.1 El papel de los microorganismos en el proceso de composteo.....	10
2.2.2 Factores que intervienen en el proceso de composteo.....	12
2.2.3 Técnicas de composteo.....	16
2.2.3.1 Sistemas Abiertos.....	16
2.2.3.2 Sistemas cerrados.....	19
2.3 Aceleración del proceso de composteo .....	21
2.4 Gestión de los RSU la Ciudad de México .....	24
2.4.1 Marco Legal del proceso de composteo .....	27
2.4.2 Plantas de Composta en la Ciudad de México.....	29
<b>3. MÉTODOS</b> .....	33
3.1 Estrategia experimental.....	33
3.2 Proceso de composteo.....	33
3.2.1 Construcción de las pilas.....	34
3.2.2 Preparación del Inóculo .....	36
3.3 Métodos analíticos y de muestreo .....	38
3.3.1 Medición de parámetros de campo.....	42
3.3.2 Muestreo .....	43
3.4 Análisis Estadístico.....	44
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	44
4.1 Perfiles Temperatura, Humedad, O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> .....	44
4.2 Evolución de las características fisicoquímicas, microbiológicas y de estabilidad.....	53
4.2.1 Características fisicoquímicas.....	53
4.2.2 Parámetros microbiológicos y de estabilidad.....	61
4.3 Eficiencia del composteo.....	63
4.4 Análisis estadístico.....	67
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	69
<b>6. BIBLIOGRAFIA</b> .....	72
<b>ANEXO 1</b> .....	81
<b>ANEXO 2</b> .....	89
<b>PONENCIA EN CONGRESO INTERNACIONAL E INFORME DE PROYECTO DE INVESTIGACION</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Título	Página
1	Experiencias del proceso de composteo en pilas extendidas con volteo mecánico.	21
2	Fuentes de origen de RSU en el Distrito Federal	25
3	Principales Plantas de Composta en la Ciudad de México.	31
4	Características de las Pilas en el CIIEMAD-IPN.	34
5	Características de las pilas construidas en la PCBP	36
6	Características fisicoquímicas y microbiológicas de la fracción líquida obtenida de los cárcamos ubicados en la PCBP.	38
7	Métodos para la evaluación de parámetros durante el proceso de composteo.	41
8	Nombres de los diferentes tratamientos aplicados durante el proceso de composteo.	45
9	Parámetros Fisicoquímicos durante el proceso de composteo en el tratamiento A.	56
10	Parámetros Fisicoquímicos durante el proceso de composteo en el tratamiento B.	57
11	Parámetros Fisicoquímicos durante el proceso de composteo en el tratamiento C.	58
12	Parámetros Fisicoquímicos durante el proceso de composteo en el tratamiento D.	59
13	Parámetros Fisicoquímicos durante el proceso de composteo en el tratamiento E.	60
14	Parámetros de madurez y microbiológicos del producto final de los tratamientos A, B, C, D y E	62
15	Análisis de Variancia de una vía para los tratamientos A, B y C.	68
16	Comparación de medias por el Método de Duncan	68
17	t de student para los tratamientos D y E.	69
18	Parámetros de campo en el Tratamiento A.	82
19	Parámetros de campo en Parámetros de campo en el Tratamiento B.	83
20	Parámetros de campo en el Tratamiento C..	84
21	Parámetros de campo en el Tratamiento D pila 1.	85
22	Parámetros de campo en el Tratamiento D pila 2.	86
23	Parámetros de campo en el Tratamiento E pila 1.	87
24	Parámetros de campo en el Tratamiento E pila 2.	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Esquema general del Proceso de composteo.	10
2	Fases del proceso de compostaje, microorganismos que intervienen y cambios ambientales principales durante el proceso de composteo.	12
3	Pila estática.	17
4	Pila aireada.	18
5	Pila con aireación pasiva.	18
6	Pila con aireación forzada.	19
7	Reactor de Flujo Vertical.	20
8	Ubicación de las Estaciones de Transferencia en la Ciudad de México.	26
9	Composición en porcentaje de los RSU en el Distrito Federal.	26
10	Flujo de RSU en la Ciudad de México en el año 2011.	27
11	Imagen Spot 2009 PCPB.	32
12	Imagen Spot 2012 PCPB.	32
13	Imagen Spot 2013 PCPB.	32
14	Estrategia experimental, para reducir el tiempo de composteo de la FORSU.	33
15	Pilas construidas en el CIEMAD-IPN.	35
16	Molienda de la FORSU.	35
17	Molienda de la Poda.	35
18	Construcción de las pilas en la PCBP.	36
19	Tratamiento D aireación pasiva.	37
20	Tratamiento E pilas (control).	37
21	Cárcamo dónde se colecta la fracción líquida (inóculo) y toma de muestra del mismo.	37
22	Medición de los parámetros de campo. a) Temperatura, b) Temperatura y Humedad y c) Oxígeno y Dióxido de Carbono.	42
23	Toma de muestra en las pilas: a) PCBP y b) CIEMAD.	43
24	Corte transversal en "V" para la toma de muestras en la pila.	44
25	Temperatura durante el proceso de composteo en los tratamientos A, B y C.	46
26	Temperatura durante el proceso de composteo en los tratamientos D y E.	47
27	Humedad durante el proceso de composteo en los tratamientos A, B y C.	48
28	Humedad el proceso de composteo en los tratamientos D y E.	49
29	Concentración de O <sub>2</sub> el proceso de composteo en los tratamientos A, B y C.	50
30	Concentración de CO <sub>2</sub> el proceso de composteo en los tratamientos A, B y C.	51
31	Concentración de O <sub>2</sub> el proceso de composteo en los tratamientos D y E.	52
32	Concentración de CO <sub>2</sub> el proceso de composteo en los tratamientos D y E.	53

## CRÉDITOS

El trabajo de investigación que sustenta esta tesis de Maestría fue realizado en las instalaciones del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del IPN, bajo la dirección del Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez y la Doctora María Eugenia Gutiérrez Castillo, con el apoyo financiero de los proyectos de investigación CIIEMAD-IPN proyecto SIP número 20130019, 20120805, el convenio de colaboración ICYTDF/5/2102 financiado por el Instituto de Ciencia Y Tecnología del Distrito Federal ICYTDF además fui becario Institucional de posgrado periodo Agosto 2011 a Septiembre 2012, de la Institucional de formación de investigadores en los periodos Agosto a Diciembre del 2011 y de Febrero del 2012 a Julio del 2013 y becario por el CONACYT Octubre 2012 a Julio 2013.

## AGRADECIMIENTOS

**A Balam y Javier:** Por permitirme sentir la alegría y responsabilidad de ser padre, por tener esas sonrisas que cuando las miro me hacen recordar que todo lo que hago vale la pena y hacen que termine cualquier cosa sin importar lo extenuante y difícil que parezca.

**A Eliazar:** Por confiar, apoyar, creer, animar este y cada uno de los proyectos que se han presentado en nuestro camino, por hacerme sentir que todo saldrá bien, que somos capaces de lograrlo, por todo esto y lo que no puedo describir. Te amo.

**A mis padres y hermano:** Gracias porque sin sus enseñanzas, apoyo y comprensión, todos estos logros no se podrían ver cristalizados, por estar siempre en el momento indicado sin pedir nada a cambio.

**Al Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez:** Por la oportunidad de trabajar en éste y demás proyectos, por confiar en mi trabajo, por su conducción durante ésta tesis, por su gran apoyo en lo académico, laboral y personal. De verdad muchas gracias.

**A la Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo:** Por todas sus aportaciones en el desarrollo de esta tesis, por confiar en mi trabajo, por ser crítica y transmitirme el sentido de la autocrítica en el ámbito, académico, laboral y personal, además de transmitirme esa gran disposición a mejorar día con día y por haberme brindado su amistad lo cual le agradezco infinitamente.

**Al comité tutorial: Dra. María Teresa Núñez Cardona, Dr. Jonathan Muthuswamy Ponniah y Dr. Juan Manuel Sánchez Núñez.** Por sus aportaciones y comentarios a éste trabajo además de su paciencia en la revisión del mismo.

**A mis compañer@s:** Jocelyn Cortés, Claudia Rodríguez, Juan Calónico, Alberto Ahuactzin, Verónica Diego, Susana Valle, por brindarme su amistad y apoyo durante la realización de éste trabajo y de esta aventura llamada Maestría.

**Al personal de la SOS:** Ing. Ricardo Estrada Núñez, Biol. Joaquín Díaz Garcés, Ing. Cristina Ramos Pérez, por su gran apoyo durante la realización de éste trabajo y albergarnos en la PCBP durante estos dos años.

# ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>SIGLAS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>CM</b>	Ciudad de México
<b>CE</b>	Conductividad eléctrica
<b>CEDA</b>	Central de Abasto
<b>C/N</b>	Relación Carbono Nitrógeno
<b>CO</b>	Monóxido de Carbono
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>DGSU</b>	Dirección General de Servicios Urbanos
<b>ET</b>	Estaciones de Transferencia
<b>FO</b>	Fracción Orgánica
<b>FORSU</b>	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
<b>GDF</b>	Gobierno del Distrito Federal
<b>GIRSU</b>	Gestión integral de los Residuos Sólidos
<b>HCl</b>	Ácido clorhídrico
<b>INEGI</b>	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
<b>N<sub>2</sub></b>	Nitrógeno
<b>N-NH<sub>4</sub></b>	Nitrógeno Amoniacal
<b>N-NO<sub>3</sub></b>	Nitrógeno Nítrico
<b>N<sub>Total</sub></b>	Nitrógeno Total
<b>NO<sub>x</sub></b>	Óxidos de Nitrógeno
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxígeno
<b>ORP</b>	Potencial de óxido reducción
<b>PCBP</b>	Planta de Composta de Bordo Poniente
<b>PGIRS</b>	Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos
<b>RSBP IV</b>	Relleno Sanitario Bordo Poniente etapa IV
<b>RS</b>	Relleno Sanitario
<b>RS's</b>	Rellenos Sanitarios
<b>RSU</b>	Residuos Sólidos Urbanos
<b>SOS</b>	Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México
<b>SO<sub>x</sub></b>	Óxidos de Azufre
<b>ST</b>	Sólidos Totales
<b>SF</b>	Sólidos Fijos
<b>SEMARNAT</b>	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
<b>SMADF</b>	Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México
<b>SUTDF</b>	Sindicato Único de Trabajadores del Distrito Federal
<b>UFC</b>	Unidades Formadoras de Colonias
<b>USEPA</b>	U.S. Environmental Protection Agency

## RESUMEN

La Ciudad de México (CM), incluyendo la zona conurbada, genera alrededor de 12.500ton/día de residuos sólidos urbanos (RSU), el 44% corresponde a los restos de comida y poda. Desde 2012, la Planta de Composta Bordo Poniente (PCBP) situada al noreste de la CM procesa alrededor de 2,500ton/día de restos de comida y poda en una superficie de 30.24 hectáreas produciendo 500ton/día de composta, pero la Ciudad aparentemente aún dispone otras 2,500ton/día de esta fracción orgánica en rellenos sanitarios del Estado de México. Por lo tanto, el propósito de este estudio fue evaluar tres tratamientos para acelerar el proceso de composteo, por lo que finalmente la Ciudad podría aumentar la capacidad de la PCBP o abrir una nueva planta en el sur de la Ciudad con un menor tiempo en el proceso o ambas. Se construyeron tres pilas con restos de comida y poda en una relación 70:30% v/v, el peso de cada una era de 155 kg. Los tratamientos aplicados a las pilas fueron: A (30 l de fracción líquida con una cuenta microbiana de  $10^6$  UFC  $g^{-1}$  y FORSU triturada), B (FORSU triturada) y C (30 l de inóculo  $10^6$  UFC  $g^{-1}$  y FORSU sin triturar). El tamaño de partícula fue de 1 a 1,5 pulgadas y el inóculo utilizado proviene de un cárcamo donde fue colectado por gravedad. El inóculo fue el agua liberada de la FORSU percolada a través de las pilas, el contenido de humedad de la FORSU fue del 55%. No se detectaron coliformes en la fracción líquida que sirvió como inóculo para el proceso de composteo. El inóculo fue añadido al principio del proceso de composteo y las pilas se airearon mediante volteo mecánico dos veces durante todo el proceso. Se hicieron registros *in situ* de temperatura, humedad,  $O_2$  y contenido de  $CO_2$  diariamente y se tomó una muestra compuesta semanal. Se determinaron los parámetros físicos, químicos y biológicos. Para el análisis de metales se utilizó la técnica de Espectrometría de masas con fuente de plasma y acoplamiento inductivo (ICP) todos los análisis se realizaron por duplicado; se utilizó para medir la estabilidad y madurez del producto final el kit de prueba de madurez ® Solvita Los patógenos se determinaron en las muestras después de 35 días. Todos los parámetros se encontraron dentro de la NADF-020-AMBT-2011. El tratamiento A mostró una reducción significativa en el tiempo del proceso de compostaje ( $p < 0,05$ ), es decir, se alcanzó en menor tiempo la fase termofílica y la madurez del producto final se alcanzó a los 35 días mientras que en B y C tomó 55 y 75 días, respectivamente. Se concluye que la trituración de la materia prima más la adición del inóculo en el inicio del proceso reduce el tiempo de composteo en aproximadamente 61% con respecto al tiempo que se tarda en la PCBP.

Palabras Clave: Residuos Sólidos Urbanos, inóculo, tamaño de partícula, tiempo de composteo

## ABSTRACT

Mexico City, including some counties from neighboring states, generates about 12,500ton/day of municipal solid waste (MSW), 44% of it corresponds to food scraps and yard trimmings. Since 2012 the Bordo Poniente Composting Plant (PCBP) located northeast of Mexico City processes about 2500 ton/day of food scraps and yard trimmings in an area of 30.24 ha (91.7 ac) yielding 500 ton/day of compost, but the City apparently is still disposing another 2500 ton/day of this organic fraction in the State of Mexico landfills. Therefore the purpose of this study was to evaluate three treatments to accelerate the composting process so eventually the City could increase the amount of the organic fraction composted at PCBP or open a new facility in the south of the City or both. We built three piles with food scraps and yard trimmings in a relationship 70:30%v/v, the weight of each one was about 155 kg. The treatments applied to the piles were: A (30 l of leachates with a count of  $10^6$  CFUg<sup>-1</sup> and shredded feedstock), B (no leachates were added only shredded feedstock) and C (30 l of leachates with the same count as above and non-shredded feedstock). The particle size was between 1 to 1.5 inches of the shredded feedstock and leachates were gathered by gravity in a drainage collector. Leachates were water released from the feedstock percolated through the windrows, the moisture content of the feedstock was 55%. No coliforms were detected in the leachates that served as inoculum for the composting process. The inoculum was added at the beginning of the composting process and piles were turned twice during the process. We measured temperature, moisture, O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> content daily and we took a composite sample weekly. Physical, chemical and biological parameters were determined. ICP of all the samples, previously digested, were run by duplicate. Solvita® Compost Maturity Test kit was used to measure stability and maturity of the final product. Pathogens were determined in samples after 35 days. All parameters were within the NADF-020-AMBT-2011. The treatment A showed a significant reduction in time of the composting process ( $p < 0.05$ ) i.e., it took less to reach the thermophilic phase and maturity of the compost was achieved at 35 days whereas compost in B and C took 55 and 75 days, respectively. We conclude that shredding the feedstock plus inoculum addition at the start of the process reduces the composting time in about 61 % with respect to the time it takes at the PCBP.

Key Words: Municipal Solid Wastes, Leachates, inoculum, size particle, composting time.

# 1. INTRODUCCIÓN

El composteo de la fracción orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) constituye una alternativa económicamente viable y con beneficio ambiental para ser integrada en las estrategias de manejo de los RSU. Esta opción de manejo de residuos orgánicos tiene una larga historia de aplicación en países europeos y en las últimas dos décadas la publicación de numerosas experiencias han mostrado el exitoso desarrollo del proceso en diversas regiones de Estados Unidos de Norteamérica (USEPA, 1995; Slater y Frederickson, 2001). Al mismo tiempo, la promulgación de iniciativas de aprovechamiento, reciclaje, reuso y valorización de los residuos ha introducido un renovado interés para mejorar el control de este tipo de tratamiento biológico y contemplarlo como un elemento importante en el manejo sustentable de los RSU.

En países en vías de desarrollo, el aprovechamiento de la FORSU por medio de procesos aeróbicos a gran escala se encuentra poco documentado, situación que inquieta sobre todo si se considera que el alto contenido de material orgánico en los flujos de sus RSU hacen ideal al residuo para su tratamiento por esta alternativa (Taiwo, 2011; Marmolejo et al., 2012).

En la CM, entidad con la mayor densidad poblacional urbana 5 920 hab/km<sup>2</sup> (INEGI, 2010) y con la más alta tasa de generación per cápita de RSU 1.5 kg/hab/día en 2011 (SEMARNAT, 2012) del país, el sector gubernamental responsable del manejo de los RSU reconoció la importancia del aprovechamiento de la FO en el manejo de los RSU desde la época de los 70s. En ese contexto, la primera experiencia de composteo de la FORSU tuvo lugar en 1974 con la construcción de la planta de composta de San Juan de Aragón cuya operación a lo largo de la década de los 80s resultó en la producción de composta de baja calidad debido a la inadecuada separación de los residuos orgánicos que procesaba, su desmantelamiento en 1992 (Gonzalez y Morales, 2002) dio paso a una segunda experiencia, la construcción de una planta piloto mecanizada ubicada en territorio perteneciente al Relleno Sanitario Bordo Poniente etapa IV (RSBP IV). Aunque, la capacidad instalada de esta nueva Planta de Composta de Bordo Poniente (PCBP), que inicio en 2001, era de 200 ton/día las condiciones de operación solo permitían procesar en promedio 20 toneladas por día de residuos de poda y residuos orgánicos provenientes de mercados (SOS, 2011).

La inminente clausura del RSBP IV emplazada para diciembre del 2011, comprometió al gobierno del D.F a modificar la gestión de sus RSU, a partir de enero de 2010 se planearon y ejecutaron alternativas de manejo para las 12,600 toneladas generadas diariamente en la Ciudad, uno de los principales objetivos era reducir la cantidad de desechos que se disponían en el RSBP IV, para ello se incrementó paulatinamente la separación de residuos en dos fracciones orgánica e inorgánica, situación que repercutió también en la recuperación de mayor cantidad de material reciclable y de una FO con mayor grado de pureza para su revalorización vía composteo. Un mayor éxito se logró al implementar el programa de separación en fuente denominado “Vamos a separar para respirar mejor”, que comenzó en Marzo del 2011.

Para reducir y estabilizar la mayor cantidad posible de FO separada, el gobierno del D.F. proyectó aumentar la capacidad de la PCBP transformándola en una planta de procesamiento a gran escala, para lo cual entre 2010 y 2012 se expandió el área de la planta y se realizó el acondicionamiento de los patios de proceso; lográndose obtener una superficie total de más de 30 hectáreas con esto se transitó de procesar 50 ton/d, hasta 2500 ton/d en promedio. Pero, las condiciones actuales de operación de la PCBP (equipamiento, composición de la FO, método de composteo en pilas con aireación mecánica con prolongados periodos de procesamiento de hasta 3 meses) permiten obtener composta de buena calidad de aproximadamente la mitad de la FO que se genera diariamente en el D.F., lo que implica que 2540 toneladas diarias restantes de FORSU aparentemente siguen siendo depositadas en RS's ubicados en el Estado de México (SOS-CIEMAD, 2012).

La prestación del servicio de Recolección, Transferencia, Selección y Disposición Final de los RSU, aún sigue presentando retos técnico-económico que indiscutiblemente deben ser abordados a través de estudios adicionales, por estas razones, el presente trabajo, tiene como objetivo principal identificar y establecer las condiciones que lleven a reducir el tiempo de composteo de la FORSU en escala piloto, cumpliendo en la medida de lo posible con los parámetros de calidad establecidos en la norma ambiental NADF-020-AMBT-2011, “Que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el Distrito Federal”, para así entonces poder escalar los cambios e incrementar la capacidad de la PCBP o aportar los elementos necesarios para

procesar composta en un menor tiempo en nuevas plantas de composta que pueden ser construidas en algunas delegaciones de la ciudad, con el fin de reducir la cantidad de FORSU que se sigue disponiendo en los RS's del Estado de México y coadyuvar a mitigar los impactos generados por esta práctica.

## **HIPÓTESIS**

La velocidad de degradación de la mezcla de residuos orgánicos que procesa la PCBP (FORSU y poda) se incrementará al emplear como inóculo de la fracción líquida de la FORSU, al reducir el tamaño de partícula de la mezcla y al modificación tipo de aireación.

## **OBJETIVO GENERAL**

Determinar la influencia relativa de la aireación, tamaño de partícula e inoculación en la reducción del tiempo de composteo de la FORSU generada en la Ciudad de México, a escala piloto.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

1. Determinar las variables con las cuales se reduce el tiempo actual de composteo de la FORSU.
2. Evaluar cuál de los parámetros medidos en campo (temperatura, humedad, O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>) es el mejor indicador para dar seguimiento al proceso de composteo.
3. Evaluar los parámetros fisicoquímicos durante el proceso de composteo.
4. Aplicar métodos estadísticos para conocer si la reducción del tiempo de composteo es significativa con respecto al tiempo actual.

## **2. ANTECEDENTES**

Históricamente, la estrategia más común para el manejo de residuos sólidos urbanos ha sido el empleo de RS's, debido a que proporciona una solución de disposición de bajo costo, se espera que esta misma forma de manejo de los RSU se incremente en los países con economías emergentes dado que sus actividades se mueven del uso de tiraderos a cielo abierto hacia la disposición en rellenos controlados. Sin embargo, como resultado del incremento de conciencia ambiental la visión que actualmente se tiene de los RS's ha cambiado dadas las implicaciones que tienen en el deterioro ambiental de las

regiones, de aquí la urgencia de plantear y aplicar estrategias alternativas (Lou y Nair, 2009).

En años recientes diferentes instituciones de todo el mundo, encargadas del manejo de los RSU, han orientado sus políticas hacia la disminución de flujos de residuos que se depositan en los RS's debido al espacio disponible tan limitado y a los compromisos de reducción de emisiones de gases con efecto invernadero. Una estrategia exitosa en el manejo de grandes cantidades de la FORSU es la instalación y puesta en marcha de plantas de composta, una fuerte motivación para estos desarrollos como vía del manejo seguro y económico de la FORSU, es la separación en fuente y su tratamiento (ERDC-CERL, 2010).

En México, el aprovechamiento de la FORSU, es escaso, aún no se cuenta con el desarrollo de tecnologías que permitan aprovechar su potencial energético, y el proceso de composteo, que se ha venido desarrollando desde la década de los 70's, es desaprovechado ya que en el país solo se procesa el 2% de la fracción orgánica total, mientras que países como Italia, Alemania y China convierten más del 40% de sus residuos orgánicos en composta y solo disponen en confinamiento el 20% del total de sus RSU, el caso de México difiere importantemente dado que aún se disponen en RS's más del 80% del total de los RSU generados en todo el país.

A continuación se describen las principales opciones para la valorización de la FORSU.

## **2.1 Técnicas de manejo y aprovechamiento de la FORSU**

El manejo de los RSU es el segundo problema más importante después de la calidad del agua alrededor del mundo (Senkoro, 2003), la mayoría de la población carece de información sobre el manejo y disposición de los RSU (Awomeso et al., 2010). De acuerdo con la UNEP (1996) y Doan (1998), el manejo de los RSU es un problema muy grave en los países en vías de desarrollo, debido al crecimiento demográfico, la pobreza y las altas tasas de urbanización. A continuación se realiza una breve descripción de las técnicas de manejo y aprovechamiento de la FORSU que actualmente se están desarrollando en algunos países.

## **Pirólisis y Gasificación**

La pirólisis consiste en la descomposición físico-química de la materia orgánica bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante, es un proceso térmico de conversión en el que se utiliza un material con alto contenido de carbono para producir compuestos más densos y con mayor poder calorífico, que pueden ser empleados como combustibles directamente o luego de un tratamiento posterior. Los productos de la pirólisis son gases, líquidos y un residuo carbonoso, cuyas cantidades relativas dependen de las propiedades de la biomasa a tratar y de los parámetros de operación del equipo (UNEP, 1996).

En los últimos años la pirolisis se viene utilizando para la obtención de combustibles líquidos y productos químicos a partir del carbón y residuos orgánicos. (Heimlich et al., 2005). En Nigeria, por medio de la pirólisis convierten a la madera en carbón vegetal para ser utilizado en la cocina doméstica. Sin embargo, los efectos de la pirólisis al ambiente se refleja en la pérdida de la biodiversidad, la desertificación y la emisión de ácidos y gases de efecto invernadero. En general, el uso de la pirólisis y la gasificación para el manejo de residuos es poco común en los países en desarrollo debido a los costos del equipo. Otra razón por la que la pirólisis y la gasificación pueden no ser sustentables, es la emisión de gases de efecto invernadero durante el tratamiento térmico (Taiwo, 2011).

## **Incineración**

La incineración se refiere a la combustión a altas temperaturas en hornos de alta eficiencia para producir vapor y cenizas (EPA, 1995). Los beneficios de la incineración son una importante reducción de volumen de residuos y la producción de energía eléctrica y calor (Seo et al., 2004). Los principales problemas de la incineración son los costos de construcción y operación de las instalaciones lo que resulta difícil para los países en desarrollo (Rand et al., 2000), así como la producción y emisión de gases ácidos (óxido de azufre SO<sub>x</sub>, óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>, y ácido clorhídrico HCl), el manejo de las cenizas, los residuos no combustibles como metales y otros compuestos tóxicos, CO y partículas PM<sub>2.5</sub> (UNEP, 1996).

## **Digestión Anaerobia**

La digestión anaeróbica es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se

descompone en productos gaseosos o biogás  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc., y en digestato, que es una mezcla de productos minerales N, P, K, Ca, etc., y compuestos de difícil degradación (Wu et al., 2007).

Las ventajas principales del proceso de digestión anaeróbica son: minimización de emisiones de gases de efecto invernadero, el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos con la producción de metano y su aprovechamiento en energía eléctrica y a su vez la valorización del digestato como abono orgánico rico en nutrientes y libre de patógenos para el uso directo en la tierra.

### **Composteo**

El composteo es un proceso de descomposición aerobia en el cual diferentes poblaciones de microorganismos transforman la FORSU en material estable y con nutrientes (Seo et al., 2004), se sabe que en los países en desarrollo, el 50%, corresponde a la FORSU (Hoornweg et al., 1999). Hoy en día algunos autores señalan al composteo como la técnica más viable para el aprovechamiento de la FORSU debido a que sus costos operacionales con respecto a las tecnologías mencionadas son menores, además de disminuir el riesgo de contaminación al aire, agua y suelo (Taiwo, 2011).

Como ya se mencionó, la CM implantó el método de composteo para aprovechar la FORSU, es por esto que en este trabajo se evaluó la aplicación de la fracción líquida generada durante el proceso de composteo como inóculo con un tamaño de partícula de la FORSU previamente determinado, con el propósito de reducir el tiempo de composteo de esta FORSU que actualmente se procesa en la PCBP.

#### **2.2 Proceso de Composteo**

El composteo es un proceso natural de degradación biológica aeróbica, en el que diferentes poblaciones microbianas transforman materiales orgánicos mezclados (sólidos, o semisólidos) en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , calor y un producto final sólido estable, rico en compuestos orgánicos complejos como sustancias húmicas, macro y micronutrientes (Figura 1). En apariencia es un proceso relativamente sencillo, no obstante ha sido objeto de múltiples estudios debido a que involucra fenómenos de naturaleza física, química y biológica, intrínsecamente relacionados, que pueden ser alterados por factores operacionales (Cayuela et al., 2006; Hubbe et al., 2010).

Mediante composteo es posible transformar la FORSU, lo cual puede darse de dos maneras:

- a. Mineralizando las macromoléculas como las proteínas, celulosa, azúcares, pectina y lípidos hasta CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, compuestos simples nitrogenados como el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y generación de calor;
- b. Humificando compuestos complejos presentes en la FORSU como son la lignina a partir de la cual se producen compuestos orgánicos más homogéneos y estables.

De acuerdo con Fuchs (2009) y García de la Fuente *et al.* (2011) dentro de los usos que se le puede dar a la composta son:

- Mejorar la estructura del suelo, lo hace apto para el cultivo, ayuda al desarrollo de las raíces, dado que proporciona nutrientes y facilita además su incorporación a las plantas.
- Incrementar los niveles de microorganismos benéficos para el suelo.
- Acondicionador de suelos, ayudará a la absorción y retención de agua en los suelos, reducir la erosión y el deslave por lo que protege los acuíferos superficiales de sedimentación.
- Apoyar el reciclado de nutrientes, el enriquecimiento de la fertilidad del suelo en sustitución de fertilizantes químicos dado que incrementa su capacidad de retener nutrientes.

Durante el composteo la reacción de bioconversión ocurre casi totalmente bajo condiciones aeróbicas, el volumen de oxígeno es suplido por el volteo mecánico de las pilas o la aireación forzada y controlada, en términos generales puede expresarse como la siguiente reacción exotérmica (Van Haaren, 2009):

$(C_6H_{10}O_4)_x + 6.5 O_2 \rightarrow (C_6H_{10}O_4)_{x-1} + 6 CO_2 + 5 H_2O + 616 \text{ Kcal/ mol de materia orgánica.}$

Donde  $(C_6H_{10}O_4)_x$  es una fórmula simplificada de la materia orgánica, durante el proceso cerca del 65 % del material orgánico es digerido por los microorganismos y el material remanente no digerido (aproximadamente 35 %) constituye la composta, que con ayuda de oxígeno y otros microorganismos produce ácidos fúlvicos solubles y húmicos (Dignac *et al.*, 2005).



Figura 1 Esquema general del Proceso de composteo.

### 2.2.1 El papel de los microorganismos en el proceso de composteo.

Los principales microorganismos que degradan la FORSU son: bacterias, actinomicetos, hongos y protozoarios. Estos microorganismos se hallan naturalmente en la materia orgánica, incluyendo residuos alimenticios, suelo, hojas, poda, entre otros. De tal forma que el composteo depende de la secuela de diversas actividades microbianas en las que los productos de un grupo de microorganismos promueven la actividad de un siguiente grupo, en etapas sucesivas, hasta estabilizar la composta.

Diversos estudios revelan que la mayor parte de los grupos microbianos que inician el proceso biológico son mesófilos, productores de ácidos orgánicos e incluyen a *Lactobacillus* spp. y *Acetobacter* spp. Posteriormente, participan en la siguiente fase aerobia (termófila), bacterias Gram positivas del tipo *Bacillus* spp. y actinobacterias que dominan el proceso, aunque éste es más eficiente cuando aumenta la diversidad bacteriana y fúngica (Partanen et al., 2010). Las bacterias son las primeras en establecerse en la pila hidrolizando proteínas, carbohidratos iniciando con los azúcares menos complejos. Hay bacterias que fijan  $N_2$  atmosférico para incorporarlo a la masa celular. Los actinomicetos, segundos en cuanto a abundancia, después de las bacterias, descomponen compuestos aromáticos, esteroides y fenoles, entre otros.

Los hongos juegan un papel importante en el composteo ya que en la medida que la humedad de la pila disminuye los hongos toleran de mejor manera los ambientes más secos que las bacterias. Algunos hongos tienen requerimientos de nitrógeno inferiores al de las bacterias y son capaces de descomponer celulosa y lignina, lo que para las bacterias es imposible. Microorganismos como rotíferos, nemátodos, otros artrópodos (Ejemplos: ácaros, colémbolos o hexápodos, cochinillas, escarabajos), etc. reducen el tamaño de la FORSU y aumentan la superficie de contacto haciendo más fácil el ataque

microbiano; además, estos macroorganismos se mueven dentro de las pilas permitiendo la entrada del aire entre el material (materia prima).

Las bacterias y hongos importantes en la descomposición de la fracción orgánica son tanto mesófilos como termófilos. Las primeras crecen a temperaturas entre 25 a 45°C, son abundantes al inicio del composteo; cuando la temperatura de la pila está casi igual que la temperatura ambiente, oxidan al carbono de la FORSU produciendo CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y calor.

Al alcanzar el proceso los 45°C, los microorganismos mesófilos mueren o son inactivados, y los termófilos se activan. Los microorganismos termófilos (MT) proliferan a temperaturas que van de 45 a 70°C, en éstas condiciones, reemplazan a los microorganismos mesófilos (MM) en casi toda la pila reproduciéndose y metabolizando la FORSU remanente.

Este proceso de composteo ocurre en tres etapas, la primera etapa se caracteriza por actividad microbiana mesofílica que conduce a la elevación de la temperatura (<40-45°C); en la segunda fase denominada termofílica la temperatura se mantiene >40-45°C que favorece altas tasas de descomposición de compuestos orgánicos, la última fase resulta en disipación de calor con una disminución en la temperatura de la pila que estimula el predominio de biota fúngica conduciendo a un proceso de estabilización y maduración del producto terminado (Tognetti *et al.*, 2007).

En la Figura 2 se observan las cuatro fases del proceso de composteo así como la evolución de la relación C/N la cual se reduce gradualmente durante el proceso, así mismo se observa que en las fases termofílica y la fase de enfriamiento es importante la aireación de las pilas para que no disminuya la actividad microbiana si la temperatura excede los 70°C y no disminuya el oxígeno además de que se evita la formación de zonas anaerobias en las pilas.

Por último, se observa la modificación del pH durante el proceso, en la etapa mesofílica el pH disminuye por la formación de ácidos orgánicos originados por la acción de microorganismos sobre los carbohidratos, favoreciendo el crecimiento de hongos y la descomposición de la celulosa y lignina (Weast *et al.*, 1990), en la etapa termofílica el pH aumenta hasta valores entre 8 y 9, por la formación de amonio al desaminarse de las proteínas; así mismo, el aumento del pH facilita la pérdida de nitrógeno en forma amoniacal (Beck-Friis *et al.*, 2003), por último, en las etapas de enfriamiento y maduración

el pH se sitúa en valores de 7 a 8, como consecuencia de la capacidad buffer de los ácidos húmicos que se han formado.

### 2.2.2 Factores que intervienen en el proceso de composteo.

El papel de los microorganismos es fundamental durante el proceso de composteo, por lo que es necesario, controlar los diferentes factores que promueven su proliferación así como su actividad, estos factores son: niveles de nutrientes en la FORSU, la relación C/N, la aireación (el O<sub>2</sub>, es un reactivo del proceso de composteo que se requiere en por arriba de cantidades estequiométricas), humedad, temperatura y pH del material a lo largo del proceso y finalmente el tamaño de partícula de la FORSU al inicio del proceso. En la medida que estos factores se aproximen a niveles óptimos, el tiempo para obtener composta será menor (Ahmad *et al.*, 2007, Kulcu y Yaldiz, 2007).

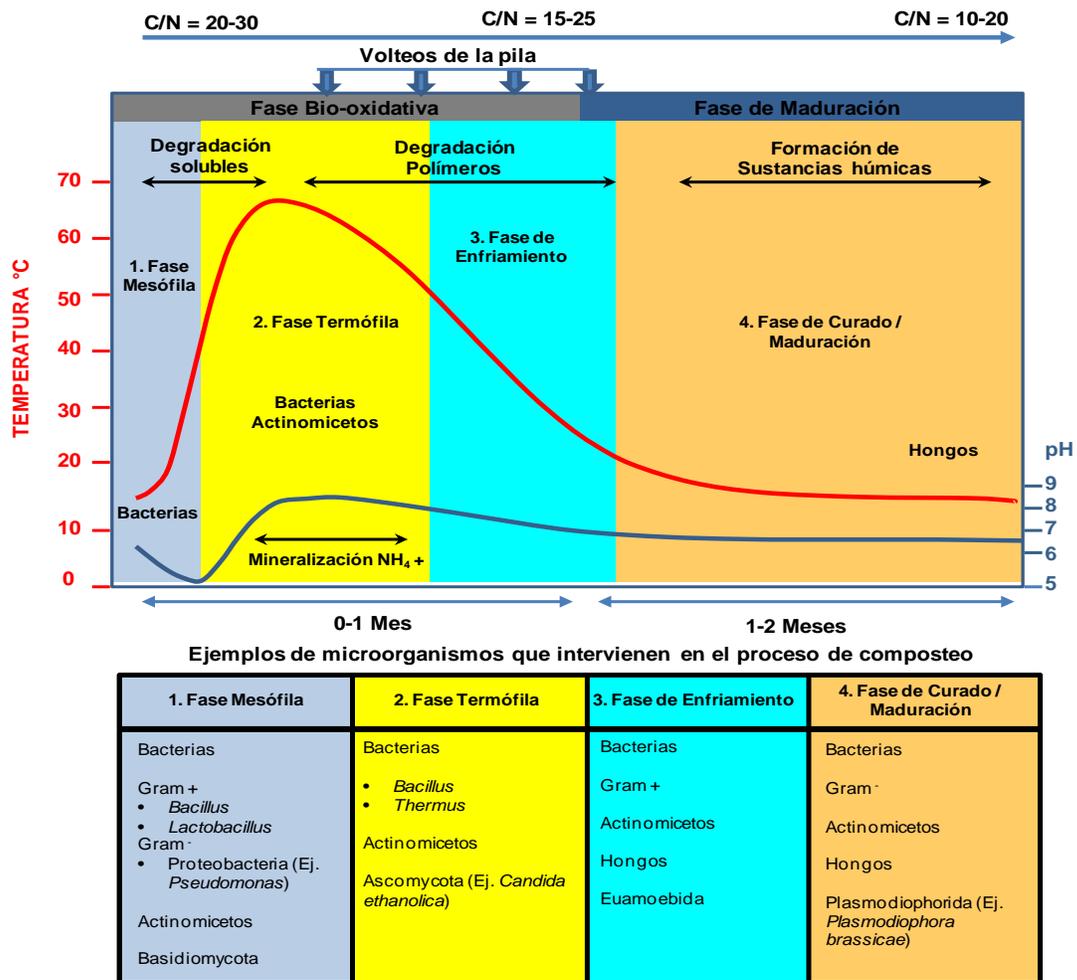


Figura 2. Fases del proceso de compostaje, microorganismos que intervienen y cambios ambientales principales durante el proceso de composteo.

En los párrafos siguientes se presenta una breve descripción de los factores fisicoquímicos y su importancia durante el proceso de composteo.

### ***Nutrientes***

Los principales sustratos de la FORSU incluyen proteínas, lípidos, azúcares, almidón, azúcares aminados, quitina, celulosa, lignina, hemicelulosa y pectinas en contenido variable, tanto en composición como en valor calórico y con diferente disponibilidad para los microorganismos.

El Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Magnesio (Mg), Azufre (S), Hierro (Fe), Calcio (Ca), Manganeseo (Mn), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Cobalto (Co) y Molibdeno (Mo) contribuyen a la estructura protoplásmica de las células microbianas, estos elementos junto con C, H y O son esenciales para la producción de biomasa y se hallan en diferentes concentraciones en la FORSU; con muy pocas excepciones todos estos nutrientes se encuentran en ésta en cantidades y proporciones adecuadas, no así C y N. La disponibilidad de estos nutrientes depende de la producción de enzimas por la microbiota, así, algunos de ellos poseen enzimas que les permite atacar y utilizar varios de los nutrientes presentes en la materia orgánica mientras que otros solo utilizan productos intermedios generados en el proceso anterior.

### ***Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)***

El carbono y nitrógeno son utilizados por los microorganismos, como fuente de energía y para la síntesis de nuevo material celular, un alto porcentaje del carbono se oxida a CO<sub>2</sub> durante las actividades metabólicas de los microorganismos. El uso principal del nitrógeno es para la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos, el requerimiento de nitrógeno por los microorganismos es sensiblemente menor que para el carbono.

La relación C/N óptima de la materia prima, es de aproximadamente 25–35:1. Una relación mayor disminuye la descomposición de la fracción orgánica, por ejemplo, si la relación es superior a 35–40 se promueve la inmovilización del nitrógeno disponible, disminuyendo la velocidad de descomposición, de tal forma que los microorganismos deberán pasar muchos ciclos de vida oxidando el exceso de carbono a CO<sub>2</sub> hasta alcanzar una relación C/N de 25/1.

Por otro lado, si la relación C/N es menor a 20/1, el proceso de composteo tiende a inhibirse debido al bajo suministro de energía y el nitrógeno se perderá tanto en la

fracción líquida que libera la materia orgánica como de manera volátil en forma de amonio (Zmora- Nahum et al., 2005).

### ***Aireación***

La composición de la atmósfera en los intersticios del material que se está composteando varía sustancialmente durante su descomposición. Cuando se construye la pila extendida con la materia prima, el suministro de oxígeno disponible para los microorganismos presentes en la FORSU, ocurre por difusión del aire atmosférico y del originalmente atrapado en los espacios vacíos (Trois y Polster, 2007), sin embargo, la velocidad de difusión del aire atmosférico a la pila de composteo es muy baja, así el aire intersticial es la fuente de oxígeno principal. Si la temperatura aumenta, las comunidades heterotróficas se activan e inician la descomposición de la materia orgánica con el concurrente incremento en el contenido de CO<sub>2</sub> y una reducción en el nivel de O<sub>2</sub> en estos espacios intersticiales de la materia prima lo que ocasiona zonas anaerobias y puede generar compuestos con olor desagradable (Kulcu y Yaldiz, 2007).

### ***Humedad***

La disponibilidad de agua puede convertirse en un factor limitante durante el proceso, debido a que los microorganismos solo pueden emplear moléculas orgánicas disueltas en agua, se debe mantener una humedad óptima entre 40-60%, si la humedad cae por debajo del 40% la actividad microbiana decae hasta inactivarse. De acuerdo con Costa et al., (1995), un exceso de agua (mayor a 60%) interfiere con la disponibilidad del oxígeno y la aireación; la descomposición del material los nutrientes lixivian y se incrementa el olor, debido a la descomposición anaeróbica (Hogan, 1998).

Una máxima transferencia de nutrientes y compuestos catabólicos de los microorganismos tiene lugar en un ambiente húmedo, el rango típico de humedad depende de la materia prima que generalmente inicia el proceso en el intervalo de 55–65 %, no existe un valor estándar de humedad final, dado que depende del tratamiento del producto post composteo, es ampliamente aceptado que si la humedad cae por debajo de 30-35% se presenta una marcada inhibición de la actividad microbiana (Trois y Polster, 2007).

Por otra parte, un exceso de humedad conduce a la formación de fracción líquida de la composta, de color negro característico, que se produce directamente de las pilas de compostaje, contiene nutrientes y microorganismos por lo que ha sido considerada,

tradicionalmente como fertilizante líquido orgánico. Actualmente, este material está siendo utilizado para el control de plagas y enfermedades, ya que tiene una gran abundancia y diversidad de microorganismos benéficos (Litterick *et al.*, 2004). Dependiendo de la materia orgánica de la que proviene, puede contener productos químicos antimicrobianos que inhiben el crecimiento de hongos; por su variedad es muy difícil determinar el número de microorganismos benéficos presentes en este sustrato líquido (Fortis *et al.*, 2009). La fracción líquida que se obtiene del proceso de composteo (por ejemplo, del estiércol), también conocida como escurrimiento de composta o extracto de composta tiene la ventaja de que su densidad es más uniforme que la de los pesticidas convencionales y no son considerados tóxicos (Simpson, 1986).

### ***Temperatura y pH***

La temperatura afecta el crecimiento microbiano, su actividad en el proceso de composteo y la velocidad a la que se descompone la materia prima; por ello, es necesario alcanzar y mantener por cierto periodo la temperatura de operación durante el composteo. Se sabe que altas temperaturas promueven un rápido composteo, mejorando la eficiencia y la efectividad del proceso al acelerarlo y destruir microorganismos patógenos, en tanto que bajas temperaturas son indicativas de actividad microbiana, reducida que a su vez puede indicar bajos niveles de oxígeno o inadecuadas condiciones de humedad (Cooperband, 2002).

Generalmente, se seleccionan y controlan las temperaturas de operación para maximizar la sanitización (donde altas temperaturas son más efectivas) y la estabilización (donde altas temperaturas inhiben el proceso). En términos operativos, la temperatura puede ser mayor a 55°C, para maximizar la sanitización, o bien entre 45 y 55°C para maximizar la velocidad de degradación y 35-49°C para maximizar la diversidad microbiana (Miyatake e Iwabuchi, 2006, Baeta-Hall *et al.*, 2002). Además, en climas templados, el proceso es más rápido en primavera y verano, disminuyendo en época de invierno, no obstante el tamaño de la pila puede aumentar la retención de calor y mantener actividad dentro de la pila.

Con relación al valor de pH se sabe que la acidez o alcalinidad de la materia orgánica afecta el crecimiento de los microorganismos, la descomposición bacteriana se realiza mejor en intervalos de pH entre 6.0-7.5 (Costa *et al.*, 1995), mientras que la actividad fúngica se incrementa en el intervalo de 5.5-8.0. Además, si el material en composteo excede un pH de 7.5, puede perderse nitrógeno en forma de amonio

(Castrillón et al, 2006), lo que implica generación de olores durante el proceso de composteo.

### ***Tamaño de partícula***

El tamaño de partícula tiene un efecto directo en el volumen de macroporos en la pila y sobre la disponibilidad de nutrientes, además de aportar estructura a la pila. Un tamaño de partícula entre 2.5 cm a 5.0 cm entregará un volumen óptimo de macroporos entre 30-50% (Trois y Polster, 2007). Partículas muy grandes retardan el proceso de composteo. También la forma química y el tamaño de partícula de la fuente de C, afectan la disponibilidad de este para los microorganismos (Liang et al., 2006).

Por otra parte, cuando las partículas son demasiado pequeñas y compactas, la circulación de aire a través de la composta se inhibe disminuyendo el oxígeno disponible para los microorganismos dentro del material y reduciendo en última instancia el índice de la actividad microbiana. El tamaño de partícula también afecta la disponibilidad del carbono y del nitrógeno, esto es porque si se deja un tamaño mayor a 5cm las astillas de la poda la superficie de contacto disminuye y el carbono como el nitrógeno serán menos disponibles para los microorganismos por lo que se recomienda disminuir el tamaño de partícula de la poda entre 2.5 y 5.0cm para aumentar la superficie de contacto y el carbono y nitrógeno se encuentren disponibles para los microorganismos (Trautmann y Kransy, 1997).

## **2.2.3 Técnicas de composteo.**

Las técnicas de composteo varían principalmente de acuerdo a las condiciones de aireación, período de aireación y calidad requerida en el producto final. La elección de cualquiera de ellas depende principalmente de: inversión, funcionamiento, disponibilidad de terreno, complejidad operacional y el potencial para generar problemas medioambientales del producto que desea elaborar (INTEC, 1999).

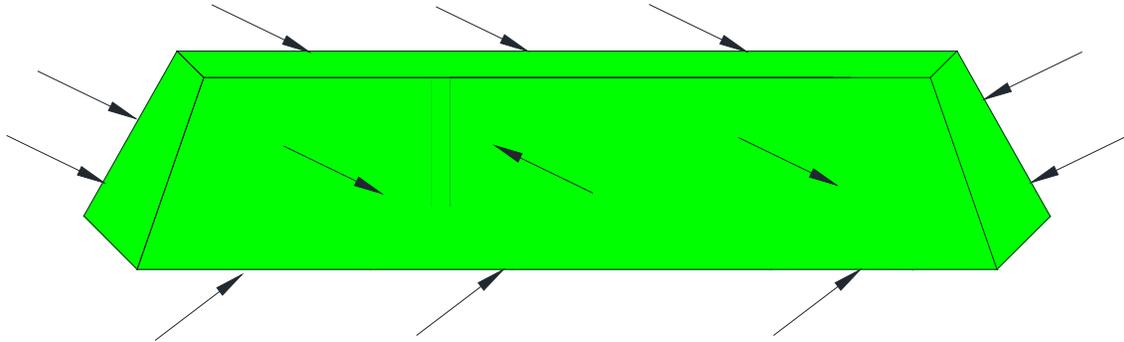
A continuación se hace una breve descripción de los sistemas más utilizados para el proceso de composteo.

### **2.2.3.1 Sistemas Abiertos**

#### **Pilas estáticas**

Es el sistema de composteo más antiguo, consiste en la formación de pilas de altura reducida, que se dejan sin movimiento. La aireación ocurre naturalmente a través

del aire que fluye en forma pasiva a través de la pila Figura 3. Sin embargo, es común que se produzcan en algunos puntos de la pila anaerobiosis, generando malos olores, gases y líquidos no deseables. Es por esto que se debe tener especial cuidado en la realización de la mezcla inicial, eligiendo materiales que permitan tener una adecuada porosidad de la pila durante todo el proceso. Es un método lento y no permite la obtención de un producto de alta calidad (Ecoamérica, 2001).



Flujo de aire a través de la pila  
Figura 3. Pila estática.

#### Pilas aireadas.

Las pilas aireadas son de los sistemas más sencillos y económicos. Esta técnica de composteo se caracteriza por el hecho de que la pila se remueve periódicamente para homogeneizar la mezcla y controlar su temperatura, a fin de eliminar el calor excesivo, controlar la humedad y aumentar la porosidad de la pila para mejorar la ventilación Figura 4. Después de cada volteo, la temperatura desciende entre 5 a 10°C, subiendo de nuevo en caso de que el proceso no hubiese concluido. La frecuencia del volteo depende del tipo de material, de la humedad y de la rapidez con que se desee realizar el proceso, siendo habitual aplicar un volteo cada 6 a 10 días. Normalmente se hacen registros periódicos de temperatura, humedad y oxígeno para aplicar el volteo (INTEC, 1999).

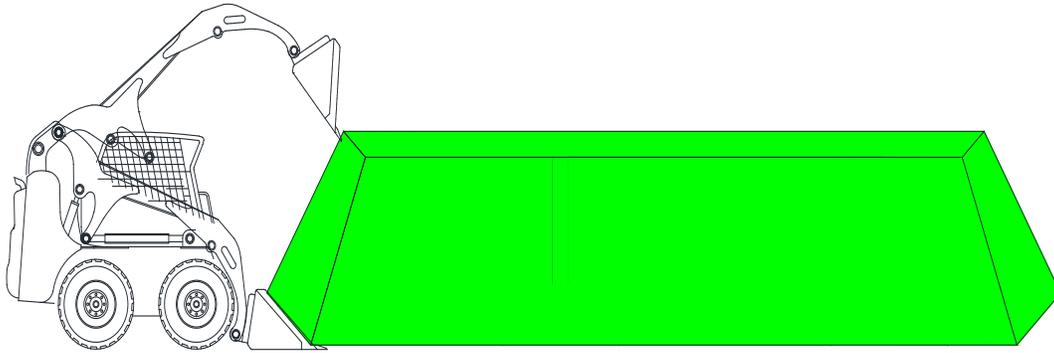


Figura 4 Pila aireada.

Pilas con aireación pasiva.

Este sistema es muy apropiado considerando el costo-beneficio con aireación forzada o pilas con volteo. Para favorecer la ventilación natural de las pilas, se emplean estructuras que permiten un mejor flujo de aire desde la parte inferior hacia la zona superior la cual se airea por convección natural como se observa en la Figura 5. El aire caliente que sube desde el centro de la pila crea un vacío parcial que aspira el aire de los lados. La forma y tamaño óptimo de la pila depende del tamaño de partícula, contenido de humedad, porosidad y nivel de descomposición, todo lo cual afecta el movimiento del aire hacia el centro de la pila (INTEC, 1999).

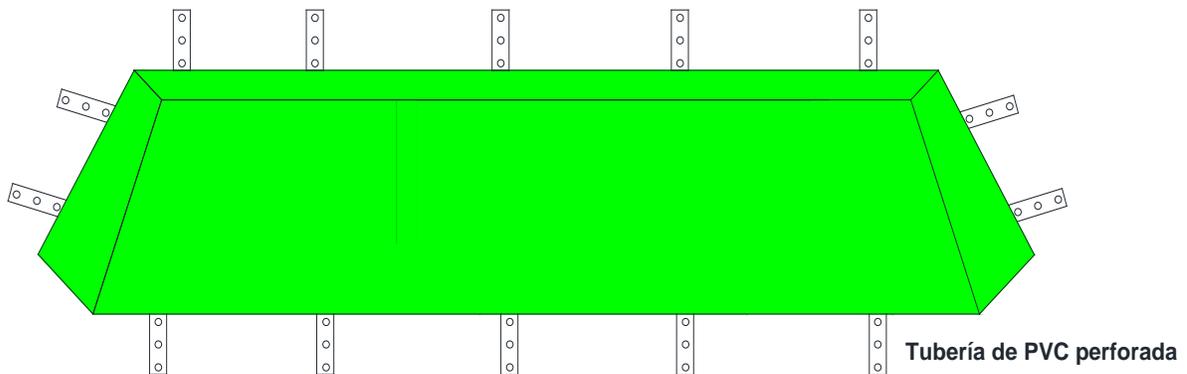


Figura 5 Pila con aireación pasiva.

### Pilas con aireación forzada.

Con las pilas con aireación forzada es posible tener un mayor control de la concentración de oxígeno y mantenerla en un intervalo apropiado (15-20 %), para favorecer la actividad metabólica de los microorganismos aerobios que intervienen en el proceso. El aporte de oxígeno se realiza por varias vías como la succión o inyección así como las variantes que incluyen a los dos tipos. El aporte de oxígeno puede realizarse de forma continua o en intervalos, para llegar a una determinada temperatura, (entre 55 y 60°C), o descender la temperatura si ya se rebasó ese intervalo Figura 6. Una vez que se constituye la pila, no se toca, en general, hasta que la etapa activa de compostaje sea completa. (Tchobanoglus, 1993).

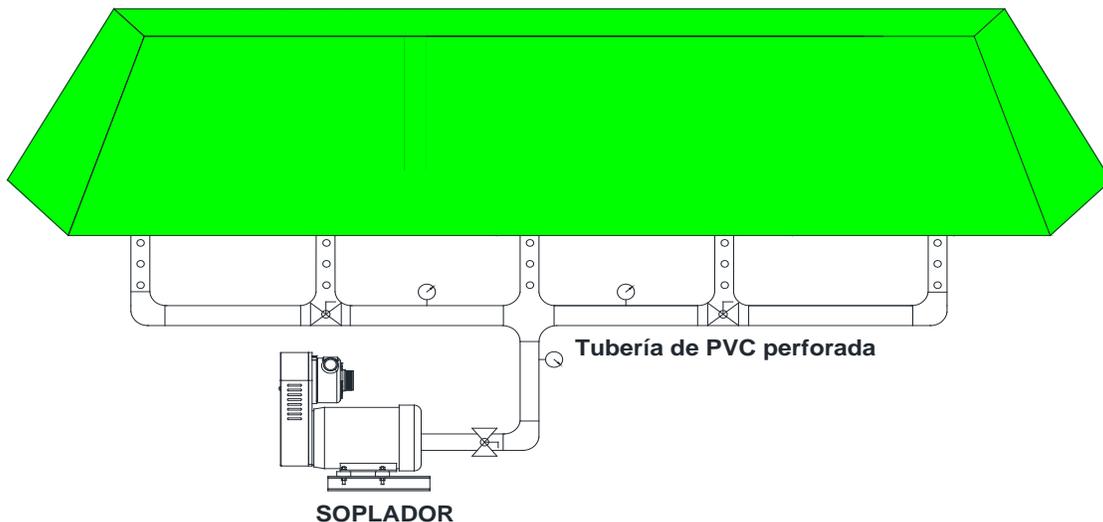


Figura 6 Pila con aireación forzada.

### **2.2.3.2 Sistemas cerrados**

Estos sistemas permiten un mejor control de los distintos parámetros del proceso, en la mayor parte de los casos, así como un menor tiempo de residencia y la posibilidad de realizar un proceso continuo. Se caracterizan por llevar a cabo el composteo en reactores cerrados, el principal inconveniente es el elevado costo de inversión de las instalaciones. Los sistemas cerrados principalmente se dividen en reactores de flujo horizontal y vertical.

Los reactores de flujo vertical suelen tener alturas superiores a los 4 metros y pueden ser continuos o discontinuos; los reactores discontinuos contienen, a diferentes

alturas pilas de 2-3 m con un sistema de aireación forzada o volteo hacia pisos inferiores, su principal inconveniente es el costo de construcción como se observa en la Figura 7. Los reactores de flujo horizontal se dividen en; los que contienen un depósito rotatorio, los que tienen un depósito de geometría variable con un dispositivo de agitación o los que no tienen un sistema de agitación y permanecen estáticos.

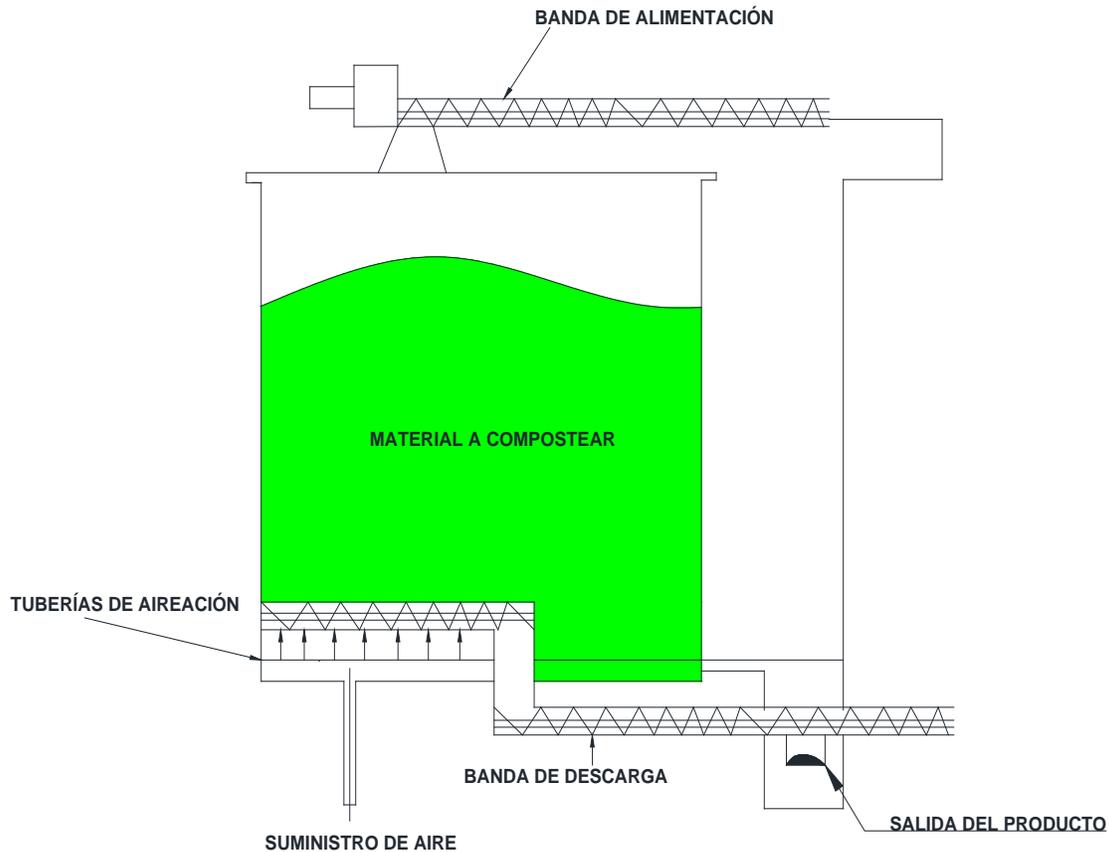


Figura 7 Reactor de Flujo Vertical.

El proceso de composteo en la PCBP se realiza a través de pilas extendidas con volteo, esta técnica es aplicada de manera industrial en diversas regiones del mundo, algunos estudios han publicado las características del proceso. En la tabla 1 se presenta un resumen de las diferentes experiencias de la aplicación de pilas extendidas utilizando como materia prima FORSU, RSU y mezclas de éstos dos tipos, con el objetivo de contextualizar la situación de la PCBP con otros casos semejantes. En la tabla se puede observar que el proceso dura entre tres y seis meses en la mayoría de los casos, y que la aireación mecánica es el denominador común y por último se destaca que la dimensión de las pilas (para los casos que reportan la información) es menor que la manejada por la PCBP.

### 2.3 Aceleración del proceso de composteo

En las últimas décadas se han puesto en operación diversos sistemas de composteo a gran escala, sin embargo, muchos de ellos han fracasado desde una perspectiva económico-ambiental, por lo que en los últimos años la tendencia global es controlar y optimizar el proceso para evitar: problemas medio-ambientales, mala calidad del producto y costos elevados de producción (Bongochgetsakul e Ishida, 2007). Es por eso que en este trabajo aborda la aceleración del proceso de composteo para en un futuro aportar los elementos necesarios para disminuir los costos de producción y cumplir con la calidad para colocar en el mercado el producto final.

Tabla 1 Experiencias del proceso de composteo en pilas extendidas con volteo mecánico.

Materia prima	Relación	Tiempo del proceso incluye maduración	Tipo de proceso y frecuencia de volteo	Ancho de pila m	Alto pila m	País o región	Referencia
<b>FORSU + residuos vegetales</b>	1:1 v/v	3.3 meses y después entra al estado de maduración	Pilas extendidas con volteo y aireación forzada	NR	NR	Italia	(Castaldi <i>et al.</i> 2005)
<b>Residuos sólidos domésticos</b>	100 %	3 meses	Pilas extendidas volteo mecánico	NR	NR	India	(Gautam <i>et al.</i> 2010)
<b>FORSU mezclada alimentos, papel y jardinería</b>	Variable	3-4 meses	Pilas extendidas volteo mecánico semanal	NR	NR	Estados Unidos	(Komilis y Ham 2004)
<b>FORSU</b>	100 %	2.5 meses	Pilas extendidas volteadas semanalmente por 5 semanas	3	NR	Pakistán	(Jilani, 2007)
		24–36 meses	1 vez año	6.1 - 7.3	3.0-3.7		
		14–18 meses	3 – 5 veces por año	3.7 - 4.3	1.5–2.1		
<b>FORSU mezclada</b>	100%	4–6 meses	Semanalmente	3.7 - 5.5	1.5-2.4	Países en vías de desarrollo	(Hornweg <i>et al.</i> 1999)
		3–4 meses	Pila estática aireada, volteada esporádicamente	4.9 - 6.1	2.4-3.0		

NR. No reportado

La aceleración del proceso de composteo puede lograrse a través de la adición de nutrientes específicos (bioestimulación) o bien mediante la inoculación de microorganismos específicos (bioaumentación), que incrementan y mejoran la capacidad de degradación de la FORSU o la combinación de ambos, logrando mayor control del proceso, una mayor velocidad de degradación y obtener productos de mayor calidad (Farrell y Jones, 2009). Adicionalmente, una adecuada aireación y suficiente material celulósico y otros factores, pueden minimizar el olor durante la biodegradación.

Un factor que origina que el tiempo de composteo aumente es la degradación de compuestos celulósicos los cuales se encuentran presentes en verduras, alimentos y residuos de poda principalmente (Nair y Okamitus, 2010). La principal preocupación en el proceso de composteo es su tiempo de duración por lo que actualmente se han planteado estrategias para acelerar el tiempo actual del proceso, una de ellas es la inoculación microbiana que consiste en aumentar las poblaciones microbianas y mejorarlas; además de que estos microorganismos generan las enzimas necesarias para la degradación de los materiales orgánicos (Ohtaki *et al.*, 2000). La eficiencia de la inoculación suele verse afectada por la competencia con los microorganismos nativos (Xi *et al.*, 2005) y la variación de la temperatura durante el proceso de composteo (Neklyudov *et al.*, 2006).

Si bien la adición de consorcios microbianos específicos durante el proceso de composteo ha dado buenos resultados como los mencionan Nakasaki *et al.* (1994), quienes sugieren que con la adición de la bacteria termófila, *Bacillus licheniformis*, aumenta la degradación de proteínas y se previene la acidificación en las primeras etapas del composteo; también estimula la proliferación de bacterias termófilas. Así mismo, Ghaffari *et al.* (2011) mostraron que la bacteria termófila *Anoxybacillus* sp. MGA110, mejoraba el proceso de composteo de los RSU ya que el inóculo es capaz de aumentar la temperatura durante el proceso y degradar los materiales celulósicos, esto lo infieren por el aumento en la actividad de la enzima carboximetilcelulose, en la fase termofílica como lo reportan Raut *et al.* (2008).

Así mismo, Cox *et al.* (2001) analizaron los efectos de la inoculación de hongos en la descomposición de lignina y polisacáridos en la hojarasca. Vargas-García *et al.* (2006) encontraron que la naturaleza de los inóculos microbianos utilizados en los estudios de laboratorio pueden predeterminar los tipos y procesos de transformaciones químicas sobre la evolución de sustancias húmicas durante el proceso de composteo.

Los resultados de las diversas investigaciones indican que la eficiencia en los procesos de composteo por medio de la inoculación dependen de las propiedades de la materia prima es decir las características de la FORSU y los microorganismos aplicados. Por ejemplo, Thomas (1995) realizó una investigación con diferentes poblaciones microbianas en el composteo de residuos de pescado y el inóculo no siempre ayudó a la reducción del tiempo de composteo, incluso en algunas ocasiones el tiempo del composteo con el inóculo fue mayor al composteo de forma natural. En algunas ocasiones el efecto del inóculo se igualó con el incremento de humedad durante el proceso de composteo (Tiquia *et al.*, 1997). Por lo que es difícil encontrar el mecanismo de inoculación pertinente en cada proceso de composteo ya que es dependiente de los microorganismos nativos y la naturaleza de la materia prima.

De acuerdo con lo reportado en la literatura, hay dos razones principales por las cuales un sistema de inoculación no alcanza la eficiencia deseada, la primera es la aplicación del inóculo, debido a que ésta depende de la escala del proceso, en procesos con capacidades menores a 20 m<sup>3</sup>/d, un sistema de aspersión sería suficiente para cubrir el material que se quiere someter al proceso de composteo no así en procesos donde el volumen sea mayor. La segunda razón es que existe una fuerte competencia de los organismos autóctonos con los microorganismos alóctonos, lo que causa que el proceso de composteo sea más lento al sufrir un proceso de adaptación del inóculo (Ming *et al.*, 2008).

Además de los problemas de la aplicación y competencia del inóculo hay que agregar el costo de realizar la inoculación de organismos externos en un sistema de composteo, ya que éste irá incrementando conforme la capacidad del sistema y si la eficiencia de la inoculación no es mejor con respecto al proceso con sus organismos nativos no será rentable ni atractivo para grandes productores de composta. Sin embargo, Ming *et al.* (2008) muestran que en los escurrimientos generados durante el proceso de composteo, se encuentran poblaciones de microorganismos con el metabolismo para aumentar la capacidad de degradación de la materia orgánica.

Otro parámetro importante que señalan como acelerador del proceso de composteo es el tamaño de partícula, debido a que dependiendo el tamaño de partícula la relación del oxígeno contenido en los poros de los materiales mezclados será mayor y se evitarán pérdidas de nitrógeno durante el proceso de composteo (Richard *et al.*, 2004). Diversos autores al tamaño de partícula como una propiedad física que juega un papel

importante durante el proceso de composteo ya que si se tiene un tamaño adecuado entre 2 y 3.5cm de diámetro se puede asegurar la condición aerobia del composteo (Ruggieri *et al.*, 2009).

Hamoda *et al.* (1998), observaron un aumento en la degradación de RSU con un tamaño de partícula de 20mm y 40mm, debido a que los espacios entre las partículas de los materiales que se sometieron al proceso de composteo es mayor y el oxígeno tiene un mejor acceso y en consecuencia el proceso de degradación es más rápido. Ekland y Kirchmann, (2000), mostraron que si el tamaño de partícula era muy pequeño (menor a 1mm) aumentaba la pérdida de nitrógeno en forma de amonio, se generaban zonas anaerobias dentro de la pila y el tiempo de composteo se incrementa en comparación con tamaños de partícula entre 2 y 5cm.

El tamaño de partícula, además de acelerar el proceso, se encuentra asociado a otros parámetros como pH, humedad y las diferentes transformaciones de la FORSU durante el proceso de composteo. Si se tienen tamaños de partículas menores a 20mm los valores de pH permanecen ácidos debido a la heterogeneidad del material, de la misma manera el contenido de humedad no es homogéneo y genera zonas anaerobias y presencia de olores desagradables durante el proceso, también se asocia el tamaño de partícula al contenido de materia orgánica, nitrógeno y fósforo en el producto final, ya que se observa mayor formación de ácidos húmicos en un tamaño de partícula mayor a 20mm (Zhao *et al.*, 2012).

## **2.4 Gestión de los RSU la Ciudad de México**

Hasta antes de los años setenta los residuos sólidos generados por la CM ocuparon un lugar insignificante en el análisis de la problemática prioritaria de la urbe. No solamente porque la mayoría de la población pensaba poco en los problemas de contaminación que causaban, sino porque su disposición se efectuaba sin aparentes problemas, o por lo menos, sin que la mayoría de la población se enterara. Actualmente se generan 12,664 ton/día de RSU, de acuerdo con el inventario de residuos del Distrito Federal en 2011, el promedio de generación de RSU por habitante fue de 1.44 Kg/día. Las características particulares de los RSU son determinadas por su fuente de origen, en la tabla 2 se muestran las principales fuentes de origen, así como las principales características de los residuos.

Tabla 2. Fuentes de origen de RSU en el Distrito Federal

Fuente	Descripción
<b>Domiciliarios:</b>	Residuos producidos en domicilios, unifamiliares y plurifamiliares.
<b>Comerciales:</b>	Son los residuos provenientes de tiendas de autoservicio y departamentales, además de locales comerciales.
<b>Servicios:</b>	Comprenden los que provienen de hoteles, escuelas y oficinas.
<b>Controlados:</b>	Son aquéllos que provienen de fuentes que, adicionalmente de los RSU, también generan Residuos Peligrosos y requieren de un manejo diferente a los anteriores en cuanto a la posible mezcla que pueda presentarse durante su almacenamiento y recolección, tales fuentes son: unidades y laboratorios médicos, veterinarias, reclusorios, terminales terrestres y aéreas.
<b>Diversos:</b>	Residuos provenientes de áreas verdes, vías rápidas, así como los materiales voluminosos y neumáticos.

Fuente: Secretaría de Obras y Servicios. Dirección General de Servicios Urbanos. 2011

La principal fuente generadora de RSU en la CM son los domicilios los cuales aportan el 47%, después le siguen los comercios (15%), mercados (10.5%) los servicios aportan un 15%, la Central de Abasto (CEDA) 5% mientras que el 7.5% restante corresponde a los denominados controlados, diversos y los que provienen de las actividades del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

Los RSU son recolectados en cada una de las 16 delegaciones políticas en las de la CM, posteriormente son llevados a las estaciones de transferencia (ET), que son 13 y están ubicadas de forma estratégica en la ciudad (Figura 8). En éstas los RSU donde son puestos en camiones transfer con cajas de 70m<sup>3</sup> de capacidad para ser transportados hacia 2 plantas de selección (San Juan de Aragón y Santa Catarina) donde van separando y recuperando los materiales reciclables y todo lo que no tiene valor económico es destinado a disposición final a Rs's que están fuera del D.F. y la FO separada en fuentes es enviada a las plantas de composta (SOS-CIEMAD, 2012).

La composición de los RSU en la Ciudad de México, está determinada como se muestra en la Figura 9 los RSU están compuestos básicamente por siete subproductos estos datos fueron obtenidos de un estudio realizado por Orta *et al.* (2010), dónde se realizaron muestreos en 9 de las 13 E.T. ubicadas en las delegaciones de la Ciudad.

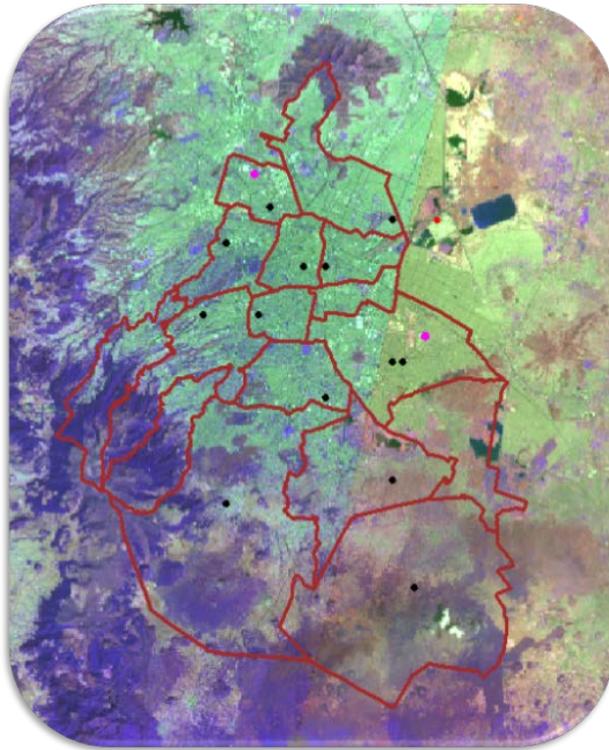


Figura 8 Ubicación de las Estaciones de Transferencia en la Ciudad de México.

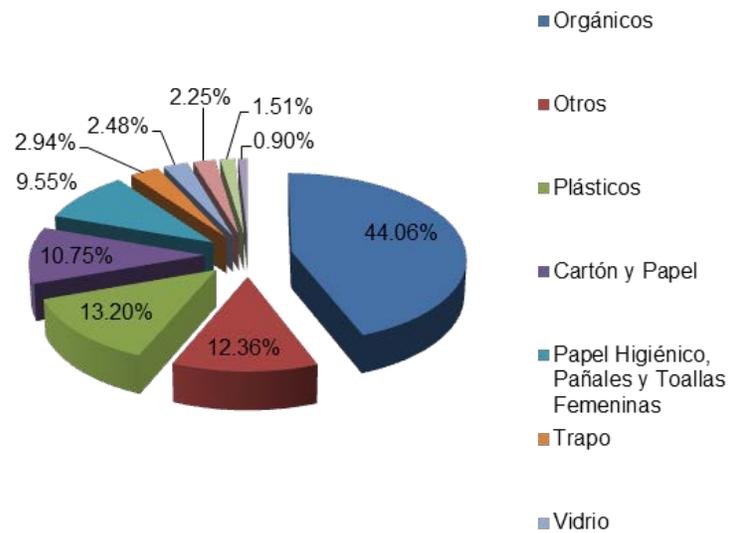


Figura 9 Composición en porcentaje de los RSU en el Distrito Federal. (Orta et al. en prensa).

En la Figura 10 se muestra el flujo de los RSU hasta el 2011 cuando aún se encontraban en operación el RSBP IV y su planta de selección.

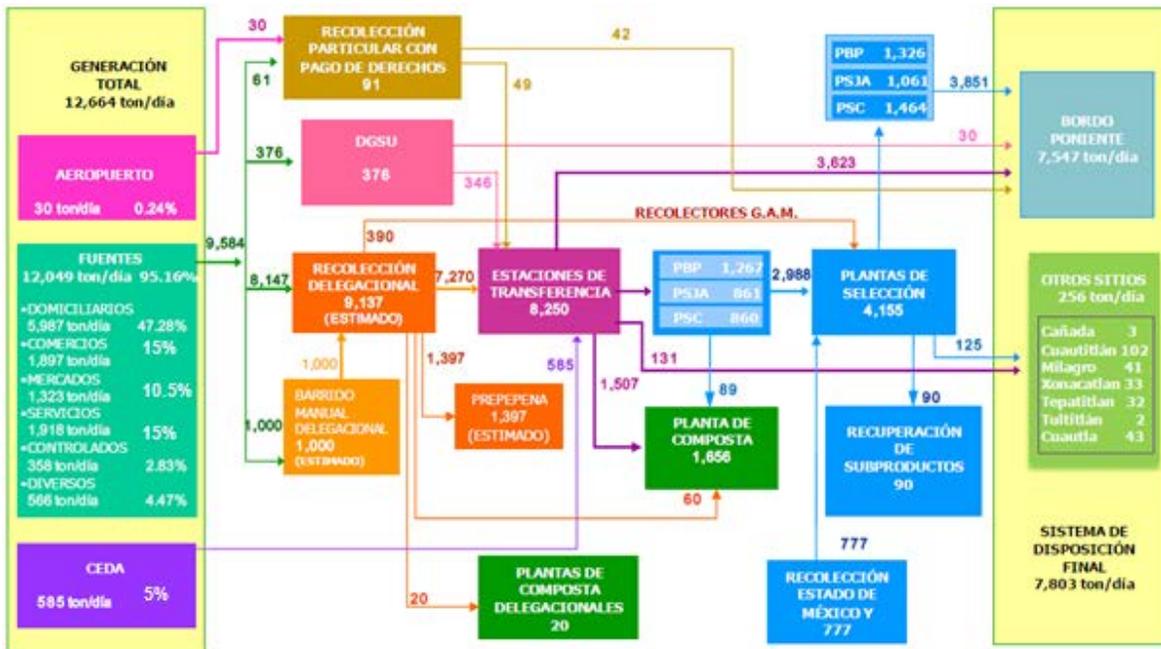


Figura 10. Flujo de RSU en la Ciudad de México en el año 2011. (SOS, 2011)

Como se puede observar en la Figura 10 se generan aproximadamente 5,572 ton/día de FORSU de las cuales enviaban 1,656 ton/día a la PCBP y solo 20 ton/día a las plantas de composta delegacionales, el restante se seguía disponiendo en el RSBP IV y en los sitios de disposición final ubicados en el Estado de México, Puebla y Morelos. También es importante señalar, que la FORSU representa el 44% del total de los RSU por lo que a partir del 2012 la PCBP recibe 2500 ton/día de FORSU aproximadamente el 50% del total con lo cual aumenta la oportunidad para desarrollar sistemas de aprovechamiento debido que al separar en fuente se aumenta el reciclaje de la fracción inorgánica y con la producción de composta se disminuye la emisión de CH<sub>4</sub> a la atmósfera, uno de los principales gases de efecto invernadero.

#### 2.4.1 Marco Legal del proceso de composteo

La transición de la PCBP a gran escala y el interés por la comercialización de la composta producida requiere del cumplimiento de estándares de calidad, para el caso del composteo en México estos estándares son enmarcados dentro de la normatividad de los RSU. Actualmente México se encuentra en proceso de elaborar instrumentos jurídicos que regulen las actividades en torno a los RSU y tomando en cuenta cómo afectan estos

al medio ambiente, en general, la tendencia para la elaboración de instrumentos de planeación, en torno a la Gestión integral de los Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU), es obligatoria y el composteo se sitúa como un elemento indispensable para esta gestión.

Con la promulgación de la *Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal*, publicada en la Gaceta del Distrito Federal, el 22 de abril de 2003 y con base, fundamentalmente en su Art. 33, el Programa para la Separación de RSU adquirió un carácter obligatorio y considera dos fracciones: residuos orgánicos e inorgánicos.

Con los resultados observados en la operación del programa de separación de los RSU, así como las líneas de acción prioritarias del GDF, en materia ambiental, descritas en el Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos (PGIRS) para el Distrito Federal 2004-2008, se tomó la decisión de adecuar la logística y operación en las E.T. con el objetivo de mantener y mejorar la separación y recolección en las delegaciones.

También se promovió el programa “Vamos a separar para respirar mejor”, el cual está orientado al aprovechamiento de la FORSU como materia prima en la producción de composta. Los principales puntos de la operación del programa de separación fueron los siguientes:

- Separar los RSU en dos fracciones: orgánicos e inorgánicos
- Recolectar de manera separada los RSU de la siguiente forma: lunes, miércoles, viernes y domingos los residuos inorgánicos; martes, jueves y sábados los residuos orgánicos.
- Separar de forma independiente los RSU en orgánicos e inorgánicos en los mercados públicos.
- Asignar a las 13 estaciones de transferencia, tolvas y cajas exclusivas para la recepción de los residuos orgánicos limpios.
- Recibir la FORSU provenientes de las estaciones de transferencia en la PCBP para su aprovechamiento en el proceso de elaboración de composta.
- Remunerar a la Sección 1 del Sindicato Único de Trabajadores del Distrito Federal (SUTGDF), \$50.00 (Cincuenta pesos 00/100 M.N.) por tonelada de residuos orgánicos limpios, ingresados a las E.T. este pago lo realiza el Gobierno del Distrito Federal (GDF).

Una vez que se consiguió incrementar la eficiencia de la separación de los RSU y se incrementó la capacidad de recepción en la PCBP, aún faltaba un instrumento que regulara la producción y la calidad de la composta en la CM, por lo que a principios del

2012 la SMA del Distrito Federal convocó a un grupo de trabajo para la elaboración de una norma que se encargará de regular la calidad de la producción de la composta que se produce en el Distrito Federal.

El 30 de noviembre del 2012 se publicó en la gaceta oficial del D.F. la norma ambiental para el D.F. NADF-020-AMBT-2011, que se intitula: "Que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el Distrito Federal."

#### **2.4.2 Plantas de Composta en la Ciudad de México**

Actualmente en la Ciudad de México se encuentran en operación seis plantas de composta de las cuales cinco son delegacionales y la sexta se encuentra en las instalaciones del RSBP IV. En la tabla 3 se detalla la capacidad de cada una de las plantas, su ubicación, la producción de composta anual y el destino de la composta producida en cada una de ellas.

La planta de composta más representativa es la PCBP, esta planta estaba diseñada para tratar 20 ton/día de residuos de poda y residuos orgánicos provenientes de mercados, entre los años del 2004-2010, la planta procesó 60 ton/día. En 2011, el promedio de recepción fue de 1,647 ton/día, con este incremento en la recepción de la FORSU se realizó el acondicionamiento de los patios de proceso para obtener una superficie de 302,395 m<sup>2</sup>, esta superficie, comprende los caminos perimetrales de acceso, la zona de talleres y oficinas. La planta de selección ocupa una superficie de 69,290 m<sup>2</sup> y las oficinas de la residencia de Bordo Poniente ocupan 10,085 m<sup>2</sup>, por lo que la superficie total es de 381,770 m<sup>2</sup> (38.2 hectáreas).

En las Figuras 11, 12 y 13 se muestran la evolución de la PCBP en tres fechas importantes: 2009 cuando procesaban 60 ton/d, 2012 cuando comienza la ampliación de la PCBP al cerrar el RSBP IV y finalmente 2013 que es como se encuentra actualmente la PCBP.

Es importante mencionar, que para lograr el incremento de capacidad de procesamiento en la PCBP, el GDF a través de Fondos Metropolitanos realizó una inversión de \$114, 000,000.00 (Ciento catorce millones de pesos) (IPN-SOS, 2011), en maquinaria como volteadoras, cargadores frontales, molinos de rotomartillos, cribadoras,

embolsadoras de composta entre otros equipos, con el fin de poder procesar las 2500 ton/día que en 2013 llegan a la PCBP.

En 2012 se realizó el estudio “Viabilidad de la Capacidad del Área Actual de la Planta de Composta, así como, su Capacidad de Operación y la Viabilidad de la Inclusión del Área de la Planta de Selección a la Planta de Composta.” dónde se determinó que el tiempo de composteo actual en la PCBP es de 90 días, incluyendo el proceso de maduración.

Con el incremento de capacidad de la PCBP, actualmente la producción de composta en la Ciudad de México es de 186,665 toneladas al año y sólo se pueden colocar 18,320ton/año (Tabla 3) lo cual es un indicador de que falta realizar estudios de mercado para comercializar y colocación del producto, ya que solo se puede entregar un 10% de la producción total anual, por lo que es necesario realizar un estudio sobre la aplicación de la composta producida en la PCBP dentro de los que se puede considerar para el mejoramiento de suelos y la producción de alimentos, lo que permita tener un mercado y en consecuencia la salida del producto tanto para uso en zonas agrícolas como al público en general.

Tabla 3 Principales Plantas de Composta en la Ciudad de México.

Planta de composta	Ubicación	Capacidad instalada (ton/año)	Producción Composta (Ton/año)	Destino de la Composta	Composta entregada (ton/año)
<b>Bordo</b>	Autopista Peñón Texcoco Km.	912,500	182,500	DGSU	3,440
<b>Poniente</b>	2.5 Zona Federal de Texcoco.			Planta de Selección Bordo Poniente y Disposición Final	9,636
				Vialidades primarias	18
				Delegaciones	2,130
				Subprogramas	21
				Otros	45
				<b>SUBTOTAL 1</b>	<b>15,290</b>
<b>Álvaro Obregón</b>	Av. 5 de Mayo s/n Col Lomas de Tarango.	1,840	1,412	Parques, jardines, áreas verdes, glorietas, camellones, escuelas, Centros Sociales de los viveros de la Delegación: Nabor Carrillo, Bruno Newman y Juana Gallo, a los ciudadanos por medio del Centro de Atención Ciudadana (CESAC).	1,840
<b>Cuajimalpa</b>	Las Torres s/n Col. Del Padre Cuajimalpa.	1,200	409	A particulares	261
<b>Iztapalapa</b>	Panteón San Lorenzo Tezonco. Av. Tlahuac s/n.	1,440	506	Parques y jardines de la Delegación "Programas de Reforestación y Programa de Agricultura Urbana"	506
<b>Milpa Alta</b>	Ejido San Antonio Tecomitl San Pedro Atocpan.	1,407	1400	Se entrega gratuitamente a campesinos, agricultores y nopaleros de la Delegación para su aprovechamiento del abono orgánico por medio de CESAC	424
<b>Xochimilco</b>	Periférico Oriente	1,290	N.D	N.D	N.D
				<b>SUBTOTAL 2</b>	<b>3,031</b>
<b>TOTAL</b>		<b>919,677</b>	<b>186,665</b>	<b>TOTAL (SUBTOTAL 1 + SUBTOTAL 2)</b>	<b>18,320</b>

N.D. No disponible, Fuente: Secretaría de Obras y Servicios inventario de residuos del D.F, 2011.



Figura 11 Imagen Spot 2009 PCPB. (Google Earth).    Figura 12 Imagen Spot 2012 PCPB. (Google Earth).

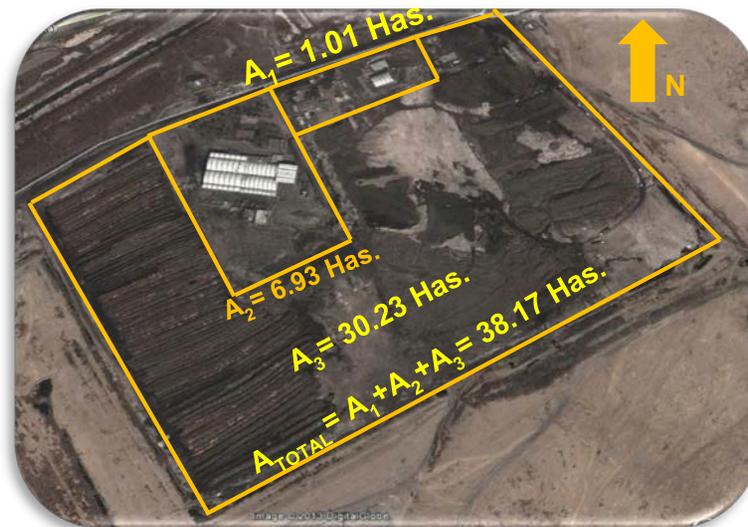


Figura 13 Imagen Spot 2013 PCPB. (Google Earth).

### 3. MÉTODOS

#### 3.1 Estrategia experimental

Para lograr los objetivos planteados, probar la hipótesis de trabajo y poder relacionar las variables independientes con las dependientes con el menor número de experimentos posibles se diseñó una estrategia experimental que permitiera combinar la aireación, tamaño de partícula e inóculo (variables independientes) para probar su influencia en el tiempo de composteo (variable dependiente). En la figura 14 se presenta el diagrama de flujo del diseño experimental desarrollado.

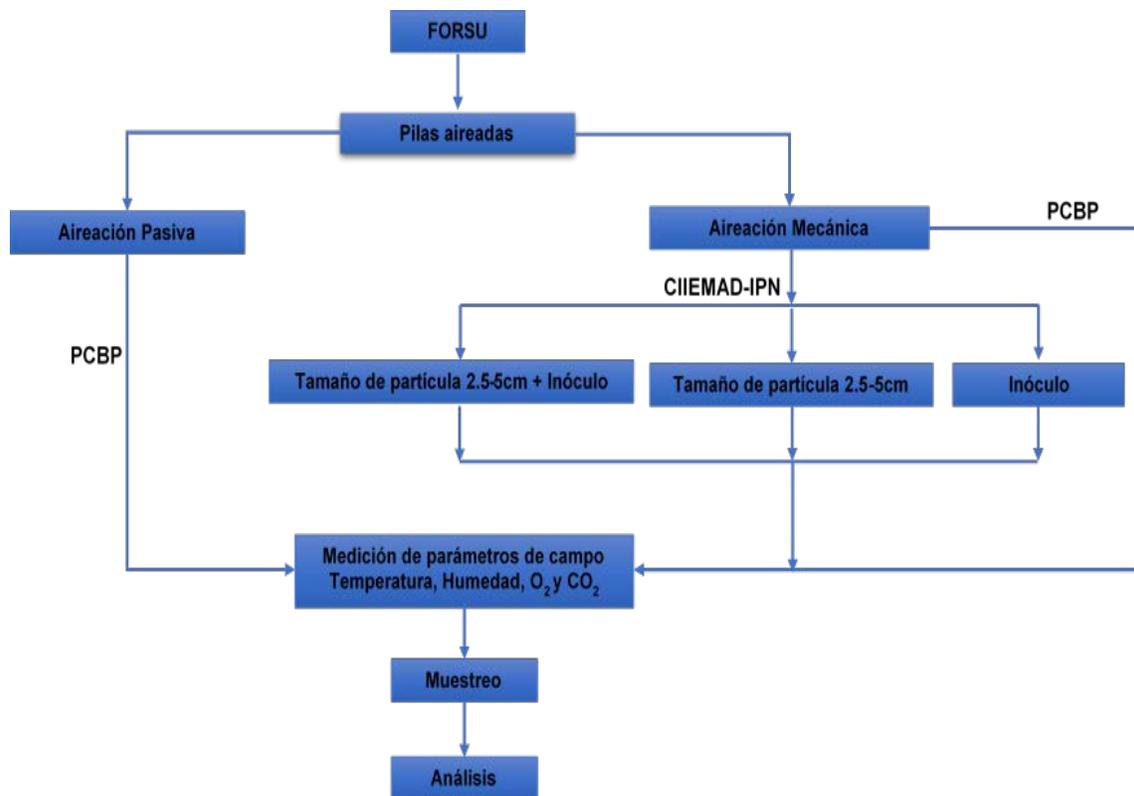


Figura 14. Estrategia experimental, para reducir el tiempo de composteo de la FORSU.

#### 3.2 Proceso de composteo

Se preparan mezclas de la FORSU separada en fuente y recibida en la PCBP (pureza del 90 %) con residuos de PODA en proporción de 70-30 molida o sin moler y se construyen pilas triangulares de dos diferentes tamaños: a) contienen 0.155 ton distribuidas en una área de 1 m ancho x 1 m largo x 0.25 m de altura; b) incluyen 14 ton dispersas en una dimensión de 5 m largo x 3 m ancho y 1.5 m altura. Se continúa su preparación para procesarse con o sin adición de inóculo y vía aireación pasiva o

mecánica (volteo semanal con pailoder o con pala dependiendo del tamaño), se mantienen un tiempo aproximado de 3 meses y durante todo el proceso se preserva el mismo nivel de humedad. Tanto al inicio como durante el proceso de composteo se dio seguimiento a las más relevantes características físicas, químicas y biológicas tanto de la materia prima como del producto.

### 3.2.1 Construcción de las pilas

Se construyeron un total de 7 pilas extendidas para el seguimiento del proceso de composteo. Cuatro pilas de tamaño grande fueron construidas en las instalaciones de la PCBP y las tres restantes de menor dimensión se construyeron en las instalaciones del CIEMAD-IPN. En las tablas 4 y 5 y en las Figuras 15 y 16 se muestran las características de cada una de las pilas en relación a volumen, peso, y las variables de trabajo en cada una de ellas.

La construcción de las pilas en el CIEMAD-IPN tuvieron como objetivo evaluar si las variables de molienda y la adición de un inóculo microbiano influyen en la reducción del tiempo de composteo, por lo que fue necesario realizar el diseño experimental como se muestra en la tabla 4 para determinar si una sola variable, la mezcla de ambas o en su defecto ninguna de las variables contribuyeron a reducir el tiempo de composteo.

Tabla 4 Características de las Pilas en el CIEMAD-IPN.

Pila	Materia Prima	Medidas (m)	Volum en (m <sup>3</sup> )	Peso (Ton)	Variables de proceso.
Tratamiento A	70%FO+30%Poda	1 ancho, 1 largo, 0.25 de altura	0.25	0.155	Aireación mecánica, molienda, inóculo microbiano
Tratamiento B	70%FO+30%Poda	1 ancho, 1 largo, 0.25 de altura	0.25	0.155	Aireación mecánica, molienda
Tratamiento C	70%FO+30%Poda	1 ancho, 1 largo, 0.25 de altura	0.25	0.155	Aireación mecánica, sin molienda, inóculo microbiano.

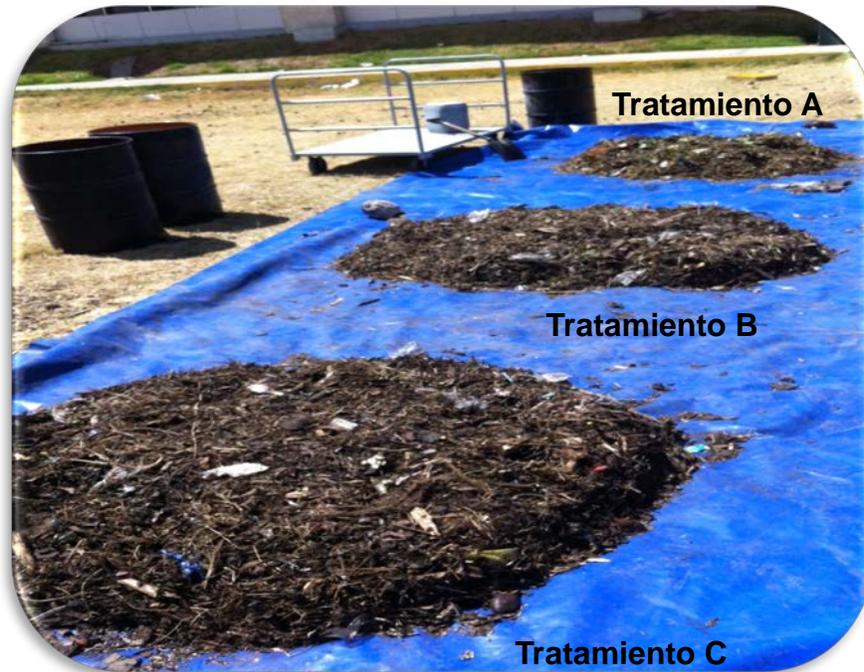


Figura 15 Pilas construidas en el CIEMAD-IPN.

Por otro lado, el objetivo de la construcción de pilas en la PCBP, fue evaluar el efecto que tienen sobre el proceso de composteo que la materia prima no sea molida y dos diferentes formas de aireación, por un lado la aireación tradicional mecánica y por otro lado la aplicación de aireación pasiva con tubería de PVC de 3"Ø con orificios de  $\frac{3}{4}$  de pulgada a lo ancho de las pilas como se observa en la tabla 5. La molienda fue realizada en la PCBP con un molino de martillos Veermer (Figuras 16 y 17) y para la construcción y volteo de las pilas se utilizó un minicargador frontal Bobcat como se observa en la Figura 18.



Figura 16 Molienda de la FORSU



Figura 17 Molienda de la Poda.

Tabla 5 Características de las pilas construidas en la PCBP

Pila	Materia Prima	Medidas (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso (Ton)	Variables de proceso.
Tratamiento D	70%FO+30%Poda	5 largo, 3 ancho y 1.5 altura	22.5	14	Aireación pasiva (tubería de PVC), sin molienda
Tratamiento D	70%FO+30%Poda	5 largo, 3 ancho y 1.5 altura	22.5	14	Aireación pasiva (tubería de PVC), sin molienda
Tratamiento E	70%FO+30%Poda	5 largo, 3 ancho y 1.5 altura	22.5	14	Sin molienda aireación mecánica
Tratamiento E	70%FO+30%Poda	5 largo, 3 ancho y 1.5 altura	22.5	14	Sin molienda aireación mecánica



Figura 18 Construcción de las pilas en la PCBP

### 3.2.2 Preparación del Inóculo

El número y tipo de microorganismos generalmente no son una limitante ambiental en el composteo de la FORSU, debido a que este tipo de sustratos pueden ser biodegradados adecuadamente por una diversidad de organismos, sin embargo una baja población microbiana para degradar ciertos grupos de compuestos recalcitrantes celulosa y lignina puede ser un factor limitante en el tiempo de composteo, en estas circunstancias



Figura 19 Tratamiento D aireación pasiva    Figura 20 Tratamiento E pilas (control)

puede ser necesaria la adición de un inóculo con determinadas características microbianas. En virtud, de que la mezcla que se compostea en PCBP contiene cierta proporción de material recalcitrante se decidió adicionar un inóculo nativo del área en el que se han venido procesando estos desechos. El inóculo empleado fue obtenido de la fracción líquida de la FORSU de los cárcamos que se tienen en la PCBP, ésta fracción líquida es resultado de la percolación natural del agua que contienen la FORSU durante las primeras etapas del proceso de composteo, éstos escurrimientos son recolectados a través de un drenaje perimetral que se encuentra instalado en la PCBP y son llevados a dos cárcamos que se encuentran, uno enfrente de la bahía noreste y el otro detrás del almacén general, una vez recolectados como se muestra en la Figura 21 se realizó la caracterización física, química y microbiológica antes de añadir a las pilas construidas Tabla 6. La concentración de inóculo fue de 0.2L/Kg de materia prima.



Figura 21. Cárcamo dónde se colecta la fracción líquida (inóculo) y toma de muestra del mismo.

Tabla 6 Características fisicoquímicas y microbiológicas de la fracción líquida obtenida de los cárcamos ubicados en la PCBP.

Parámetro	Unidades	Valores
pH	Unidades	6.11±0.01
ORP	mV	-192.50±0.71
CE	mS/cm	49.50±0.00
Humedad	%	90.11±0.45
ST	%	9.89±0.43
SF	%	19.85±0.43
Materia Orgánica	%	2.35±0.32
Carbono Orgánico	%	1.31±0.18
N Total	%	3.80±0.02
N-NH <sub>4</sub>	mg/Kg	12.76±0.01
N-NO <sub>3</sub>	mg/Kg	0.33±0.04
Cuenta Microbiana	UFC/100mL	10 <sup>7</sup>
Coliformes Totales	NMP/100mL	No detectado.
Coliformes Fecales	NMP/100mL	No detectado

### 3.3 Métodos analíticos y de muestreo

En los párrafos siguientes, se describen las técnicas de análisis empleadas y en la Tabla 7 se enlistan los métodos de análisis que se utilizaron para conocer los parámetros físicos, químicos y biológicos que rigen el proceso de composteo y las del producto final; contiene además, los aspectos principales que tipifican los métodos. Los parámetros que se determinaron son: humedad, sólidos totales, materia orgánica y carbono orgánico, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica (CE), nitrógeno total, nitrógeno amoniacal y nitrógeno nítrico, niveles de macro y micronutrientes como: P, K, Ca, Mg, Fe, niveles de macro y micronutrientes y elementos tóxicos tales como: As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Si, Sr, Ti, V, Zn.

Para establecer la calidad sanitaria del producto final, se cuantificaron coliformes totales y fecales de la composta por la técnica del número más probable (NMP); finalmente, se determinaron indicadores de estabilidad y madurez mediante pruebas, de Solvita® y medición de pH en condiciones anaerobias.

## **Humedad y Sólidos totales**

Se procesaron submuestras frescas homogéneas de materia prima, materiales de compostaje y composta por el método gravimétrico, utilizando una Termobalanza Ohaus Explorer MB45 con temperatura definida de 100°C y por pérdida de peso se determinó el contenido de agua y la proporción de sólidos remanentes.

## **Materia orgánica y % de carbono orgánico**

Por pérdida de peso se determinó gravimétricamente el contenido de material volatilizado que correspondió a la materia orgánica seca; los materiales secos se sometieron a combustión seca a 550 °C durante 2hrs El porcentaje de carbono orgánico se determinó con base en el contenido de materia orgánica, este método considera que las compostas tienen en promedio un 56% de carbono.

## **Conductividad eléctrica y el valor de pH**

Se preparó una mezcla saturada de composta fresca con agua destilada (1:5) se agitó hasta obtener una suspensión acuosa y con ésta se determinó el valor del pH mediante el uso de un potenciómetro, esta suspensión se centrifugó a 8,000 g y se midió la conductividad eléctrica. El volumen para la suspensión se obtiene con los sólidos totales de la muestra se utilizó un potenciómetro marca Hanna HI991003.

## **Nitrógeno total por método Kjeldahl**

Las submuestras frescas fueron sometidas a digestión ácida con una mezcla de catalizadores en un sistema de digestión y destilación Büchi modelos K-424 y K-350, se destilaron y valoraron por el método volumétrico.

## **Nitrógeno amoniacal y nítrico**

Las submuestras frescas fueron extraídas con una solución de 2M KCl, destiladas y valoradas por método volumétrico; el destilado se empleó para la determinación de nitrógeno amoniacal y el remanente de la destilación fue utilizado para valoración de nitrógeno nítrico por titulación.

## **Metales y no metales (macro y microelementos)**

Se procesaron las submuestras secas por digestión ácida asistida por microondas y empleando una mezcla de ácidos nítrico-clorhídrico (grado ultrapuro) JT Baker. Después los elementos fueron analizados por plasma acoplado inductivamente a espectrofotometría de emisión óptica (ICP-OES).

## **Coliformes totales y fecales**

Para cuantificar las bacterias coliformes, tras diluir la muestra en solución peptonada se aplicó la técnica de los tubos múltiples en caldo lactosado (prueba presuntiva para coliformes totales) y caldo bilis verde brillante (coliformes fecales), ambos con campanas Durham. Con las diluciones se sembraron cajas Petri conteniendo agar MacConkey para detectar la presencia/ausencia de Salmonella y Shigella.

## **Estabilidad y Madurez de la Composta**

### **Estabilidad y Madurez (Prueba Solvita®)**

Con esta prueba se determina la madurez y estabilidad de la composta, es un método semicuantitativo colorimétrico para determinar  $\text{CO}_2$  y  $\text{NH}_3$  en un recipiente cerrado. Para ello, la muestra se coloca en el recipiente al que se introducen dos paletas con gel que contienen indicadores que reaccionan con emisiones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{NH}_3$  de la composta; después de cuatro horas se sacan las paletas y se comparan con una banda de colores para cada uno de los compuestos; con base en ésta se determina qué tan estable y madura fue la composta.

### **Incubación anaeróbica**

Finalmente, otro método para medir madurez fue llevar la composta a condiciones anaeróbicas e incubarse a  $55^\circ\text{C}$ , durante 48 hr. Tras la incubación se realizó una suspensión de la composta incubada en agua destilada (1:5), se determinó el pH. Valores de pH igual a 6.5 o mayores indican que la composta está madura.

### **Conteo de UFC en el inóculo**

Para el aislamiento y cuantificación de los cultivos bacterianos, a partir, de las muestras de la fracción líquida se realizaron 4 diluciones (1:10, 1:100, 1:1000 y 1:10000) en solución salina al 0.8%, utilizando 0.1 ml de las diluciones, para ser estriadas en Agar Nutritivo, y los medios selectivos TCBS y Mc Conkey (por duplicado; todos los agares fueron de la marca BD-BIOXON). Posteriormente se incubaron durante 24 a 48 horas a  $28^\circ\text{C}$ .

Tabla 7 Métodos para la evaluación de parámetros durante el proceso de composteo.

Parámetro	Unidades	Método de prueba	Referencia
<b>pH</b>	Unidades	Medición potenciométrica en suspensión acuosa 1:5	NADF-020-AMBT-2011 Sadzawka, 2005
<b>Conductividad</b>	dS/m (mmhos/cm)	Medición conductimétrica en extracto acuoso 1:5	NADF-020-AMBT-2011 Sadzawka, 2005
<b>Sólidos totales</b>	% en peso base seca	Gravimetría y secado a 70 ± 5°C	NADF-020-AMBT-2011 Sadzawka, 2005
<b>Humedad</b>	%		
<b>Densidad aparente</b>	kg /m <sup>3</sup>	Masa/volumen	NADF-020-AMBT-2011 Sadzawka, 2005
<b>Materia orgánica</b>	% base seca	Perdida por calcinación a 550 °C	NADF-020-AMBT-2011 Sadzawka, 2005
<b>Carbono orgánico</b>	% base seca	Estimado a partir de materia orgánica	NADF-020-AMBT-2011 Sadzawka, 2005
<b>Nitrógeno total</b>	Nitrógeno total	Kjeldahl	NADF-020-AMBT-2011; Sadzawka, 2005
<b>Nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>-N)</b>	mg/kg base seca	Extracción con KCl, destilación y volumetría	NADF-020-AMBT-2011; Huldrych, 2008
<b>Nitrógeno nítrico (NO<sub>3</sub>-N)</b>	mg/kg base seca	Extracción con KCl, destilación con Devarda y volumetría	NADF-020-AMBT-2011; Huldrych, 2008
<b>Análisis elemental CHON</b>	mg/kg base seca	Combustión con detección de CO <sub>2</sub>	Sadzawka, 2005
<b>Mg</b>	mg/kg base seca	Digestión ácida asistida por microondas y Plasma	NADF-020-AMBT-2011 Sadzawka, 2005
<b>Ca</b>		acoplado inductivamente -	
<b>K</b>		Espectrometría de emisión	
<b>Na</b>		óptica(ICP - OES)	
<b>Fe</b>			
<b>Mg</b>			
<b>Na</b>			
<b>As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sb, Se, Sr, Ti, V y Zn</b>			
<b>Estabilidad</b>	Estabilidad	1. Prueba de Solvita® (liberación de CO <sub>2</sub> ) 2. Liberación de CO <sub>2</sub> bajo condiciones anaeróbicas	NADF-020-AMBT-2011; Solvita® Test Quick Guide, 2012
<b>Madurez</b>	1. Madurez (escala 1 a 8) 2. pH ≥ 6.5	1. Prueba de Solvita® (liberación de NH <sub>3</sub> ) 2. Liberación de CO <sub>2</sub> bajo condiciones anaeróbicas.	NADF-020-AMBT-2011; Solvita® Test Quick Guide, 2012; Changa et al., 2003
<b>Coliformes fecales</b>	NMP/g	NOM-112-SSA1-1994	NADF-020-AMBT-2011
<b>Presencia de Salmonella y Shigella</b>	UFC/g	NOM-113-SSA1-1994	NADF-020-AMBT-2011

### 3.3.1 Medición de parámetros de campo

En todas las pilas construidas se midieron los siguientes parámetros de campo: temperatura, humedad,  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ . Las mediciones de temperatura se realizaron a lo largo y ancho de cada pila con un termómetro marca FLUKE y una sonda con un termopar tipo K en diez diferentes puntos obteniendo su respectiva media y desviación estándar. La humedad se registró con un medidor de humedad SOIL TESTER, cuya varilla alcanzaba una profundidad de 60cm, se realizaron mediciones en 10 diferentes puntos de cada pila y a dos profundidades 30 y 60cm se obtuvo su media y desviación estándar de cada profundidad y posteriormente se obtuvo la media de medias de ambas profundidades. El  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  se midieron con un kit para gases de combustión FYRITE BACHARACH en diez diferentes puntos de la pila se obtuvo su media y desviación estándar, las mediciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  se realizan de manera independiente en un contenedor con soluciones que fijan el  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ , se bombea un volumen de 50cc. En la Figura 22 se muestran las diferentes mediciones en campo.



Figura 22 Medición de los parámetros de campo. a) Temperatura, b) Temperatura y Humedad y c) Oxígeno y Dióxido de Carbono.

### 3.3.2 Muestreo

El muestreo se realizó cada 15 días en las pilas construidas en la PCBP durante ochenta días y cada 7 días en las pilas construidas en el CIEMAD-IPN durante 60 días, se colectaron submuestras estratificadas en la PCBP a 30 y 60 cm y en el CIEMAD-IPN a 10 y 25 cm de distintos puntos de las pilas, en éstos se hicieron registros de la temperatura, humedad, oxígeno y dióxido de carbono.

La toma de muestras se llevó a cabo mediante un plan de muestreo de acuerdo a lo establecido por el Field Sampling of Compost Materials el cual fue determinado por el Test Methods for the Examination of Composting and Compost. Todas las submuestras colectadas fueron mezcladas en recipientes limpios de plástico para obtener finalmente muestras compuestas, las cuales fueron empacadas (aproximadamente 1 kg) en bolsas de polietileno con cierre hermético (zip-lock), etiquetadas para su identificación y preservadas a 4°C para su traslado al laboratorio del CIEMAD-IPN, lugar donde se almacenaron en refrigeración a 4°C para su análisis físico-químico, en un período no mayor a siete días.

Para la determinación de la calidad bacteriológica de la composta, la muestra se colectó en un recipiente de plástico estéril y se transportó a 4°C para su procesamiento dentro de las siguientes 24 hr de su colecta. Para colectar las muestras en las pilas situadas en la PCBP se realizaron cortes en forma de V con la ayuda de un minicargador frontal (Figura 23), mientras que en las pilas construidas en el CIEMAD la toma de muestra se realizó con cortes utilizando una pala recta.



a)

b)

Figura 23. Toma de muestra en las pilas: a) PCBP y b) CIEMAD.

En cada corte de la pila, se colectaron de forma estratificada, 800 g de submuestra en cinco puntos de la zona superior, de la intermedia y de la inferior, (Figura 24) que, tras mezclarlas, fueron integradas a una muestra compuesta de un kilogramo, con lo que al final se obtuvieron un total de 3 muestras compuestas, las cuales fueron llevadas al laboratorio para sus respectivos análisis.

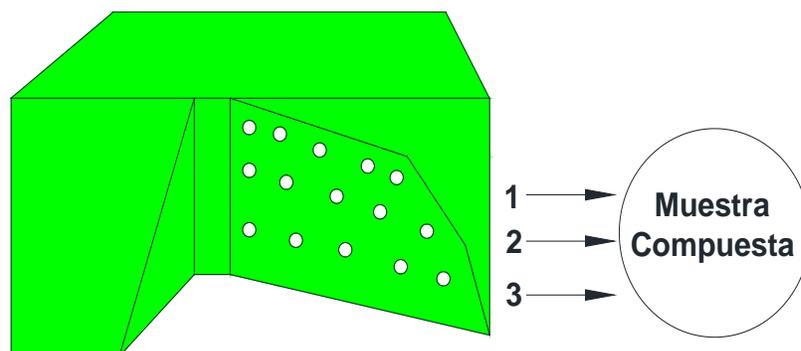


Figura 24. Corte transversal en "V" para la toma de muestras en la pila.

### 3.4 Análisis Estadístico

Todas las determinaciones se realizaron por duplicado y los resultados se expresaron como promedios, desviación estándar y coeficiente de variación. La diferencia entre los parámetros físicos y químicos de las muestras, en las distintas etapas del proceso, se determinó por medio del análisis de variancia de una vía, utilizando el software estadístico SIGMAPLOT 12, se consideraron diferencias significativas con  $p \leq 0.05$ .

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para una mejor comprensión de los resultados obtenidos en los diferentes tratamientos aplicados a las pilas construidas en la PCBP y en las instalaciones del CIEMAD se decidió nombrar cada tratamiento como se muestra en la tabla 8.

### 4.1 Perfiles Temperatura, Humedad, O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>

La temperatura en todos los tratamientos alcanzó los 55°C (Figuras 25 y 26), que son necesarias para eliminar los organismos patógenos durante el composteo (Tognetti et al, 2007). Sin embargo, también se observa en la Figura 25 que sólo en el tratamiento A fue posible observar las cuatro etapas del proceso de composteo, la fase mesofílica,

termofílica, enfriamiento y maduración, este fenómeno corresponde al presentado por Ming et al. (2008), Xi et al. (2012), Ghaffari et al. (2011) y Schloss y Walker (2000), donde describen un intervalo de tiempo muy corto entre las etapas mesofílica y termofílica, este efecto según todos los autores es alcanzado por la adición de un inóculo con concentraciones entre  $10^6$  y  $10^7$  UFC justo en el comienzo del proceso de composteo, que precisamente fueron las condiciones a las que estuvo el tratamiento A, i.e., la adición del inóculo ( $10^7$  UFC) y un tamaño de partícula entre 2.5 y 3.5 cm.

Tabla 8 Nombres de los diferentes tratamientos aplicados durante el proceso de composteo.

<b>Lugar</b>	<b>Nombre</b>	<b>Variables</b>
<b>CIEMAD-IPN</b>	<b>Tratamiento A</b>	Aireación mecánica, molienda, inóculo microbiano
<b>CIEMAD-IPN</b>	<b>Tratamiento B</b>	Aireación mecánica, molienda
<b>CIEMAD-IPN</b>	<b>Tratamiento C</b>	Aireación mecánica, sin molienda, inóculo microbiano.
<b>PCBP</b>	<b>Tratamiento D</b>	Aireación pasiva (tubería de PVC), sin molienda
<b>PCBP</b>	<b>Tratamiento E</b>	Sin molienda aireación mecánica (Control)

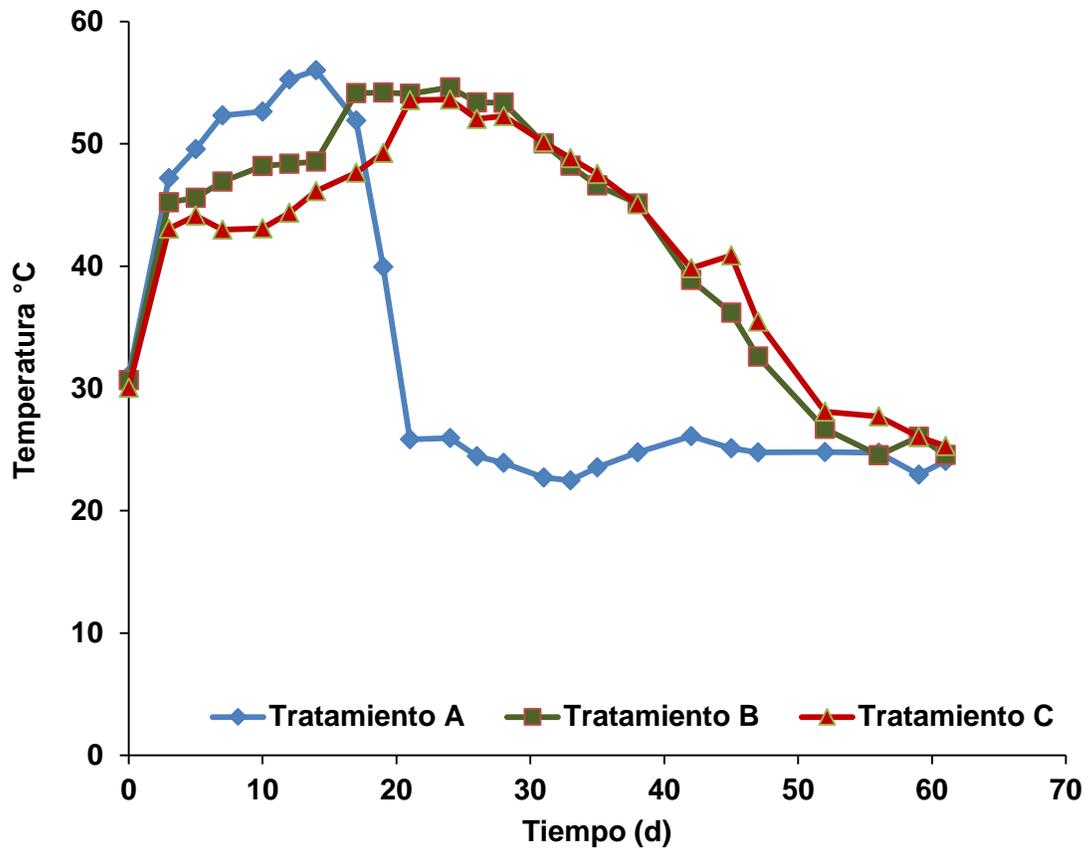


Figura 25 Temperatura durante el proceso de composteo en los tratamientos A, B y C.

También se observó, que en las pilas donde no se aplicó la molienda: tratamientos C, D y E, los perfiles de temperatura son más heterogéneos Figura 26 que en A y B donde se sometió al proceso de molienda a la materia prima, mismo fenómeno que describen Eklind y Kirchmann (2000), que observaron que si a la materia prima no se le daba un proceso de molienda el intervalo de tiempo entre las fases mesofílica y termofílica era mayor, comparada con aquella cuyo tamaño de partícula se encontraba entre 20 y 40mm además de que los perfiles de temperatura eran heterogéneos y no era posible distinguir las cuatro etapas del proceso y en consecuencia el tiempo de composteo fue mayor.

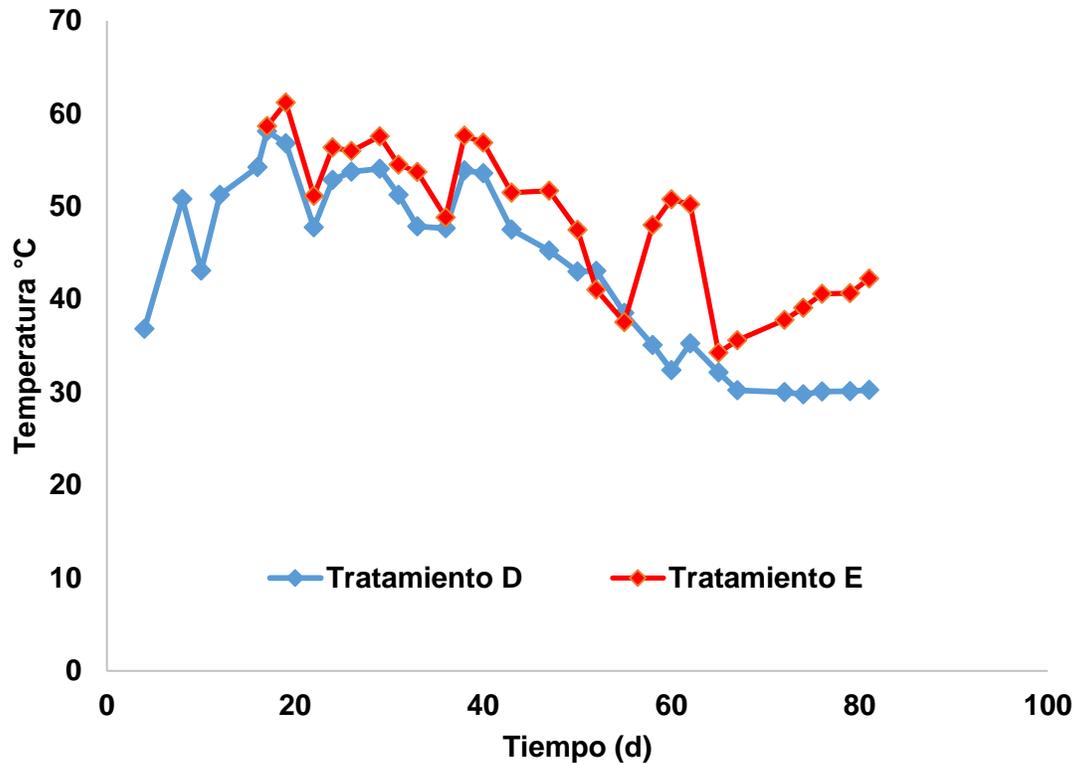


Figura 26 Temperatura durante el proceso de composteo en los tratamientos D y E.

De la misma manera se observa, que el tratamiento A cumple con la condición de mantener la temperatura de 55°C durante dos semanas como lo establece la NADF-020-AMBT-2011, mientras que los demás tratamientos rebasaron los tres intervalos marcados en la misma propiciando que el tiempo de composteo sea mayor en los cuatro.

En las Figuras 27 y 28 se muestra el comportamiento de la humedad en los cinco tratamientos durante el proceso de composteo donde se observa que en los tratamientos A, B y C la diferencia en los contenidos de humedad iniciales y durante el proceso se debe a la adición del inóculo pero a partir del día 40 ya existe un comportamiento similar en los tres casos, también en el tratamiento A se tiene una mayor disminución de la humedad y más homogénea que en los tratamientos B y C esto está asociado con el comportamiento de la temperatura en los tres casos ya que al alcanzar de manera más rápida la etapa termofílica la humedad también disminuye en la misma proporción como lo reportan Schloss y Walker (2000) al adicionar el inóculo en el composteo de la FORSU.

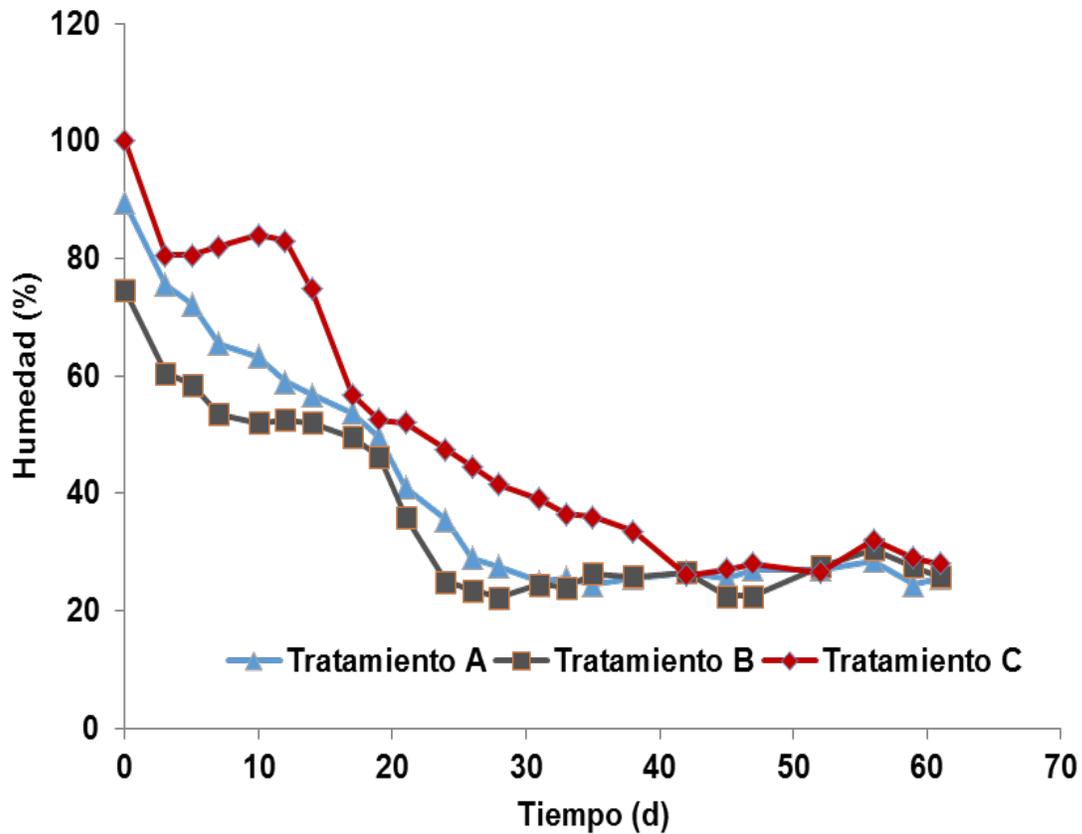


Figura 27 Humedad durante el proceso de composteo en los tratamientos A, B y C.

La Figura 28 muestra que en los tratamientos D y E el comportamiento es diferente ya que al no estar molida la materia prima el contenido de humedad es más heterogéneo, es decir, varía a lo largo de la pila, que en los demás tratamientos y no disminuye hasta el día 60 lo que hace suponer que la actividad microbiana decrece al estar más tiempo saturada la pila y en consecuencia el tiempo de composteo sea mayor en comparación con los otros tres tratamientos por lo que puede existir presencia de malos olores por la pérdida de nitrógeno en forma de amonio (Zhang et al., 2009).

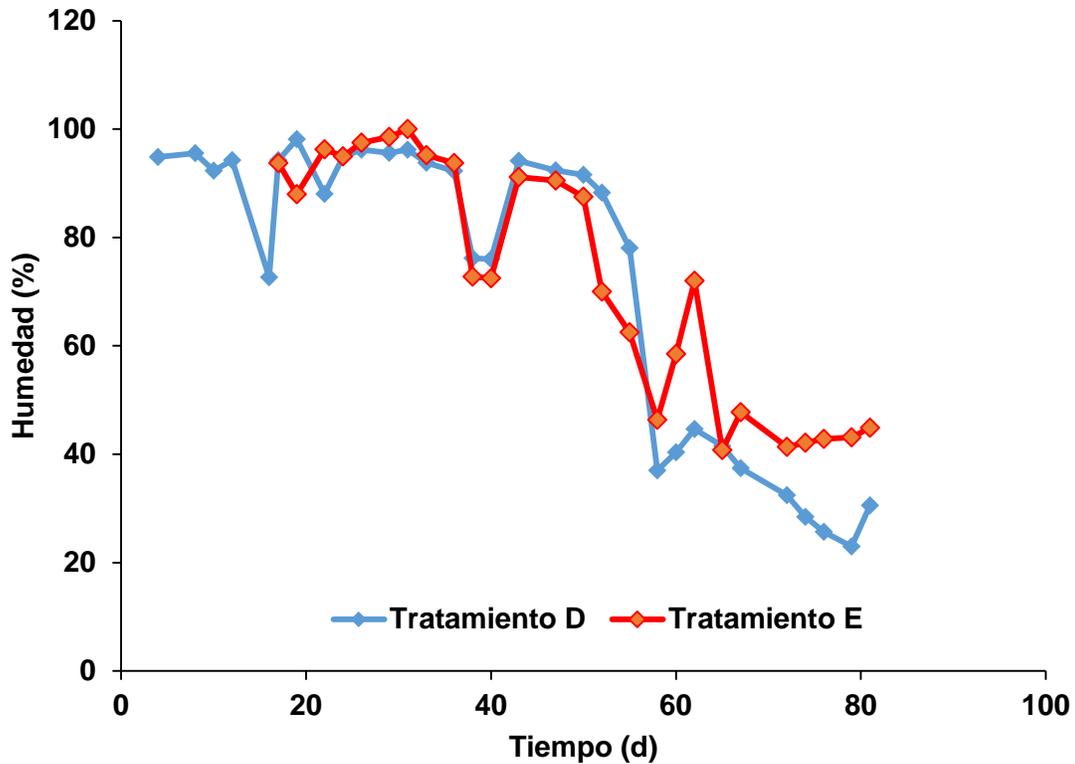


Figura 28 Humedad el proceso de composteo en los tratamientos D y E.

En lo referente a las concentraciones de  $O_2$  y  $CO_2$  en los tratamientos A, B y C tuvieron comportamientos similares, es decir las concentraciones estuvieron por encima del 15% y el efecto de la molienda no se alcanzó a apreciar debido al tamaño de las pilas ya que en las tres se realizó el volteo mecánico al mismo tiempo sin embargo, en el tratamiento A se observa una disminución en la concentración de  $O_2$  y un ligero aumento de  $CO_2$ , comportamiento que se encuentra asociado a la maduración del proceso de composteo como lo mencionan Ruggieri et al. (2008) y Ponsa et al. (2009) quienes documentan que durante el proceso de maduración existe una disminución de oxígeno y un aumento de dióxido de carbono debido a que la actividad microbiana es menor porque ya se está estabilizando el producto final, fenómeno que solo se observa en el tratamiento A (Figuras 29 y 30).

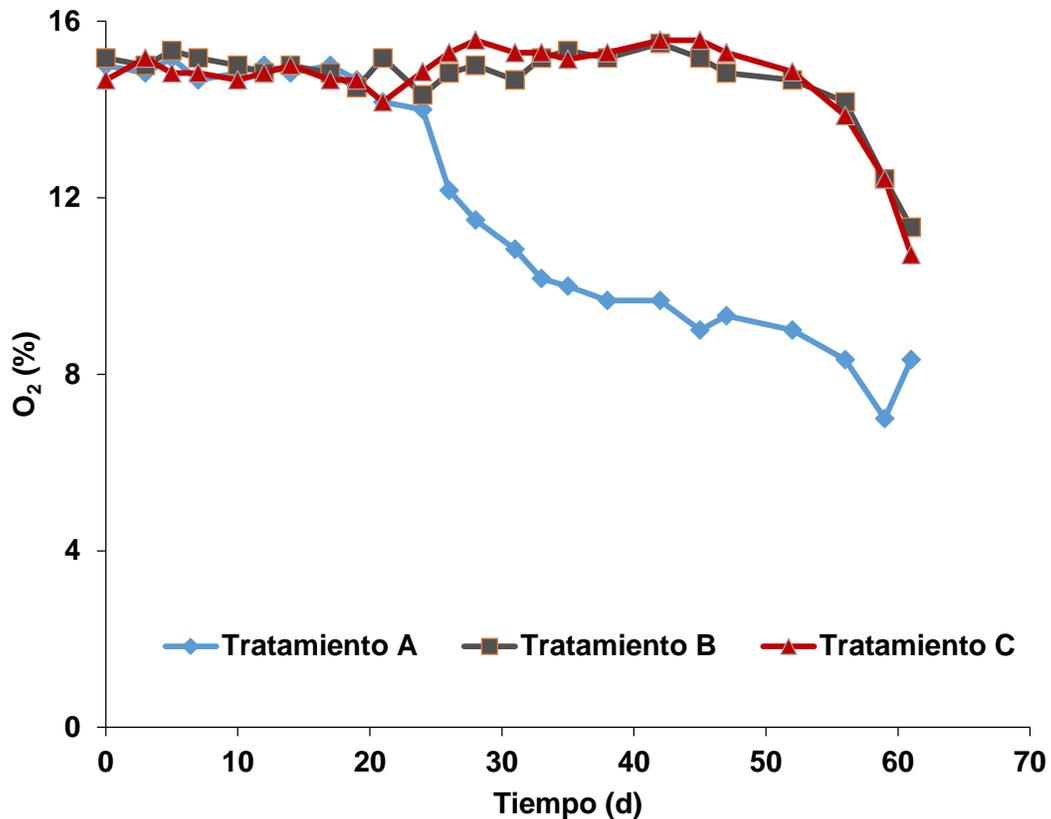


Figura 29 Concentración de O<sub>2</sub> el proceso de composteo en los tratamientos A, B y C.

En los tratamientos B y C las concentraciones de O<sub>2</sub> comienzan a disminuir hasta el día 60 mientras que las concentraciones de CO<sub>2</sub> siempre se mantuvieron por debajo de 0.5% hasta el día 50 lo que indica que el producto aún no se encuentra estable.

Los tratamientos D y E muestran una gran diferencia entre sí (Figuras 31 y 32), en las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, esto se debe a que en el tratamiento D se colocó tubería de PVC con orificios lo que permitió tener una concentración de oxígeno mayor que en el tratamiento E, como lo mostraron Solano et al. (2001) al evaluar el proceso de composteo con aireación pasiva y volteo mecánico. Sin embargo, no se logró observar una disminución en la concentración de O<sub>2</sub> como en el caso del tratamiento A y en el caso de las concentraciones de CO<sub>2</sub> fueron sumamente variables a lo largo del proceso y tampoco se logró observar un aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> que coincidiera con la disminución de oxígeno lo que se puede atribuir a que en ninguno de los dos casos la materia prima fue sometida al proceso de molienda provocando que el O<sub>2</sub> no se distribuyera de manera homogénea en la pila y por lo tanto la producción de CO<sub>2</sub> en la pila disminuyó.

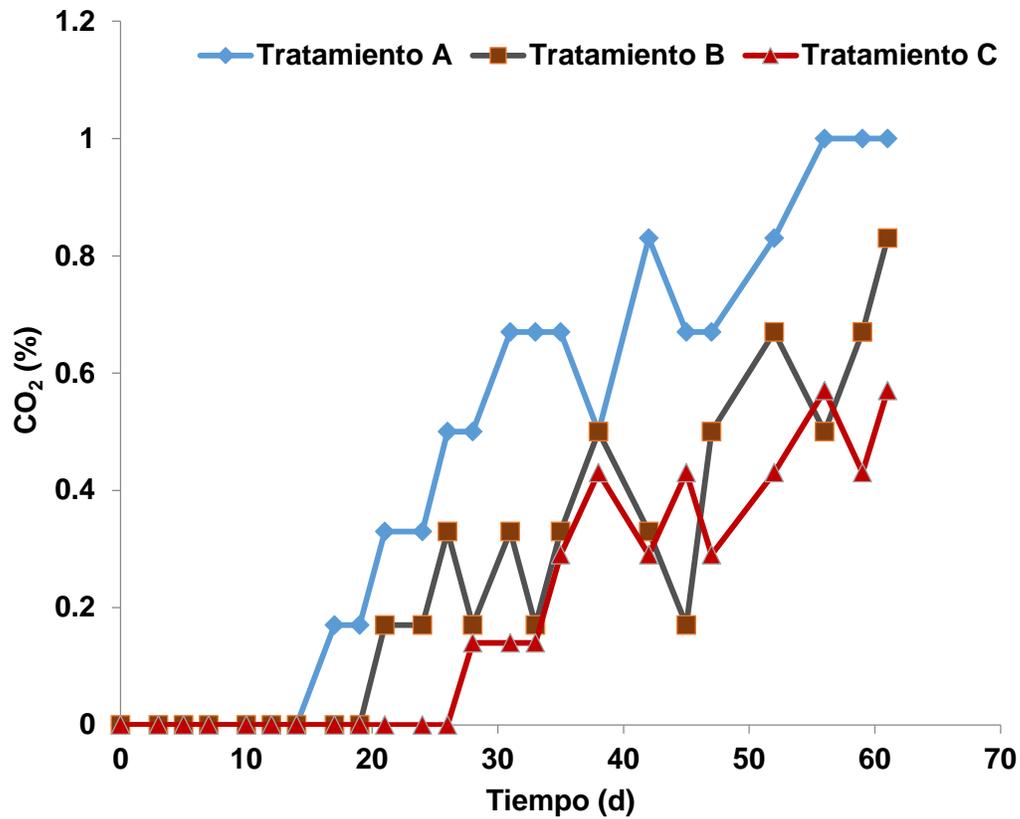


Figura 30 Concentración de CO<sub>2</sub> el proceso de composteo en los tratamientos A, B y C.

Estos resultados obtenidos son comparables con los obtenidos por Zhu et al., (2004) en el composteo de estiércol de cerdo, donde observaron que las únicas diferencias significativas entre la aeración pasiva y la aireación estática fueron; los perfiles de temperatura y el contenido de oxígeno durante el proceso de composteo, por lo que concluyen que la aplicación de cualquiera de éstas técnicas de aireación es dependiente de la escala del proceso ya que la dónde encontraron una diferencia fue en los costos de operación. Con lo que confirma la aplicación del tratamiento D con aireación pasiva no es aplicable en procesos de composteo a escalas industriales ya que los costos de operación son mayores y la calidad del producto final no es diferente que el obtenido por aireación estática.

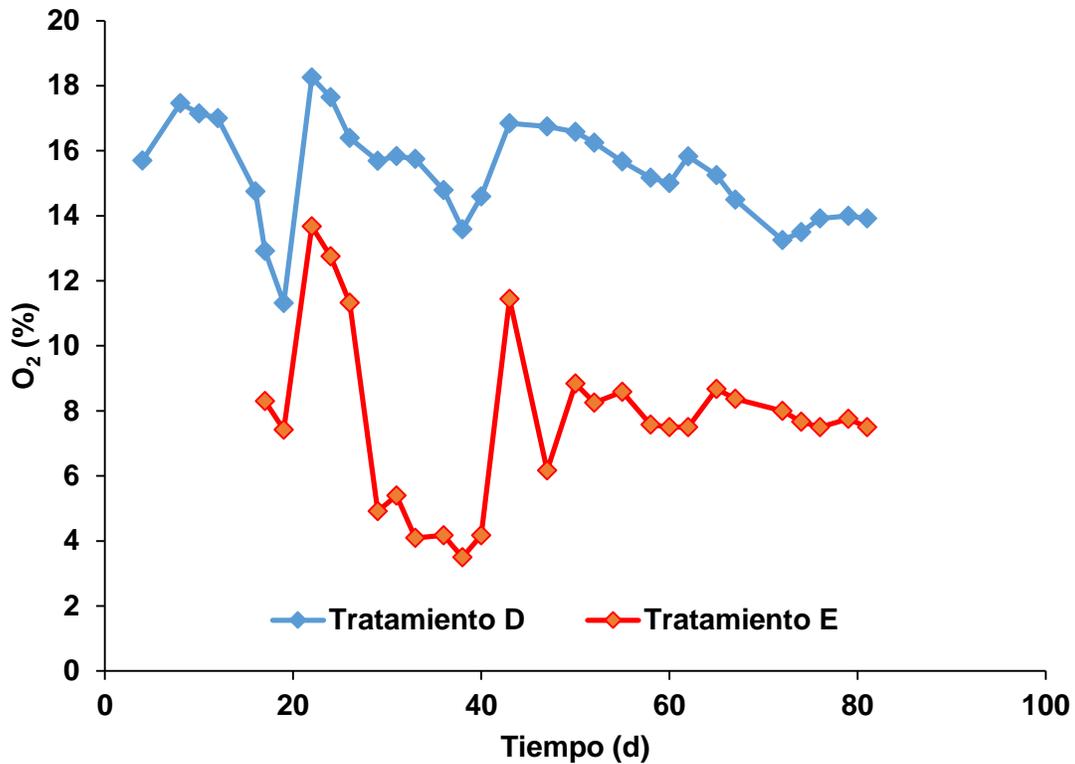


Figura 31 Concentración de O<sub>2</sub> el proceso de composteo en los tratamientos D y E.

Cabe mencionar, que se tuvieron algunos problemas con la medición del CO<sub>2</sub> ya que el método que se empleó es cualitativo i.e., fija el CO<sub>2</sub> en una solución y las lecturas en concentraciones menores al 1% no son confiables sin embargo, nos da una idea de la evolución del CO<sub>2</sub> a lo largo del proceso.

Si bien la temperatura es uno de los factores determinantes del proceso, no encontramos en la literatura la manera de medir temperatura en la pila ya que ésta no es homogénea a lo largo de la pila y la dificultad aumenta a medida de que la escala del proceso se incrementa, como ya se describió, la temperatura y los parámetros que se determinaron en campo (humedad, concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>) fueron medidos en diez diferentes puntos de la pila y se obtuvo una media y desviación estándar siendo la media cada parámetro la que se tomó para presentar en las figuras, y en los casos de las pilas que se construyeron en la PCBP la temperatura que se reportó fue la media de medias de las dos pilas, estas tablas se muestran en el Anexo 1.

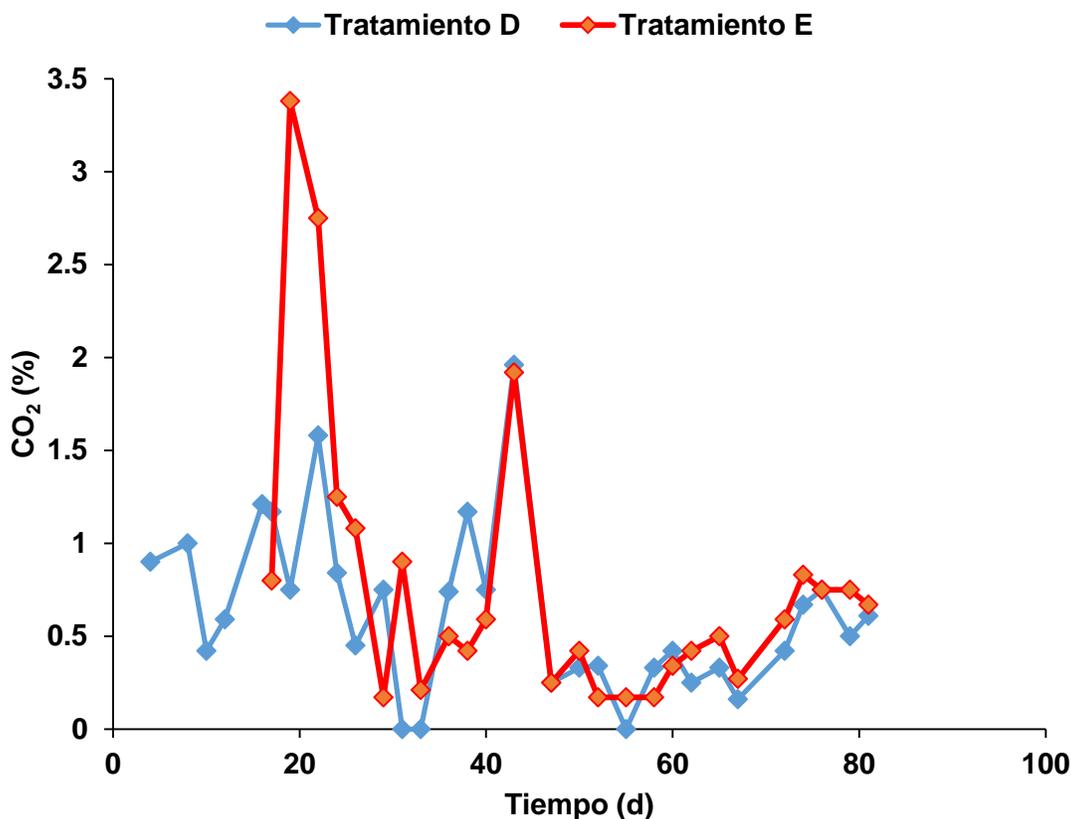


Figura 32 Concentración de CO<sub>2</sub> el proceso de composteo en los tratamientos D y E.

## 4.2 Evolución de las características fisicoquímicas, microbiológicas y de estabilidad

### 4.2.1 Características fisicoquímicas

En la tabla 9 se muestra el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos del tratamiento A durante el proceso de composteo. En general, el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos es muy similar a lo reportado por Schlos et al., (2000), quienes observaron que al añadir el inóculo microbiano la evolución de éstos parámetros es más rápida en comparación a procesos de composteo sin la adición del inóculo. Los valores de pH comienzan ácidos pero rápidamente cambian a valores de 8 para terminar con un valor de 7.47, con lo que se asegura que no existe liberación de amonio (Ekinci et al., 2000). La conductividad eléctrica se mantuvo en el intervalo de 2.6-4.8 mS/cm lo que indica que los niveles de salinidad en el producto final no se encuentran dentro de un intervalo aceptable para el crecimiento de plantas (Gautam *et al.*, 2010). La evolución de la materia orgánica y el carbono orgánico es lo que se espera durante el proceso de

composteo es decir una paulatina disminución de ambas que puede atribuirse a la formación de ácidos húmicos en el producto final (Vargas-García et al., 2006). La evolución del nitrógeno durante este tratamiento muestra que se aparentemente se minimizaron las pérdidas de nitrógeno y que éste se fijó en el producto final con lo que el nitrógeno asimilable es mayor en este tratamiento esto se infiere cuando las concentraciones de  $\text{NO}_3$  son mayores a las de  $\text{NH}_4$  tal como ocurrió en este proceso (Suzuki et al., 2004). Otro punto importante que es importante mencionar, es que la calidad del producto final se mejoró con respecto al estudio realizado por SOS-CIEMAD, (2012) dónde se observa que el pH logró alcanzar valores cercanos a neutros mientras que el estudio anterior presentaba valores ácidos, también se logró disminuir la conductividad eléctrica de manera considerable ya que en dicho estudio se obtuvieron valores de 12mS/cm y en este tratamiento alcanzó un valor de 4.86mS/cm. Por último, en la evolución del nitrógeno en este tratamiento la relación  $\text{NO}_3/\text{NH}_4$  fue mayor mientras que en el estudio anterior fue menor y en consecuencia el nitrógeno asimilable también es menor.

En el tratamiento B se observa en la tabla 10 que aunque el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos es similar con respecto al tratamiento A, las principales diferencias que existen son; el pH aún se encuentra en valores alcalinos lo cual es un indicador que aún no se encuentra maduro el producto (Trautmann y Kransy, 1997), si bien, la evolución del nitrógeno en este tratamiento se comporta de la misma manera, es decir la relación  $\text{NO}_3/\text{NH}_4$  es mayor a los 36 días la concentración de  $\text{NO}_3$  es menor que en A y por lo tanto la cantidad de nitrógeno asimilable es menor y se puede inferir que el producto aún se encuentra en la fase de curado, es decir aún no se encuentra listo para su aplicación.

En la tabla 11 los parámetros fisicoquímicos del tratamiento C muestran que éste producto a los 36 días aún no es estable ni maduro debido a que el valor de pH es de 9.2, indicando de que se puede estar generando amonio (Hultman, 2009), y muestra que aún existe actividad microbiana, que puede estar aun rompiendo proteínas a través de la desaminación y por lo tanto generar amonio. La materia orgánica y el carbono orgánico aún no se degradan como en A y B, esto se ve reflejado en la relación C/N que aún es muy alta y en lo referente a la relación  $\text{NO}_3/\text{NH}_4$  es de 1, razones por las que se determina que éste producto final a los 36 días aún no alcanza la etapa de curado y aún se encuentra en la fase mesofílica antes de alcanzar la etapa de curado (Brinton, 1998).

Por último, en las tablas 12 y 13 se muestran los resultados de los parámetros fisicoquímicos en los tratamientos D y E, estos dos tratamientos no se evaluaron a los 36 días debido a que no hubo la adición del inóculo microbiano ni un tamaño de partícula determinado y la única variable que se probó fue el tipo de aireación. El comportamiento de todos los parámetros es muy similar entre sí los valores de pH son cercanos a un valor neutro 7.4 y 7.6, la conductividad eléctrica está entre 3 y 5 mS/cm la evolución de la materia orgánica y el carbono orgánico disminuye es decir se va degradando como lo indican, Li y Zhang, (2000); Solano *et al.* (2001).

Sin embargo, en estos dos tratamientos la relación  $\text{NO}_3/\text{NH}_4$  es inversa es decir, que la concentración de  $\text{NH}_4$  aumenta y la de  $\text{NO}_3$  disminuye haciendo que el nitrógeno disponible en el producto final sea menor este fenómeno puede atribuirse al tamaño de partícula ya que en ninguno de los dos tratamientos existió el proceso de molienda y de acuerdo con Liang *et al.*, (2006) si no existe un proceso de molienda previo la disponibilidad del carbono y el nitrógeno disminuye ya que utilizando la materia prima sin moler el área de contacto con las poblaciones microbianas disminuye y también disminuye la disponibilidad del nitrógeno en el producto final. Otro factor que influye en que la relación  $\text{NO}_3/\text{NH}_4$  se comporte de manera inversa es que si el proceso de composteo comienza con una relación C/N menor a 30 implica la existencia de pérdidas de nitrógeno y por lo tanto la evolución del amoníaco y del nitrato durante el proceso de composteo se comportará de esta manera (Zhu, 2006).

Tabla 9 Parámetros Fisicoquímicos durante el proceso de composteo en el tratamiento A.

Parámetro	Unidades	Tiempo (días)				
		0	9	18	27	36
<b>pH</b>	Unidades	4.72±0.01	8.09±0.18	8.28±0.18	8.51±0.06	7.47±0.02
<b>ORP</b>	mV	154.00±17.05	43.67±0.94	41.65±1.28	39.33±2.62	-23.67±0.94
<b>CE</b>	mS/cm	4.63±0.44	2.64±1.34	2.78±1.75	2.70±1.28	4.86±0.25
<b>Humedad</b>	%	44.42±1.15	19.51±0.78	21.39±1.54	23.62±0.55	12.91±0.84
<b>ST</b>	%	55.58±1.15	80.49±0.78	78.61±0.95	76.74±0.55	87.09±0.83
<b>SF</b>	%	0.64±0.04	0.57±0.04	0.64±0.03	0.71±0.02	0.60±0.04
<b>Materia Orgánica</b>	%	36.71±3.94	43.65±3.77	36.40±2.85	29.14±1.69	29.83±3.74
<b>Carbono Orgánico</b>	%	20.40±2.19	16.19±0.94	20.22±1.24	16.19±0.94	21.13±2.08
<b>N Total</b>	%	0.91±0.14	0.92±0.15	0.94±0.17	1.04±0.15	1.06±0.05
<b>N-NH<sub>4</sub></b>	mg/Kg	0.39±0.04	0.12±0.04	0.11±0.04	0.23±0.28	0.39±0.04
<b>N-NO<sub>3</sub></b>	mg/Kg	0.08±0.02	1.03±0.08	1.02±0.04	1.00±0.15	1.03±0.04
<b>Relación C/N</b>		22.42	17.59	21.51	15.56	19.93

Tabla 10 Parámetros Fisicoquímicos durante el proceso de composteo en el tratamiento B.

Parámetro	Unidades	Tiempo (días)				
		0	9	18	27	36
<b>pH</b>	Unidades	4.72±0.01	8.02±0.24	8.18±0.19	8.27±0.05	8.14±0.09
<b>ORP</b>	mV	179.00±0.00	128.67±7.85	89.57±3.78	37.67±1.7	4.98±1.43
<b>CE</b>	mS/cm	5.80±0.08	5.39±0.44	4.66±0.59	3.01±0.66	35.00±2.83
<b>Humedad</b>	%	44.29±0.67	27.70±0.36	23.97±0.74	21.41±0.45	12.77±0.32
<b>ST</b>	%	55.71±0.77	72.29±0.43	78.59±0.54	78.59±0.45	87.32±0.56
<b>SF</b>	%	0.60±0.02	0.62±0.03	0.67±0.04	0.73±0.03	0.66±0.03
<b>Materia Orgánica</b>	%	40.66±1.52	38.74±3.15	33.20±2.45	27.65±3.09	26.91±3.38
<b>Carbono Orgánico</b>	%	19.59±0.85	15.36±1.71	18.44±1.24	15.36±1.71	16.30±1.88
<b>N Total</b>	%	0.63±0.06	0.63±0.05	0.67±0.24	0.70±0.04	0.63±0.06
<b>N-NH<sub>4</sub></b>	mg/Kg	0.39±0.04	0.26±0.04	0.23±0.04	0.21±0.07	0.21±0.07
<b>N-NO<sub>3</sub></b>	mg/Kg	0.081±0.02	0.68±0.10	0.70±0.00	0.75±0.04	0.82±0.08
<b>Relación C/N</b>		31.09	24.38	27.52	21.94	23.73

Tabla 11 Parámetros Fisicoquímicos durante el proceso de composteo en el tratamiento C.

Parámetro	Unidades	Tiempo (días)				
		0	9	18	27	36
<b>pH</b>	Unidades	4.79±0.07	8.23±0.09	8.17±0.12	8.23±0.09	9.20±0.05
<b>ORP</b>	mV	143.00±5.00	136.33±5.79	94.58±0.30	31.33±1.89	27.00±8.33
<b>CE</b>	mS/cm	4.18±0.25	5.09±0.16	4.20±3.84	2.65±0.43	3.57±0.54
<b>Humedad</b>	%	41.04±0.18	25.96±0.81	32.93±0.19	42.87±0.71	30.60±0.77
<b>ST</b>	%	58.93±1.03	74.04±0.81	67.13±1.15	57.13±0.71	69.40±0.77
<b>SF</b>	%	0.42±0.03	0.54±0.03	0.54±0.03	0.53±0.04	0.52±0.04
<b>Materia Orgánica</b>	%	58.14±2.80	46.32±3.42	46.65±2.96	46.98±3.63	48.13±3.72
<b>Carbono Orgánico</b>	%	22.30±1.56	26.10±2.02	25.92±1.42	26.10±2.02	26.74±2.07
<b>N Total</b>	%	0.89±0.13	0.93±0.11	0.96±0.04	1.06±0.04	1.07±0.25
<b>N-NH<sub>4</sub></b>	mg/Kg	0.33±0.04	0.12±0.04	0.07±0.00	0.06±0.01	0.03±0.01
<b>N-NO<sub>3</sub></b>	mg/Kg	0.04±0.02	1.03±0.08	0.06±0.01	0.04±0.01	0.03±0.01
<b>Relación C/N</b>		25.5	28.06	27.00	24.62	24.99

Tabla 12 Parámetros Fisicoquímicos durante el proceso de composteo en el tratamiento D.

Parámetro	Unidades	Tiempo (días)							
		0	12	19	26	39	55	66	81
<b>pH</b>	<b>Unidades</b>	4.83±0.12	6.50±0.27	5.85±0.39	5.79±0.22	6.41±0.15	7.39±0.11	7.51±0.05	7.42±0.06
<b>ORP</b>	<b>mV</b>	130.50±4.60	134.50±4.24	175.75±10.26	156.84±12.32	122.12±8.83	61.95±5.41	82.11±7.61	53.00±6.89
<b>CE</b>	<b>mS/cm</b>	3.87±0.78	5.13±0.58	4.18±0.32	4.78±0.54	5.01±0.40	4.15±0.43	3.52±0.43	3.83±0.55
<b>Humedad</b>	<b>%</b>	46.39±0.99	44.27±1.12	42.96±0.97	42.43±1.31	35.51±3.41	23.67±0.66	19.36±0.71	5.33±0.46
<b>ST</b>	<b>%</b>	53.53±0.99	60.08±1.12	58.00±0.97	57.42±1.39	62.89±1.24	76.33±0.67	80.73±0.57	94.68±0.28
<b>SF</b>	<b>%</b>	0.60±0.03	0.59±0.03	0.61±0.03	0.58±0.03	0.60±0.03	0.56±0.04	0.41±0.04	0.56±0.03
<b>Materia Orgánica</b>	<b>%</b>	39.81±2.20	41.66±3.01	39.54±2.34	44.74±3.04	40.34±2.09	43.95±3.30	59.39±3.41	34.28±3.14
<b>Carbono Orgánico</b>	<b>%</b>	22.12±1.22	23.14±1.68	21.97±1.30	23.75±1.69	22.42±1.16	24.41±1.83	31.59±1.90	27.28±1.74
<b>N Total</b>	<b>%</b>	1.19±0.03	0.93±0.05	0.86±0.36	1.01±0.62	0.85±0.19	0.96±0.22	1.02±0.13	1.49±0.44
<b>N-NH<sub>4</sub></b>	<b>mg/Kg</b>	0.19±0.02	0.33±0.14	0.57±0.08	0.79±0.16	0.41±0.08	0.40±0.12	0.40±0.03	0.67±0.13
<b>N-NO<sub>3</sub></b>	<b>mg/Kg</b>	0.09±0.04	0.10±0.03	0.10±0.02	0.12±0.06	0.16±0.10	0.28±0.06	0.29±0.07	0.42±0.04
<b>Relación C/N</b>		18.67	24.86	25.69	23.57	26.47	25.55	31.82	18.40

Tabla 13 Parámetros Fisicoquímicos durante el proceso de composteo en el tratamiento E.

Parámetro	Unidades	Tiempo (días)					
		19	26	39	55	66	81
<b>pH</b>	Unidades	6.29±0.09	5.69±0.26	5.05±0.10	6.33±0.41	7.84±0.13	7.60±0.10
<b>ORP</b>	mV	122.5±5.30	187.84±15.81	189.34±13.72	124.13±13.07	81.57±11.67	32.37±7.54
<b>CE</b>	mS/cm	4.38±0.76	4.80±0.52	5.13±0.52	5.12±0.37	4.53±0.88	5.20±0.27
<b>Humedad</b>	%	44.21±0.82	40.36±0.98	42.54±1.11	57.12±0.47	52.54±0.99	18.19±0.40
<b>ST</b>	%	55.77±0.85	59.55±0.91	57.28±0.79	42.89±0.47	47.42±0.99	81.82±0.45
<b>SF</b>	%	0.60±0.03	0.64±0.03	13.32±0.62	0.56±0.16	0.62±0.04	0.47±0.05
<b>Materia Orgánica</b>	%	40.52±2.22	35.93±2.60	49.06±1.70	37.68±2.43	38.05±3.54	38.89±4.93
<b>Carbono Orgánico</b>	%	22.51±1.24	19.96±1.44	14.45±0.34	20.94±1.35	21.14±1.96	29.38±2.74
<b>N Total</b>	%	0.71±0.13	0.80±0.09	0.65±0.24	0.84±0.04	0.89±0.04	0.95±0.01
<b>N-NH<sub>4</sub></b>	mg/Kg	0.17±0.02	0.64±0.02	0.54±0.06	0.45±0.04	0.39±0.04	0.60±0.04
<b>N-NO<sub>3</sub></b>	mg/Kg	0.09±0.02	0.47±0.02	0.18±0.04	0.38±0.07	0.23±0.04	0.28±0.04
<b>Relación C/N</b>		40.95	10.38	11.40	10.89	11.02	15.17

#### 4.2.2 Parámetros microbiológicos y de estabilidad.

Un material no estabilizado o inestable es aquel que contiene una alta proporción de materia orgánica biodegradable por ende tiene una actividad microbiológica elevada. Al contrario, si el material contiene principalmente materia recalcitrante o similar al humus, no es capaz de sustentar actividad microbiana y por lo tanto el material se considera estable (Barrena et al. 2006). Es así, como índices biológicos son útiles para evaluar la estabilidad del material debido a su relación con la actividad metabólica en el composteo (Mari et al. 2003). En este trabajo se evaluó la estabilidad mediante el método @Solvita, para el caso de madurez también se evaluó a través de la medición del pH del producto final en condiciones anaerobias como lo indica Sadzawka (2005). En la tabla 13 se muestra el índice de estabilidad y madurez del producto terminado en los cinco tratamientos además de los análisis de Coliformes fecales y Salmonella y Shigella.

En la tabla 14, se observa que el producto del tratamiento A es estable y maduro después de 36 días ya que obtuvo valores de 7 en los índices de estabilidad y madurez que indican que el producto está terminado y puede ser aplicado conforme a lo establecido en la guía de @Solvita así mismo, el producto final presenta un valor de pH de 7.48 después de estar en condiciones anaerobias e incubado a 55°C durante 48hrs como lo señala la NCh2880, (2004) que exige un valor de  $\text{pH} \geq 6.5$  para considerar estable al producto final.

En los tratamientos B y C se muestra que sus productos finales alcanzaron un valor de 5 en los índices de estabilidad y madurez en los mismos 36 días y valores de  $\text{pH} \leq 6.5$  lo que establece que es necesario incrementar el tiempo de curado en ambos tratamientos. Por último, los tratamientos D y E cumplen con los grados de estabilidad y madurez pero esto se debe a que el tiempo total del proceso fue de 80 días.

En lo referente a los organismos patógenos los cinco tratamientos cumplen con la NADF-020-AMBT-2012 ya que para Coliformes fecales establece que los valores sean menores a 1000 NMP/g ST y todos los tratamientos se encuentran por debajo de dicho valor, lo cual es un indicativo de que la etapa termofílica alcanzó las temperaturas de 55°C y el tiempo fue el indicado para cumplir con la eliminación de patógenos en el producto final de los cinco tratamientos.

Tabla 14 Parámetros de madurez y microbiológicos del producto final de los tratamientos A, B, C, D y E

Parámetro	Unidades	Producto final				
		Tratamiento A	Tratamiento B	Tratamiento C	Tratamiento D	Tratamiento E
Estabilidad	Índice de Estabilidad ®Solvita.	7	5	5	7	7
Madurez	1. Índice de madurez ®Solvita (escala 1 a 8)	7	5	5	7	7
	2. Condiciones anaeróbica y pH $\geq 6.5$	$7.48 \pm 0.04$	$6.35 \pm 0.19$	$6.20 \pm 0.43$	$7.55 \pm 0.01$	$6.54 \pm 0.01$
Coliformes fecales*	NMP/ g ST	230.98	340.77	540.22	No detectado	No detectado
<i>Salmonella</i> y <i>Shigella</i> *	NMP/ 4 g ST	No detectado				

### 4.3 Eficiencia del composteo

Los resultados que se obtuvieron al evaluar la calidad de la composta en cada tipo de tratamiento muestran en general un adecuado nivel de macro y micro nutrientes, tal fue el caso de las concentraciones de nitrógeno, potasio y fósforo. El producto final de todos los tratamientos fue comparable con la calidad de la composta que actualmente se produce en la PCBP, lo que a su vez permite el cumplimiento con el contenido de materia orgánica de acuerdo a la norma NADF-020-AMBT-2012.

En el tratamiento A, que involucró modificaciones en el tamaño de partícula del sustrato, inóculo microbiano y aireación mecánica y que correspondió al de menor tiempo de composteo resultó en un producto que cumplió con los parámetros de calidad de composta tipo A (la que aplica como sustrato en vivero y sustituto de tierra para maceta) a excepción de la característica de conductividad eléctrica que se ubicó ligeramente por arriba del límite establecido en la norma; por lo que para dar cumplimiento a este último parámetro se sugiere repetir un mayor número de experimentos para determinar las variaciones del parámetro y analizar en su caso la estrategia de ajuste que permita obtener un valor menor de 4mS/cm.

En relación a los productos finales de los tratamientos B (aireación mecánica y molienda), D y E (que difieren en el tipo de aireación empleado), cumplen con los requisitos de la composta categoría tipo B (para ser utilizada en agricultura ecológica y reforestación) y el producto final del tratamiento C (aireación mecánica e inóculo microbiano), que cumple características de la categoría de aplicación en áreas verdes urbanas y reforestación. No obstante, su adecuada calidad la reducción del tiempo en el proceso de composteo no fue exitosa.

Por otra parte, el valor de los niveles de metales tóxicos en los distintos tipos de productos obtenidos en los cinco tratamientos se mantuvieron por debajo de lo establecido en la NADF-020-AMBT-2012, lo que sugiere que las mezclas de residuos FORSU más poda que maneja la PCBP tienen un adecuado nivel de separación y pureza.

La evolución del nitrógeno total y carbono orgánico en los cinco tratamientos no presentó cambios sustanciales durante el proceso de composteo y en consecuencia la relación C/N tampoco sufrió modificaciones significativas con respecto a las relaciones iniciales que se ubican dentro del intervalo de 15 a 25 y cumplen con la norma ambiental. Estudios previos realizados por la SOS-CIEMAD (2012), ya habían observado que al

inicio del proceso la relación C/N era menor a 30 lo que implicaba una posible pérdida de nitrógeno situación acorde con lo discutido por Zhu, (2006).

Respecto al patrón de evolución del amoníaco y del nitrato durante el proceso de composteo de los tratamientos estudiados se observó que los niveles de concentración determinados permiten clasificar a los tratamientos en dos grupos : a) los que presentan una evolución similar a la esperada –mayores valores de nitratos y menores de amoníaco- (Hultman, 2009), situación que no se había logrado en el producto que se genera actualmente en la PCBP, dentro de este grupo de tratamientos se encuentra la estrategia que condujo a la reducción del tiempo; b) los que presentaron una evolución similar a la del proceso y producto obtenido actualmente en la PCBP y que corresponden a menores valores de nitratos y mayores valores de amoníaco resultado de pérdidas del nitrógeno por altas temperaturas y valores ácidos de pH. Estas relaciones son importantes dado que reflejan la disponibilidad del nitrógeno, ya que son una medida de que tan asimilable puede estar este nutriente en la composta para beneficio de las plantas.

El caso particular del tratamiento C muestra una estrategia de composteo no adecuada para los tiempos de composteo planeados con el resto de los tratamientos (36 días), el producto de éste tratamiento no cumple con la calidad en ninguna de las categorías establecidas en la NADF-020-AMBT-2012, por lo que sería necesario prolongar el tiempo de maduración.

La eficiencia de los procesos de composteo, en escalas piloto e industriales, se ha estudiado incipientemente en los últimos años, algunos autores han dirigido sus esfuerzos hacia la reducción del tiempo de composteo, otros hacia la disminución del costo energético y algunos otros han abordado algunos de los problemas ambientales del proceso como la generación de olores (Sundber, 2005). En la revisión de literatura realizada por Sundber, (2005), se observa que los parámetros prioritarios para el mejoramiento del control del proceso de composteo y el incremento de su eficiencia técnico- ambiental son: aireación, temperatura y pH. Otros estudios han documentado que la degradación de la materia orgánica y el carbono orgánico, durante el proceso de composteo, se incrementa cuando se logra una rápida transición de la etapa mesofílica a la termofílica, lo que además está fuertemente asociado con un cambio de pH de ácido a alcalino en estas etapas (Sundber, 2005). En la etapa mesofílica donde el pH se ubica entre valores de 4 y 5, la acidez se puede reducir si la temperatura del proceso de composteo se encuentra cercana a los 40°C (Smårs *et al.*, 2002). El papel del pH es muy importante en la transformación del nitrógeno asimilable, ya que para valores mayores de

9 se tendrán pérdidas de nitrógeno en forma de amonio y el nitrógeno disponible en el producto final disminuirá (Barrington *et al.*, 2002).

Algunos otros investigadores abordan la reducción del tiempo de composteo, en relación a la reacción de oxidación exotérmica que tiene lugar durante el proceso, mencionan que las temperaturas durante el proceso pueden alcanzar los 70°C, pero el logro de estos valores conlleva a una disminución considerable en la tasa de degradación de la materia orgánica, en consecuencia se propone que la temperatura óptima a la cual se obtiene una alta tasa de degradación es 55°C (Miller, 1993).

En este contexto, destaca el hecho de que la aireación se convierte en un factor fundamental en el control de pH y temperatura durante el proceso de composteo, además al tratarse de un proceso aerobio concentraciones menores al 10% de oxígeno también inhiben la biodegradación, dirigiéndolo hacia un proceso anaerobio además de favorecer la producción de ácidos orgánicos e incrementar el tiempo de degradación de los mismos, en consecuencia la transición de la etapa mesofílica a la etapa termofílica será menor y la velocidad de degradación será disminuida considerablemente (Beck-Friis *et al.*, 2003).

En base a lo descrito, los resultados muestran que la eficiencia del proceso de composteo fue mayor en el tratamiento A (tamaño de partícula, inóculo microbiano y aireación mecánica) ya que en un período de siete días se pasó de la etapa mesofílica a la etapa termofílica, la temperatura en la etapa termofílica no excedió los 56°C porque se controló con la aireación mecánica, además el contenido de oxígeno se mantuvo en niveles superiores al 15% y los valores de pH ácidos solo se presentaron durante nueve días, lo que es indicativo de rápida metabolización de ácidos orgánicos por los microorganismos. Estos cambios se reflejaron finalmente en mayor producción de  $\text{NO}_3$  dado que fue el único tratamiento con valores por encima de 1mg/kg, permitiendo mayor disponibilidad del nitrógeno en el producto final, sin embargo los valores de  $\text{NO}_3$  aún no son los óptimos, esto puede atribuirse a la relación C/N con la que inicia el proceso de composteo, misma que debe ser reformulada en procesos posteriores.

La comparación de los distintos parámetros en cada uno de los tratamientos nos lleva a asumir que la combinación de variables como el inóculo microbiano, el tamaño de partícula y la aireación mecánica condujo a incrementar la eficiencia del proceso de composteo de la mezcla orgánica tratada (FORSU más poda). Esto se demuestra cuando se analizan los datos del tratamiento B (tamaño de partícula y aireación mecánica) pues se presentan valores de pH similares a los del tratamiento A, cumple también con una concentración de oxígeno por encima del 15%, pero que no fue posible apreciar el cambio

de la etapa mesofílica a la etapa termofílica porque hasta el día 17 alcanzó una temperatura de 55°C, además la concentración de NO<sub>3</sub> fue más baja, ambos fenómenos pueden atribuirse a la falta de inóculo microbiano. Un comportamiento similar se observó de igual forma en el tratamiento C (inóculo microbiano y aireación mecánica) donde no fue posible pasar a la etapa termofílica hasta el día 21 y la concentración de oxígeno inicio su decaimiento a partir del día 26 con valores que estuvieron en un rango de entre 8 y 12%, adicionalmente el pH se mantuvo alcalino hasta el día 36 junto con las concentraciones de NO<sub>3</sub> que se ubicaron en niveles de 0.03mg/Kg, lo que hace creer que éste tratamiento aún se encontraba en la fase de curado.

En los tratamientos D y E el objetivo fue probar la influencia del sistema de aireación, si bien los resultados muestran que existe un mayor contenido de oxígeno en el tratamiento D (aireación pasiva) y que las temperaturas fueron menores que en el caso D (aireación mecánica) la evolución del pH en ambos tratamientos se ve modificada sustancialmente hasta el día 55, por tanto la velocidad de degradación permaneció cuasi estática lo sugiere influencia de la combinación de pH ácidos y temperaturas por encima de los 55°C.

Con estos resultados, se reafirma la importancia de la reducción del tamaño de partícula y del control del sistema de aireación, dado que un proceso de composteo que inicia con materia prima sin molienda y con un sistema de aireación inadecuado, se conducirá con un flujo de aire no homogéneo a través de la pila, además el nivel de humedad no se mantendrá dentro de valores razonables para la biodegradación y la representatividad en la toma de muestra se verá afectada con la heterogeneidad de la pila, aunada a una considerable disminución de la velocidad de biodegradación. En consecuencia, el sistema de aireación a elegir dependerá de la escala del proceso de composteo, por lo que si desea realizar un proceso de composteo a menor escala el sistema de elección es el de aireación forzada, en tanto que para un proceso a gran escala que requiere un control más estricto de la concentración de oxígeno, la temperatura y el pH es recomendable la aireación mecánica más que la aeración forzada que implicaría un costo energético muy elevado, esto es aplicable siempre y cuando se generen registros de temperatura rigurosos para evitar volteos innecesarios.

Recapitulando, los resultados del estudio indican que las variables primordiales de control para un proceso de composteo eficiente son: temperatura, humedad, pH y aireación. El sostenimiento de estas variables dentro de los límites descritos dependerá de la escala del proceso de composteo, para procesos menores a 100 ton/día el control

de las cuatro variables es más sencillo, pero en condiciones de composteo a gran escala lo recomendable es monitorear sistemáticamente la temperatura y el número de volteos. Generalmente, esto último asegura que la humedad no represente un problema ya que se ha reportado que en el composteo a gran escala, bajo este esquema de trabajo, las pilas mantienen un contenido de humedad entre 50 y 55% (Choi y Ahn, 2001).

#### **4.4 Análisis estadístico.**

Una vez analizados los resultados y que el objetivo de este trabajo es reducir el tiempo de composteo de la FORSU, los tratamientos fueron comparados en dos grupos; primero se compararon los tratamientos A, B y C para conocer si la influencia del inóculo o la molienda o la aplicación de ambos factores fueron determinantes en la aceleración del proceso de composteo y posteriormente los tratamientos D y E fueron comparados para conocer la influencia del sistema de aireación durante el proceso de composteo. Para saber que factor fue determinante en el proceso de composteo en los tratamientos A, B y C, se utilizó un Análisis de Variancia (ANVA) de una vía, se utilizó el parámetro de temperatura debido a que fue el parámetro que se modificó significativamente con respecto a los demás parámetros analizados.

Para la comparación de los tratamientos D y E se les aplicó una prueba t de student para determinar si existió una diferencia entre la aireación pasiva y la aireación estática durante el proceso de composteo. La aplicación de la prueba t de student se aplicó debido a que en estos tratamientos la única variable a comparar es el tipo de aireación. La variable que se tomó para la aplicación de la prueba también fue la temperatura al igual que en los tratamientos A, B y C.

Los datos obtenidos de temperatura en los tratamientos A, B y C se ajustaron a una distribución normal al pasar la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, obteniendo una probabilidad de  $P=0.114$ . Una vez pasada la prueba de normalidad se aplicó el análisis de variancia de una vía con los datos de las temperaturas de las tablas 18 a la 20 (Anexo1) y en la tabla 15 se muestra el ANVA para estos tres grupos donde se obtiene una diferencia significativa ( $P \leq 0.05$ ,  $P = 0.001$ ), lo cual quiere decir que existe diferencia estadística en al menos un par de tratamientos y que la probabilidad de que los datos obtenidos sean producto del azar es del 0.1%.

Tabla 15 Análisis de Variancia de una vía para los tratamientos A, B y C.

Fuente de Variación	SC <sub>x</sub>	Grados de Libertad	S <sup>2</sup>	F	P
Entre grupos	1657.961	2	828.980	7.351	0.001
Residuo	7780.983	69	112.768		
Total	9438.944	71			

Una vez que se determinó que existe una diferencia significativa en al menos dos tratamientos se realizó la prueba de comparación de medias de Duncan para determinar en qué tratamientos existe diferencia significativa en la tabla 16 se muestran los resultados de la prueba de Duncan en los tres tratamientos.

Lo que se determina con esta prueba es que el tratamiento A tiene diferencia significativa con B y C mientras que B y C no presentan diferencia entre sí, lo que implica que la adición del inóculo y el tamaño de partícula son los responsables de la aceleración del tiempo de composteo ya que los tratamientos por separado fueron no significativos.

Tabla 16 Comparación de medias por el Método de Duncan

Comparación	Diferencia de medias	p	q	P ≤ 0.05
<b>Molienda (B) vs. Molienda+Inoculo (A)</b>	10.564	4.874	0.001	Si
<b>Molienda (B) vs. Inoculo (C)</b>	0.819	0.378	0.790	No
<b>Inoculo (C) vs. Molienda+Inoculo (A)</b>	9.745	4.496	0.002	Si

Las temperaturas en los tratamientos D y E también se ajustaron a una distribución normal al pasar la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, obteniendo una probabilidad de P=0.013. Una vez pasada la prueba de normalidad se aplicó el análisis t de student con los datos de las temperaturas de las tablas 21 a la 24 (Anexo1) y en la tabla 17 se observan los resultados de la prueba donde para una  $t=0.36$  la probabilidad es de P=0.718 donde se observa que no se cumple con ( $P \leq 0.05$ ) lo que indica que la diferencia estadística en los tratamientos D y E no presentan diferencia significativa. Por lo tanto, no existe diferencia entre la aireación pasiva y la aireación estática. En ocasiones ésta diferencia se puede atribuir a la aleatoriedad del muestreo sin embargo, este no es el caso, ya que la diferencia entre las medias de ambos tratamientos demuestra que el muestreo es representativo.

Tabla 17 t de student para los tratamientos D y E.

Grupo	N	Medias	Desviación Estándar	Grados de libertad	t	P
Tratamiento D	26	43.217	10.622	50	7.351	0.0718
Tratamiento E	26	42.191	9.743			

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El estudio descrito en este documento se enfocó en estudiar las variables fisicoquímicas y biológicas que afectan el tiempo de composteo de la mezcla orgánica (FORSU más poda) que se procesa en la PCBP, con el objetivo principal de encontrar la combinación de parámetros que permitiera una reducción del tiempo en el que realiza el proceso sin menoscabo de la calidad del producto final.

Los resultados y los productos generados durante el desarrollo del trabajo permitieron cumplir con los objetivos de la tesis y probar la hipótesis sugerida que se relaciona con el uso de inóculo de la fracción líquida de la FORSU, reducción del tamaño de partícula de la mezcla y modificación tipo de aireación para disminuir el tiempo del proceso de composteo que se aplica en la PCBP a escala piloto. Además, proporcionaron evidencias que apoyan las siguientes conclusiones:

1. El tratamiento que resultó reducir el tiempo de composteo en un volumen de 0.25m<sup>3</sup> fue el que combino la adición del inóculo más el tamaño de partícula de 2.5 y 3.5cm, siendo la aplicación de ambas variables al mismo tiempo y su adición al principio del proceso. Se logró la reducción del 61% con respecto al tiempo actual de composteo en la PCBP.
2. El producto final del tratamiento A cumplió con todos los parámetros establecidos en la NADF-020-AMBT-2012 para una composta de tipo B la cuál puede ser aplicada en la agricultura ecológica y reforestación. Sin embargo, si se mejora la conductividad eléctrica puede alcanzar la aplicación de una composta tipo A la cual es aplicada como sustrato para viveros y sustituto de tierra de maceta ya que es el único parámetro que no cumple.
3. Se tiene que aumentar la relación C/N porque aún se sigue comenzando el proceso con valores entre 22 y 30 aún por debajo de lo recomendado C/N>35, lo

que genera una disponibilidad de nitrógeno baja en todos los productos finales en los cinco tratamientos.

4. El tamaño de partícula es fundamental para la aireación durante el proceso de composteo ya que con la aplicación de ésta medida se tienen comportamientos homogéneos en la temperatura, humedad y contenido de oxígeno durante el proceso.
5. La medición de la temperatura es el parámetro más representativo del proceso de composteo debido a que con este parámetro es posible evaluar la frecuencia de los volteos en las pilas, asegurar la eliminación de patógenos y reducir las pérdidas de nitrógeno si la temperatura excede los 65°C.
6. La aplicación de la aireación pasiva es funcional en plantas de composta a menor escala (<100ton/d) ya que con este sistema de aireación los costos de operación son menores que los de la aireación con volteo mecánico como lo mencionan Zu et al., (2004).
7. Si bien la dosis de inóculo de 0.20L/Kg de materia prima logró reducir 61% el proceso de composteo de la FORSU es necesario realizar estudios con diferentes concentraciones y encontrar la dosis óptima del inóculo.
8. Con la aplicación del tratamiento A en comparación al estudio realizado por SOS-CIEMAD, (2012), la conductividad eléctrica se logró reducir de 12mS/cm a un intervalo entre 3 y 5 mS/cm en el producto final, el pH también sufrió modificaciones, en este caso en el estudio mencionado el pH del producto final era de 5.6 y con el tratamiento se logró aumentar a 7.42 por lo que se concluye que le tratamiento A logró mejorar la calidad del producto en estos parámetros.
9. Se concluye que se redujo el tiempo de composteo de la FORSU en un 61%, pero en un volumen de 0.25m<sup>3</sup>, por lo que es necesario tratar de implementar este sistema de inoculación y molienda a nivel industrial y evaluar cuál es el tiempo de reducción real a esta escala.
10. Si se logrará reducir a 40 días de proceso (sin contar la etapa de maduración), la capacidad de la PCBP aumentaría aproximadamente el 50% con lo que se podrían recibir un total de 3670ton/día de FORSU.

## **Recomendaciones**

1. Es importante aumentar la relación C/N antes de comenzar el proceso de composteo, para esto se requiere la adición de papel, cartón servilletas incluso hasta papel sanitario como lo han hecho Eklind, (2000); Vikman et al. (2002);

Venelampi et al. (2003). Sobre todo si existen planes de abrir una nueva o nuevas plantas de composta en la CM.

2. Aunque se conocen los problemas de operación en la PCBP es importante que apliquen el proceso de molienda ya que permite una mejor aireación e impide la generación de zonas anaerobias en la pila y en consecuencia la posible generación de malos olores.
3. Se recomienda realizar un estudio sobre la concentración del inóculo y el tamaño de partícula en una pila en la PCBP para determinar el tiempo de reducción del proceso de composteo a nivel industrial.
4. Al ser la temperatura un parámetro fundamental en el proceso de composteo se recomienda realizar mediciones de temperatura con una sonda de acero, la cual tenga un termopar integrado para poder llegar al centro de las pilas en la PCBP y determinar algunas acciones necesarias cuando la temperatura exceda los 65°C y evitar las pérdidas de nitrógeno.
5. También es necesario realizar un estudio con diferentes concentraciones del inóculo primero en una escala piloto y posteriormente a una escala industrial para determinar la dosis óptima del inóculo.
6. Es necesario encontrar un método alternativo para la medición de CO<sub>2</sub> en la pila durante el proceso de composteo ya que con el método empleado en éste trabajo se observó variabilidad en las mediciones debido a la poca sensibilidad del método.
7. Con los resultados observados se recomienda que la temperatura se tome como parámetro para realizar el seguimiento de los parámetros fisicoquímicos a lo largo del proceso de composteo.
8. Una de las tareas siguientes es realizar un estudio de ciclo de vida del proceso de composteo en la PCBP para determinar las emisiones de Gases Efecto Invernadero que produce compostear 2500 ton/día de FORSU ya que de acuerdo al modelo Waste Reduction Model (WARM) de la Agencia de Protección al Ambiente (EPA), por darle tratamiento a las 2500ton/d de FORSU se reduce un total de 656,635 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> eq por año, en comparación a si se siguieran disponiendo en un RS lo que equivale a retirar de circulación a un total de 1'701'126 vehículos en un año. Si se lograra aumentar la capacidad de tratamiento en un 50% (3,670ton/día), se retirarían de circulación 2'879'339 vehículos/año. Es decir, 1'178'213 vehículos/año más que con las condiciones antes presentadas.

## 6. BIBLIOGRAFIA.

1. Ahmad, R., Jilani, G., Arshad, M., Zahir, Z. A., Khalid, A. (2007). Bio-conversion of organic wastes for their recycling in agriculture: an overview of perspectives and prospects, *Annals of Microbiology*, 57 (4):471-479.
2. Awomeso, J., Taiwo A., Gbadebo A., and Arimoro A. (2010). Waste disposal and pollution management in urban areas: A workable remedy for the environment in developing countries. *American Journal of Environmental Sciences* 6(1): 26-32.
3. Baeta-Hall, L., Saagua, M.C., Bartolomeu, M.L., Anselmo, A.M., Rosa, M.F. (2002). A compostagem como processo de valorização dos resíduos produzidos na estacção de azeite em contínuo. *Boletín de Biotecnología*. 72: 31-37.
4. Barrena, R. (2006). Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso. Trabajo para optar al grado de Doctor en Ciencias y Tecnologías ambientales. Universidad de Barcelona. España.
5. Barrington, S., Choinière, D., Trigui, M. & Knight, W. (2002). Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses. *Bioresource Technology* 83:189-194.
6. Beck-Friis, B.G. (2001). Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane during composting of organic household waste. Doctoral thesis, Agraria 266, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
7. Bongochgetsakul, N., Ishida, T. 2008. A new analytical approach to optimizing the design of large-scale composting systems. *Bioresource Technology*, 99 (6):1630–1641.
8. Brinton, W. (1998) Volatile Organic Acids in Compost: production and Odorant Aspects. *Compost Science & Utilization*, 4:75-82.
9. Castaldi, P., Alberti G., Merella, R., Melis, P. (2005). Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity, *Waste Management* 25: 209–213.
10. Cayuela, M.L., Sánchez-Monedero, M.A. y Roig, A. (2006). Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes, *Process Biochemistry* 41: 616-623.

11. California Compost Quality Council (2001). Compost maturity index, ccqc. Technicalreport. <http://www.ccqc.org> (07/01/05).
12. CCQC (California Compost Quality Council), (2001). Compost Maturity Index, Technical Report.
13. Castrillón, O., Bedoya, O., Montoya, D. (2006). Efecto del pH sobre el crecimiento de microorganismos durante la etapa de maduración en pilas estáticas de compost. *Producción+Limpia*. Volumen1. Nº 2: 87-98.
14. Changa, C.M., Wang, P., Watson, M.E., Hoitink, H.A.J. and Michel Jr, F.C. (2003). Assessment of the Reliability of a Commercial Maturity Test Kit for Composted Manures, *Compost Science & Utilization*, 11(2):127-145.
15. Choi, H.L., Richard, T.L. & Ahn, H.K. 2001. Composting high moisture materials: Biodrying poultry manure in a sequentially fed reactor. *Compost Science & Utilization* 9:303-311.
16. Cooperband, L. (2002). *The Art and Science of Composting*. A resource for farmers and compost producers, Center for Integrated Agricultural Systems. University of Wisconsin-Madison.
17. Costa, F., García, C., Hernández, T., Polo, A. (1995). *Residuos orgánicos urbanos: manejo y utilización*. 2ª Ed., Ed. CSIC, España.
18. Cox P., Wilkinson S.P., Anderson J.M. (2001). Effects of fungal inocula on the decomposition of lignin and structural polysaccharides in *Pinus sylvestris* litter, *Biology and Fertility of Soils*, 33:246–251.
19. Dignac, M.F., Houot, S., Francou, C., Derenne, S. (2005). Pyrolytic study of compost and waste organic matter. *Organic Geochemistry*, 36: 1054-1071.
20. *Ecoamérica: Tecnologías limpias para el nuevo milenio*, (2001). Compostaje: creciendo en calidad. Chile. Ed. Nº9: 14-15.
21. Ekinci, K., Keener, H. M., and Elwell, D. L. (2000). "Composting short paper fiber with broiler litter and additives part I: Effects of initial pH and carbon/nitrogen ratio on ammonia emission," *Compost Science & Utilization*, 8(2):160-172.
22. Eklind, Y., and H. Kirchmann. (2000). Composting and storage of organic household waste with different litter amendments: I. Carbon turnover. *Bioresource Technology*, 74:115–124.
23. ERDC-CERL (U.S. Army Engineer Research and Development Center Construction Engineering Research Laboratory. (2010). Demonstration of the Ecopod Composting System at fort Lewis and Fort Hood. Public Works Technical Bulletin No. 200-1-69.

24. EPA, 1995. Decision-Makers Guide to Solid Waste Management. Vol. 2, United State Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 372.
25. EPA. (Environmental Protection Agency). (2002). Solid Waste Management and Greenhouse Gases. A Life-cycle Assessment of Emissions and Sinks, 2nd ed. Contract EPA530-R-02-006, US Environmental Protection Agency. Washington, DC.
26. Farrell, M. and Jones, D.L. (2009). Critical evaluation of municipal solid waste composting and potential compost markets, *Bioresource Technology*, 100:4301–4310.
27. Fortis-Hernández, M., Leos-Rodríguez, J. A., Preciado-Rangel, P., Orona-Castillo, I., García-Salazar, J. A., García-Hernández, J. J., Orozco-Vidal, A. (2009). Aplicación de abonos orgánicos en la producción de maíz forrajero con riego por goteo. *Terra Latinoamericana* 27: 329-336.
28. Francou, C., Lineres, M., Derenne, S., Le Villio-Poitrenaud, M., and Houot, S. (2008). Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations during composting. *Bioresource Technology*, 99(18):8926-8934.
29. Fuchs, J.G. (2009). Interactions Between Beneficial and Harmful Microorganisms: From the Composting Process to Compost Application, Chapter 11, in *Microbes at Work From Wastes to Resources*.
30. Ghaffari, S., Sepahi, A.A., Razavi, M.R., Malekzadeh, F., Haydarian, H. (2011). Effectiveness of inoculation with isolated *Anoxybacillus* sp MGA110 on municipal solid waste composting process. *African Journal of Microbiology Research*, 5: 5373-5378.
31. García de la Fuente, R., Cuesta, G., Sanchís-Jiménez, E., Botella, S., Abad, M., Fornes, F. (2011). Bacteria involved in sulfur amendment oxidation and acidification processes of alkaline 'alperujo' compost, *Bioresource Technology*, 102:1481–1488.
32. Gautam, S.P., Bundela, P.S., Pandey, A.K., Awasthi, M.K. and Sarsaiya, S. (2010). Evolution of Composting as a Strategy for Managing Organic Municipal Solid Wastes in Central India, *Australian Journal of Basic & Applied Sciences* 4 (10): 5451.
33. Gonzalez, C., and Morales, J.J. (2002). Hard Times Or Promising Future For Composting In Mexico?, *Biocycle International*, 74-75.

34. Heimlich, J.E., K.L. Hughes and A.D. Christy. (2005). Integrated Waste Management. OSU Extension, Ohio.
35. Hamoda, M. F., Qdais, H. A. A., and Newham, J. (1998): Evaluation of municipal solid waste composting kinetics. *Resources, Conservation and Recycling* 23:209-223.
36. Heimlich, J.E., Hughes K.L. and Christy A.D. (2005). Integrated Waste Management. OSU Extension, Ohio.
37. Hogan, J. (1998). Composting. Biological Treatment of Hazardous Wastes.357-383.New York.
38. Hoorweg, D. T. L., (1999). What a Waste: Solid Waste Management in Asia.The International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank.
39. Hubbe, M.A., Nazhad M., and Sánchez C. (2010). Composting as a way to convert cellulosic biomass and organic waste into high-value soil amendments a review, *BioResources*, 5(4): 2808 – 2854.
40. Huldrych, E. (2008). Kjeldahl Guide Buchii. BUCHII Labortechnik AG, CH-9230 Flawil, Switzerland.
41. Hultman, J. (2009). “Microbial diversity in the municipal composting process and development of detection methods,” PhD thesis, Department of Ecological and Environmental Sciences, Faculty of Biosciences and Institute of Biotechnology and Vikki Graduate school in biosciences, University of Helsinki, Finland.
42. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Censo de Población y Vivienda.
43. INTEC (1999). Manual de compostaje. Corporación de investigación tecnológica de Chile.
44. Itavaara, M., Vikman, M., and Venelampi, O. (1997). Windrow composting of biodegradable packaging materials. *Compost Science & Utilization*, 5(2):84-92.
45. Jilani, S. (2007). Municipal solid waste composting and its assessment for reuse in plant production, Pakistan *Journal of Botany*, 39 (1):271–277.
46. Komilis, D.P., Ham, R.K. (2004). Life-cycle inventory of municipal solid waste and yard waste windrow composting in the United States, *Journal of Environmental Engineering*, 130:1390–1400.
47. Kulcu, R., Yaldiz, O. (2007). Composting of goat manure and wheat straw using pine cones a bulking agent. *Bioresource Technology*, 98:2700-2704.
48. Li, G., Zhang, F. (2000). Solid Wastes Composting and Organic Fertilizer Production. Chemical Engineering Press, Beijing.

49. Liang, Y., Leonard, J.J., Feddes, J.J.R., McGill, W.B. (2006). Influence of carbon and buffer amendment on ammonia volatilization in composting. *Bioresource Technology*, 97:748-761.
50. Litterick, A.M., Harrier, L., Wallace, P., Watson, C.A., Wood, M. (2004). The role of uncomposted materials, composts, manures and compost extracts in reducing pest and disease incidence and severity in sustainable temperate agricultural and horticultural crop production—a review, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 23:453–479.
51. Lou, S.F., y Nair, J. (2009). The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions – a review. *Bioresource Technology*, 100 (16):3792-3798.
52. Mari, I., Ehaliotis, C., Kotsou, M., Balis, C., Georgakakis, D. (2003). Respiration profiles in monitoring the composting of by-products from the olive oil agro-industry. *Bioresource Technology*, 87:331-336.
53. Marmolejo, L., Diaz, L., Torres P., and García, M. (2012). Perspectives for Sustainable Resource Recovery from Municipal Solid Waste in Developing Countries: Applications and Alternatives. Chapter 7 in the book *Waste Management – An Integrated Vision*.
54. Miller, F.C. (1993). Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. In: Metting, F.B.J. (Eds). *Soil microbial ecology*. Marcel Dekker, New York. 515-544.
55. Ming, L., Xuya, P., Youcai, Z., Wenchuan, D., Huashuai, C., Guotao, L., Zhengsong, W. (2008). Microbial inoculum with leachate recirculated cultivation for the enhancement of OFMSW composting. *Journal of Hazardous Materials*, 153:885–891.
56. Miyataki, F., Iwabuchi, K. (2006). Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure. *Bioresource Technology*, 97: 61-65.
57. Nair, J., Okamitus K. (2010). Microbial inoculants for small scale composting of putrescible kitchen wastes. *Waste Management*, 30: 977- 982.
58. Nakasaki, K., Fujiwara, S., Kubota, H. (1994). A newly isolated thermophilic bacterium, *Bacillus licheniformis* HA1 to accelereate the organic matter decomposition in high rate composting, *Compost Science & Utilization*, 2 88–96.
59. Neklyudov AD, Fedotov GN, Jvankin AN (2006). Aerobic processing of organic waste into composts. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 42: 341-353.

60. NCh 2880-2004, Norma Chilena de Compost 2880-2004: Compost - Clasificación y requisitos, Instituto Nacional de Normalización (INN), 23 p, Santiago, Chile (2004).
61. Norma ambiental NADF-020-AMBT-2011, "Que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el Distrito Federal".
62. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-112-SSA1-1994. Bienes y servicios. determinación de bacterias coliformes. técnica del número más probable.
63. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-114-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método para la determinación de Salmonella en alimentos.
64. Ohtaki, A., Akakura, N., Nakasaki, K. (1998). Effects of temperature and inoculums on the degradability of poly- $\epsilon$ -caprolactone during composting. *Polymer Degradation and Stability*, 62: 279-284
65. Orta, M.T., Saucedo, G. y Tovar, L.R. (2010). Composición y Generación de Residuos Sólidos Urbanos de la Ciudad de México Durante 2008-2009, en prensa.
66. Partanen, P., Hultman, J., Paulin, L., Auvinen, P., Romantschuk, M. (2010). Bacterial diversity at different stages of the composting process, *BMC Microbiology* 10:94 – 104.
67. Rand, T., Haukohl, J. and Marxen, U. (2000). Municipal Solid Waste Incineration, A Decision Maker's Guide. Washington, DC: The International Bank for Reconstruction and Development, World Bank.
68. Raut, M.P., Prince, W.S.P.M., Bhattacharyya, J.K., Chakrabarti, T., Devotta, S. (2008). Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste- A compost maturity analysis perspective. *Bioresource Technology*, 99: 6512-6519.
69. Richard, T.L., Veeken, A., de Wilde, V., Hamelers, H. (2004). Air-filled porosity and permeability relationships during solid-state fermentation. *Biotechnology Progress*, 20:1372-1381.
70. Ruggieri, L., Gea, T., Artola, A., Sánchez, A. (2009). Air filled porosity measurements by air pycnometry in the composting process: a review and a correlation analysis. *Bioresource Technology*, 100 (10):2655-2666.
71. Sadzawka, R.A., Carrasco, M.A.R., Grez, R.Z. y Mora, M.L.G. (2005). Métodos de análisis de compost. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, *Serie Actas* N° 30, Santiago, Chile.

72. Secretaría de Obras y Servicios del Distrito Federal. (2011).Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal.
73. Secretaría de Obras y Servicios del Distrito Federal, Instituto Politécnico Nacional CIEMAD Proyecto Vinculado. (2012) Viabilidad de la capacidad del área actual de la planta de composta, así como su capacidad de operación y la viabilidad de la inclusión del área de la planta de selección a la planta de composta. México, D.F.
74. SEMARNAT. (2013). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental Edición 2012. México.
75. Schloss, P.D. y. Walker L.P (2000). Measurement of process performance and variability in inoculated composting reactors using ANOVA and power analysis. *Process Biochemistry*, 35:931-942.
76. Simpson, K. 1986. Abonos y estiércoles. Editorial Acribia. Zaragoza, España.
77. Slater, A. and Frederickson, J. (2001). Composting municipal waste in the UK: some lessons from Europe Resources, *Conservation and Recycling*, 32:359–374.
78. Smårs, S. (2002). Influence of different temperature and aeration regulation strategies on respiration in composting of organic household waste. Doctoral thesis, Agraria 324, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
79. Solano, M.L., Iriarte, F., Ciria, P., Negro, M.J. (2001). Performance characteristics of three aeration systems in the composting of sheep manure and straw. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 79:317–329.
80. Solvita® Test Quick Guide. (2012). Official Solvita Guideline Compost Emissions Test — V. 6.0. Woods End Laboratories, Inc.
81. Sundber, C. (2005). Improving Compost Process Efficiency by Controlling Aeration, Temperature and pH. Doctoral thesis, Agraria 103, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
82. Sung, M., and Ritter, W. F. (2008). Food waste composting with selected paper products. *Compost Science & Utilization*, 16(1):36-42.
83. Suzuki, T., Ikumi, Y., Okamoto, S., Watanabe, I., Fujitake, N., and Otsuka, H. (2004). Aerobic composting of chips from clear-cut trees with various co-materials. *Bioresource Technology*, 95(2):121-128.
84. Taiwo, A.M. (2011).Composting as a sustainable waste management technique in developing countries. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4:93-102.
85. Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S. (1993). Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues, McGraw Hill.

86. Tiquia, N.F.Y. Tam, I.J. Hodgkiss. (1997). Effects on bacterial inoculum and moisture adjustment on composting of pig manure, *Environmental Pollution*, 96:161–171.
87. Thomas (1995). A compost study: a critical evaluation of microbial inoculation in composting fish wastes, Master Thesis of Science in Environmental Studies, Bemidji State University.
88. Tognetti, C., Mazzarino, M.J., Laos, F. (2007). Improving the quality of municipal organic waste compost. *Bioresource Technology*, 98: 1067-1076.
89. Trautmann, N.M. And Kransy, M.E. (1997). Composting in the Classroom, National Science Foundation, Cornell Waste Management Institute. E.U.
90. Trois, C., Polster, A. (2007). Effective pine bark composting with the Dome Aeration Technology. *Waste Management*, 27: 96-105.
91. UNEP. (1996). International Source Book on Environmentally Sound Technology for Municipal Solid Waste Management. United Nations Environmental Programme, United Nations, ISBN: 9280715038.
92. USEPA. (1995). Decision Maker's Guide to Solid Waste Management, Volume II, (EPA 530-R-95-023).
93. Van Haaren, R. (2009). Large scale aerobic composting of source separated organic wastes: A comparative study of environmental impacts, costs, and contextual effects. Thesis of MS Degree in Earth Resources Engineering, Columbia University.
94. Vargas-García, F.F. Suárez-Estrella, M.J. Lopez, J. Moreno. (2006). Influence of microbial inoculation and co-composting material on the evolution of humic-like substances during composting of horticultural wastes. *Process Biochemistry*, 41:1438–1443.
95. Venelampi, O., Weber, A., Rönkkö, T., Itävaara, M. 2003. The biodegradation and disintegration of paper products in the composting environment. *Compost Science & Utilization*. 11: 200–209.
96. Vikman, M., Karjomaa, S., Kapanen, A., Wallenius, K., Itävaara, M. (2002). The influence of lignin content and temperature on the biodegradation of lignocellulose in composting conditions. *Applied Microbiology Biotechnology*. 59 (4–5):591–598.
97. Weast, R.C., Lide, D.R., Astle, M.J. & Beyer, W.H. Eds. 1989-1990. CRC handbook of chemistry and physics. CRC Press. Boca Raton, Florida.
98. Wu, Wei. (2007). Anaerobic co-digestion of biomass for methane production: recent research achievements. Iowa State University.

99. Xi, B.D., Zhang, G.J., Liu, H.L. (2005). Process kinetics of inoculation composting of municipal solid waste. *Journal of Hazardous Materials*, B124: 165-172.
100. Xi, B.D., He, X.S., Wei, Z.M., Jiang, Y.H., Li, M.X., Li, D., Li, Dang, Q.L. (2012). Effect of inoculation methods on the composting efficiency of municipal solid wastes. *Chemosphere*, 88:744–750.
101. Zaho, S., Liu, X., Duo, L. (2012). Physical and Chemical Charaterization of Municipal Solid Waste Compost in Different Particle Size Fractions. *Polish Journal of Environmental Studies*, 21:209-515.
102. Zhang, W.X., Lau, A.K., and Wen, Z.S. (2009). "Preventive control of odor emissions through manipulation of operational parameters during the active phase of composting," *Journal of Environmental Science and Health - Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 44(5):496-505.
103. Zhu N., Deni CH., Xiong Y. y Quian H. (2004). Performance characteristic of tree aeration system in the swine manure composting. *Bioresource Technology*. 95:319–326.
104. Zhu, N. (2006). Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw. *Bioresource Technology*. 98(1): 9-13
105. Zmora-Nahum, S., Markovitch, O., Tarchitzky, J., Chen, Y. (2005). Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity. *Soil Biology & Biochemistry*, 37:2109-2116.

# **ANEXO 1**

## **PARÁMETROS DE CAMPO**

Tabla 18 Parámetros de campo en el Tratamiento A.

Tiempo (días)	Humedad a 30cm (%)	Humedad a 60cm (%)	Media Humedad (%)	Temperatura (°C)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)
0	79.00 ± 21.83	100.00 ± 0.00	89.50 ± 10.92	31.06 ± 3.47	0.00 ± 0.00	15.00 ± 0.63
3	51.00 ± 9.94	100.00 ± 0.00	75.50 ± 4.97	47.20 ± 3.89	0.00 ± 0.00	14.83 ± 0.41
5	50.50 ± 6.85	94.00 ± 9.66	72.25 ± 8.26	49.56 ± 3.53	0.00 ± 0.00	15.17 ± 0.41
7	47.00 ± 9.19	84.00 ± 8.43	65.50 ± 8.81	52.33 ± 3.32	0.00 ± 0.00	14.67 ± 0.52
10	44.40 ± 8.82	82.00 ± 14.76	63.22 ± 11.79	52.64 ± 2.72	0.00 ± 0.00	14.83 ± 0.41
12	40.00 ± 10.54	78.00 ± 14.76	59.00 ± 12.65	55.25 ± 1.66	0.00 ± 0.00	15.00 ± 0.00
14	39.50 ± 9.56	74.00 ± 16.47	56.75 ± 13.02	56.01 ± 2.21	0.00 ± 0.00	14.83 ± 0.75
17	35.50 ± 10.12	72.00 ± 11.35	53.75 ± 10.74	51.91 ± 7.88	0.17 ± 0.41	15.00 ± 0.00
19	33.00 ± 8.23	66.00 ± 15.78	49.50 ± 12.01	39.93 ± 3.56	0.17 ± 0.41	14.67 ± 0.52
21	29.00 ± 5.68	53.00 ± 4.83	41.00 ± 5.26	25.84 ± 2.68	0.33 ± 0.52	14.17 ± 0.41
24	26.00 ± 6.99	45.00 ± 5.27	35.50 ± 6.13	25.94 ± 3.48	0.33 ± 0.52	14.00 ± 0.00
26	22.00 ± 6.32	36.00 ± 5.16	29.00 ± 5.74	24.46 ± 2.41	0.50 ± 0.55	12.17 ± 0.41
28	22.00 ± 4.22	33.00 ± 4.83	27.50 ± 4.53	23.92 ± 2.29	0.50 ± 0.55	11.50 ± 0.84
31	18.00 ± 4.22	32.00 ± 6.32	25.00 ± 5.27	22.72 ± 2.49	0.67 ± 0.52	10.83 ± 0.98
33	17.00 ± 4.83	34.00 ± 5.16	25.50 ± 5.00	22.48 ± 3.26	0.67 ± 0.52	10.17 ± 0.41
35	19.00 ± 3.16	30.00 ± 4.71	24.50 ± 3.94	23.55 ± 2.49	0.67 ± 0.52	10.00 ± 0.00
38	18.00 ± 4.22	33.00 ± 4.83	25.50 ± 4.53	24.78 ± 1.89	0.50 ± 0.55	9.67 ± 0.82
42	24.00 ± 5.16	29.00 ± 5.68	26.50 ± 5.42	26.09 ± 2.21	0.83 ± 0.41	9.67 ± 0.82
45	27.00 ± 4.83	24.00 ± 5.16	25.50 ± 5.0	25.12 ± 3.01	0.67 ± 0.52	9.00 ± 1.10
47	28.00 ± 4.22	26.00 ± 5.16	27.00 ± 4.69	24.78 ± 2.58	0.67 ± 0.52	9.33 ± 1.03
52	28.00 ± 4.22	26.00 ± 10.32	27.00 ± 7.27	24.79 ± 2.53	0.83 ± 0.41	9.00 ± 1.10
56	29.00 ± 3.16	28.00 ± 4.22	28.50 ± 3.69	24.75 ± 3.50	1.00 ± 0.00	8.33 ± 0.82
59	27.00 ± 4.83	22.00 ± 6.32	24.50 ± 5.58	22.94 ± 3.58	1.00 ± 0.00	7.00 ± 1.55
61	29.00 ± 5.68	22.00 ± 4.22	25.50 ± 4.95	24.08 ± 3.21	1.00 ± 0.00	8.33 ± 0.82

Tabla 19 Parámetros de campo en Parámetros de campo en el Tratamiento B.

Tiempo (días)	Humedad a 30cm (%)	Humedad a 60cm (%)	Media Humedad (%)	Temperatura (°C)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)
0	57.00 ± 28.69	92.00 ± 16.87	74.50 ± 22.78	30.68 ± 4.64	0.00 ± 0.00	15.17 ± 0.41
3	36.00 ± 15.78	85.00 ± 27.18	60.50 ± 21.48	45.23 ± 2.80	0.00 ± 0.00	15.00 ± 0.00
5	35.00 ± 10.80	82.00 ± 19.32	58.50 ± 15.06	45.57 ± 3.23	0.00 ± 0.00	15.33 ± 0.52
7	33.00 ± 6.75	74.00 ± 9.66	53.50 ± 8.21	46.91 ± 3.6	0.00 ± 0.00	15.17 ± 0.41
10	32.00 ± 10.33	72.00 ± 32.93	52.00 ± 21.63	48.18 ± 4.62	0.00 ± 0.00	15.00 ± 0.00
12	35.00 ± 9.72	70.00 ± 21.6	52.50 ± 15.66	48.37 ± 3.19	0.00 ± 0.00	14.83 ± 0.41
14	36.00 ± 9.66	68.00 ± 15.49	52.00 ± 12.58	48.55 ± 6.26	0.00 ± 0.00	15.00 ± 0.00
17	35.00 ± 5.27	64.00 ± 8.43	49.50 ± 6.85	54.13 ± 2.69	0.00 ± 0.00	14.83 ± 0.41
19	33.00 ± 4.83	59.50 ± 11.65	46.25 ± 8.24	54.20 ± 3.02	0.00 ± 0.00	14.50 ± 0.55
21	27.00 ± 4.83	45.00 ± 8.50	36.00 ± 6.67	54.08 ± 3.65	0.17 ± 0.41	15.17 ± 0.41
24	17.00 ± 4.83	33.00 ± 4.83	25.00 ± 4.83	54.60 ± 2.34	0.17 ± 0.41	14.33 ± 0.52
26	16.00 ± 5.16	31.00 ± 3.16	23.50 ± 4.16	53.40 ± 3.29	0.33 ± 0.52	14.83 ± 0.41
28	16.50 ± 4.12	28.00 ± 9.19	22.25 ± 6.66	53.35 ± 5.39	0.17 ± 0.41	15.00 ± 0.00
31	18.00 ± 3.5	31.00 ± 5.68	24.50 ± 4.59	50.02 ± 4.12	0.33 ± 0.52	14.67 ± 0.52
33	16.00 ± 4.59	32.00 ± 6.32	24.00 ± 5.46	48.22 ± 4.52	0.17 ± 0.41	15.17 ± 0.41
35	17.50 ± 4.25	35.00 ± 5.27	26.25 ± 4.76	46.60 ± 4.18	0.33 ± 0.52	15.33 ± 0.52
38	18.50 ± 3.37	33.00 ± 4.83	25.75 ± 4.10	45.12 ± 3.14	0.50 ± 0.55	15.17 ± 0.41
42	19.00 ± 2.11	34.00 ± 5.68	26.50 ± 3.90	38.86 ± 2.38	0.33 ± 0.52	15.50 ± 0.55
45	18.00 ± 4.22	27.00 ± 4.83	22.50 ± 4.53	36.18 ± 5.95	0.17 ± 0.41	15.17 ± 0.41
47	18.00 ± 4.22	27.00 ± 4.83	22.50 ± 4.53	32.59 ± 6.51	0.50 ± 0.55	14.83 ± 0.75
52	22.00 ± 4.22	33.00 ± 4.83	27.50 ± 4.53	26.70 ± 2.67	0.67 ± 0.52	14.67 ± 0.52
56	26.00 ± 6.99	35.00 ± 5.27	30.50 ± 6.13	24.53 ± 2.66	0.50 ± 0.55	14.17 ± 0.41
59	24.00 ± 6.99	31.00 ± 3.16	27.50 ± 5.08	26.04 ± 3.87	0.67 ± 0.52	12.43 ± 2.30
61	23.00 ± 6.75	28.50 ± 4.74	25.750 ± 5.75	24.56 ± 2.43	0.83 ± 0.41	11.33 ± 2.07

Tabla 20 Parámetros de campo en el Tratamiento C.

Tiempo (días)	Humedad a 30cm (%)	Humedad a 60cm (%)	Media Humedad (%)	Temperatura (°C)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)
0	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	30.05 ± 6.20	0.00 ± 0.00	14.67 ± 0.52
3	61.00 ± 21.32	100.00 ± 0.00	80.50 ± 10.66	43.05 ± 1.97	0.00 ± 0.00	15.17 ± 0.41
5	61.00 ± 18.53	100.00 ± 0.00	80.50 ± 9.27	44.12 ± 2.86	0.00 ± 0.00	14.83 ± 0.41
7	64.00 ± 17.76	100.00 ± 0.00	82.00 ± 8.88	42.99 ± 4.34	0.00 ± 0.00	14.83 ± 0.41
10	68.00 ± 13.98	100.00 ± 0.00	84.00 ± 6.99	43.08 ± 2.52	0.00 ± 0.00	14.67 ± 0.52
12	66.00 ± 18.97	100.00 ± 0.00	83.00 ± 9.49	44.37 ± 3.12	0.00 ± 0.00	14.83 ± 0.41
14	61.50 ± 12.48	88.00 ± 10.33	74.75 ± 11.41	46.13 ± 2.53	0.00 ± 0.00	15.00 ± 0.00
17	33.50 ± 8.18	80.00 ± 9.43	56.75 ± 8.81	47.64 ± 3.04	0.00 ± 0.00	14.67 ± 0.52
19	31.00 ± 8.76	74.00 ± 9.66	52.50 ± 9.21	49.24 ± 5.56	0.00 ± 0.00	14.67 ± 0.52
21	33.00 ± 10.59	71.00 ± 15.24	52.0 ± 12.92	53.58 ± 2.54	0.00 ± 0.00	14.17 ± 0.41
24	34.00 ± 8.43	61.00 ± 7.38	47.50 ± 7.91	53.61 ± 5.58	0.00 ± 0.00	14.86 ± 0.38
26	34.00 ± 12.65	55.00 ± 9.72	44.50 ± 11.19	52.03 ± 2.49	0.00 ± 0.00	15.29 ± 0.49
28	32.00 ± 9.19	51.00 ± 7.38	41.50 ± 8.29	52.26 ± 3.27	0.14 ± 0.38	15.57 ± 0.53
31	29.00 ± 8.76	49.00 ± 5.68	39.00 ± 7.22	50.14 ± 3.25	0.14 ± 0.38	15.29 ± 0.49
33	27.00 ± 6.75	46.00 ± 6.99	36.50 ± 6.87	48.84 ± 3.07	0.14 ± 0.38	15.29 ± 0.49
35	26.00 ± 5.16	46.00 ± 6.99	36.00 ± 6.08	47.54 ± 1.73	0.29 ± 0.49	15.14 ± 0.38
38	24.00 ± 5.16	43.00 ± 6.75	33.50 ± 5.96	45.07 ± 4.17	0.43 ± 0.53	15.29 ± 0.49
42	20.00 ± 6.67	32.00 ± 6.32	26.00 ± 6.5	39.83 ± 1.91	0.29 ± 0.49	15.57 ± 0.53
45	20.00 ± 6.67	34.00 ± 6.99	27.00 ± 6.83	40.88 ± 3.52	0.43 ± 0.53	15.57 ± 0.53
47	21.00 ± 7.38	35.00 ± 5.27	28.00 ± 6.33	35.46 ± 7.30	0.29 ± 0.49	15.29 ± 0.49
52	19.00 ± 5.68	34.00 ± 6.99	26.50 ± 6.34	28.09 ± 5.62	0.43 ± 0.53	14.86 ± 0.38
56	26.00 ± 6.99	38.00 ± 6.32	32.00 ± 6.66	27.70 ± 5.58	0.57 ± 0.53	13.86 ± 1.86
59	23.00 ± 6.75	35.00 ± 5.27	29.00 ± 6.01	26.04 ± 3.87	0.43 ± 0.53	12.43 ± 2.30
61	23.00 ± 6.75	33.00 ± 4.83	28.00 ± 5.79	25.28 ± 4.24	0.57 ± 0.53	10.71 ± 1.89

Tabla 21 Parámetros de campo en el Tratamiento D pila 1.

Tiempo (días)	Humedad a 30cm (%)	Humedad a 60cm (%)	Media Humedad (%)	Temperatura (°C)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)
4	83.30 ± 20.60	100.00 ± 0.00	91.65 ± 10.30	36.14 ± 8.92	0.80 ± 0.40	15.60 ± 0.55
8	92.86 ± 9.95	100.00 ± 0.00	96.43 ± 4.98	52.02 ± 7.51	1.17 ± 2.04	17.08 ± 1.20
10	84.62 ± 20.25	100.00 ± 0.00	92.31 ± 10.13	47.22 ± 5.65	0.50 ± 0.84	17.30 ± 0.60
12	86.15 ± 23.64	100.00 ± 0.00	93.08 ± 11.82	51.41 ± 9.55	1.17 ± 1.6	17.00 ± 1.87
16	60.00 ± 36.71	100.00 ± 0.00	80.00 ± 18.36	56.68 ± 7.85	1.34 ± 1.36	14.00 ± 2.19
17	94.11 ± 9.40	100.00 ± 0.00	97.06 ± 4.70	60.18 ± 5.89	1.34 ± 1.03	13.83 ± 2.31
19	95.79 ± 8.38	100.00 ± 0.00	97.90 ± 4.19	54.96 ± 10.72	0.50 ± 0.55	12.30 ± 2.07
22	86.11 ± 14.61	100.00 ± 0.00	93.06 ± 7.31	47.63 ± 13.17	1.50 ± 1.76	18.50 ± 1.52
24	92.78 ± 13.63	100.00 ± 0.00	96.39 ± 6.82	54.65 ± 10.01	0.67 ± 0.82	17.50 ± 1.38
26	92.23 ± 16.65	100.00 ± 0.00	96.12 ± 8.33	57.65 ± 7.79	0.50 ± 0.55	17.17 ± 1.33
29	91.67 ± 15.44	100.00 ± 0.00	95.84 ± 7.72	57.03 ± 9.89	0.50 ± 0.55	17.17 ± 1.33
31	95.29 ± 8.74	100.00 ± 0.00	97.65 ± 4.37	52.24 ± 12.97	0.00 ± 0.00	16.17 ± 1.17
33	91.25 ± 10.25	100.00 ± 0.00	95.63 ± 5.13	48.94 ± 9.5	0.00 ± 0.00	16.33 ± 1.03
36	87.27 ± 16.18	100.00 ± 0.00	93.64 ± 8.09	52.49 ± 11.57	0.40 ± 0.55	14.40 ± 0.89
38	53.85 ± 27.55	100.00 ± 0.00	76.93 ± 13.78	51.37 ± 9.92	1.50 ± 1.38	13.50 ± 1.22
40	53.08 ± 22.13	100.00 ± 0.00	76.54 ± 11.07	51.23 ± 11.26	1.00 ± 1.55	14.67 ± 0.84
43	92.31 ± 10.13	100.00 ± 0.00	96.16 ± 5.07	47.88 ± 11.53	2.08 ± 1.20	17.00 ± 1.41
47	81.54 ± 12.81	100.00 ± 0.00	90.77 ± 6.41	47.06 ± 9.56	0.33 ± 0.52	17.00 ± 1.10
50	83.08 ± 13.77	100.00 ± 0.00	91.54 ± 6.89	45.45 ± 10.3	0.33 ± 0.52	16.83 ± 1.17
52	80.00 ± 14.14	90.00 ± 17.32	85.00 ± 15.73	42.70 ± 11.97	0.50 ± 0.55	16.00 ± 1.41
55	76.92 ± 7.51	80.77 ± 18.47	78.85 ± 12.99	38.67 ± 11.98	0.00 ± 0.00	15.50 ± 0.55
58	22.00 ± 16.99	48.67 ± 43.57	35.34 ± 30.28	35.01 ± 16.92	0.33 ± 0.52	15.00 ± 0.89
60	30.00 ± 25.63	50.00 ± 42.93	40.00 ± 34.28	31.90 ± 13.51	0.33 ± 0.52	15.00 ± 0.89
62	28.46 ± 12.16	55.38 ± 33.71	41.92 ± 22.94	35.60 ± 14.5	0.17 ± 0.38	15.83 ± 6.00
65	48.46 ± 43.98	50.77 ± 10.75	49.62 ± 27.37	30.99 ± 10.75	0.33 ± 0.49	15.33 ± 5.81
67	22.31 ± 9.27	52.31 ± 10.13	37.31 ± 9.7	30.18 ± 3.90	0.15 ± 0.52	14.83 ± 0.41
72	21.54 ± 7.34	42.31 ± 12.07	31.93 ± 9.71	29.94 ± 9.73	0.17 ± 0.38	13.33 ± 5.22
74	20.38 ± 5.61	41.15 ± 11.37	30.77 ± 8.49	30.05 ± 11.27	0.50 ± 0.53	13.17 ± 4.99
76	15.38 ± 5.19	37.31 ± 8.81	26.35 ± 7.00	29.06 ± 6.18	0.67 ± 0.52	14.00 ± 0.63
79	16.15 ± 5.06	32.69 ± 7.25	24.42 ± 6.16	31.04 ± 3.77	0.50 ± 0.55	14.00 ± 0.63
81	25.38 ± 4.77	40.77 ± 5.720	33.08 ± 5.25	29.75 ± 5.21	0.67 ± 0.52	13.83 ± 0.98

Tabla 22 Parámetros de campo en el Tratamiento D pila 2.

Tiempo (días)	Humedad a 30cm (%)	Humedad a 60cm (%)	Media Humedad (%)	Temperatura (°C)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)
4	96.00 ± 11.21	100.00 ± 0.00	98.00 ± 5.61	37.51 ± 5.24	1.00 ± 0.00	15.80 ± 1.30
8	89.23 ± 19.34	100.00 ± 0.00	94.62 ± 9.67	49.59 ± 13.54	0.83 ± 0.98	17.83 ± 0.81
10	84.61 ± 21.83	100.00 ± 0.00	92.31 ± 10.92	38.95 ± 10.88	0.33 ± 0.51	17.00 ± 0.54
12	90.76 ± 19.34	100.00 ± 0.00	95.38 ± 9.67	51.08 ± 11.82	0.00 ± 0.00	17.00 ± 0.81
16	36.47 ± 24.47	94.11 ± 16.97	65.29 ± 20.72	51.75 ± 9.70	1.07 ± 0.81	15.50 ± 2.05
17	82.94 ± 16.86	100.00 ± 0.00	91.47 ± 8.43	56.02 ± 11.33	1.00 ± 1.09	12.00 ± 2.19
19	96.84 ± 7.49	100.00 ± 0.00	98.42 ± 3.75	58.64 ± 9.16	1.00 ± 1.09	10.33 ± 2.06
22	66.11 ± 25.46	100.00 ± 0.00	83.06 ± 12.73	47.84 ± 13.38	1.66 ± 2.42	18.00 ± 1.89
24	86.87 ± 15.79	100.00 ± 0.00	93.44 ± 7.90	51.08 ± 11.53	1.00 ± 1.41	17.80 ± 1.64
26	92.50 ± 14.37	100.00 ± 0.00	96.25 ± 7.19	49.85 ± 9.12	0.40 ± 0.89	15.60 ± 3.2
29	90.62 ± 17.69	100.00 ± 0.00	95.31 ± 8.85	51.06 ± 10.91	1.00 ± 1.73	14.20 ± 1.09
31	89.41 ± 14.35	100.00 ± 0.00	94.71 ± 7.18	50.28 ± 9.59	0.00 ± 0.00	15.50 ± 0.55
33	83.75 ± 13.10	100.00 ± 0.00	91.88 ± 6.55	46.79 ± 11.93	0.00 ± 0.00	15.17 ± 0.75
36	83.64 ± 19.12	98.18 ± 6.03	90.91 ± 12.58	42.79 ± 12.81	1.08 ± 1.11	15.17 ± 0.41
38	50.77 ± 27.53	100.00 ± 0.00	75.39 ± 13.77	56.41 ± 6.76	0.83 ± 0.75	13.67 ± 1.21
40	50.77 ± 26.29	100.00 ± 0.00	75.39 ± 13.15	55.95 ± 8.01	0.50 ± 0.55	14.50 ± 0.84
43	84.29 ± 11.58	100.00 ± 0.00	92.15 ± 5.79	47.15 ± 12.60	1.83 ± 1.33	16.67 ± 1.03
47	88.00 ± 13.77	100.00 ± 0.00	94.00 ± 6.89	43.46 ± 6.57	0.17 ± 0.41	16.50 ± 1.22
50	83.08 ± 13.77	100.00 ± 0.00	91.54 ± 6.89	40.57 ± 8.85	0.33 ± 0.52	16.33 ± 1.03
52	83.08 ± 13.77	100.00 ± 0.00	91.54 ± 6.89	43.46 ± 6.57	0.17 ± 0.41	16.50 ± 1.22
55	73.85 ± 7.51	80.77 ± 18.47	77.31 ± 12.99	38.43 ± 7.14	0.00 ± 0.00	15.83 ± 0.75
58	22.00 ± 21.78	55.33 ± 41.21	38.67 ± 31.50	35.16 ± 12.62	0.33 ± 0.52	15.33 ± 0.82
60	23.33 ± 20.59	58.00 ± 38.58	40.67 ± 29.59	32.88 ± 9.82	0.50 ± 0.55	15.00 ± 0.89
62	28.46 ± 16.46	66.15 ± 40.16	47.31 ± 28.31	34.93 ± 10.56	0.33 ± 0.49	15.83 ± 6.00
65	27.69 ± 34.35	39.23 ± 36.71	33.46 ± 35.53	33.29 ± 13.49	0.33 ± 0.49	15.17 ± 5.74
67	26.92 ± 10.19	48.08 ± 18.24	37.50 ± 14.22	30.27 ± 10.32	0.17 ± 0.38	14.17 ± 5.37
72	22.69 ± 7.89	43.08 ± 13.01	32.89 ± 10.45	30.11 ± 8.88	0.67 ± 0.53	13.17 ± 5.19
74	16.92 ± 6.46	35.38 ± 12.82	26.15 ± 9.64	29.48 ± 9.53	0.83 ± 0.49	13.83 ± 5.24
76	15.77 ± 5.72	34.23 ± 9.54	25.00 ± 7.63	31.11 ± 4.14	0.83 ± 0.41	13.83 ± 0.75
79	15.00 ± 6.45	28.08 ± 14.07	21.54 ± 10.26	29.21 ± 5.17	0.50 ± 0.55	14.00 ± 0.63
81	21.54 ± 3.15	34.62 ± 7.49	28.08 ± 5.32	30.74 ± 5.78	0.50 ± 0.55	14.00 ± 0.63

Tabla 23 Parámetros de campo en el Tratamiento E pila 1.

Tiempo (días)	Humedad a 30cm (%)	Humedad a 60cm (%)	Media Humedad (%)	Temperatura (°C)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)
17	82.94 ± 16.86	100.00 ± 0.00	91.47 ± 8.43	56.03 ± 11.34	1.00 ± 1.10	12.00 ± 2.19
19	96.66 ± 10.28	100.00 ± 0.00	98.33 ± 5.14	60.14 ± 7.21	2.00 ± 1.26	3.83 ± 1.47
22	95.00 ± 15.81	98.00 ± 6.32	96.50 ± 11.07	49.92 ± 9.32	3.50 ± 2.17	12.67 ± 1.97
24	92.14 ± 16.72	100.00 ± 0.00	96.07 ± 8.36	57.88 ± 8.65	1.00 ± 0.89	12.50 ± 2.43
26	90.00 ± 18.39	100.00 ± 0.00	95.00 ± 9.20	56.28 ± 11.13	1.00 ± 0.89	10.67 ± 1.03
29	97.14 ± 7.26	100.00 ± 0.00	98.57 ± 3.63	57.99 ± 9.49	0.00 ± 0.00	5.50 ± 1.64
31	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	55.15 ± 9.50	0.60 ± 0.89	5.00 ± 1.73
33	87.06 ± 14.04	100.00 ± 0.00	93.53 ± 7.02	51.88 ± 9.48	0.17 ± 0.41	4.00 ± 0.89
36	81.00 ± 16.63	98.00 ± 6.32	89.50 ± 11.48	45.89 ± 11.53	0.17 ± 0.41	4.33 ± 0.52
38	41.00 ± 11.01	100.00 ± 0.00	70.50 ± 5.51	56.92 ± 10.17	0.33 ± 0.52	3.50 ± 0.55
40	40.00 ± 12.47	100.00 ± 0.00	70.00 ± 6.24	55.00 ± 10.47	0.50 ± 0.55	4.17 ± 0.98
43	81.54 ± 12.81	100.00 ± 0.00	90.77 ± 6.41	50.52 ± 12.75	1.67 ± 0.52	10.67 ± 1.63
47	88.00 ± 13.98	100.00 ± 0.00	94.00 ± 6.99	55.66 ± 4.55	0.17 ± 0.41	7.00 ± 1.10
50	84.00 ± 12.65	96.00 ± 8.43	90.00 ± 10.54	47.83 ± 9.54	0.33 ± 0.52	8.67 ± 1.51
52	48.00 ± 23.00	82.00 ± 23.94	65.00 ± 23.47	42.91 ± 15.54	0.00 ± 0.00	7.83 ± 1.83
55	54.00 ± 11.74	70.00 ± 17.00	62.00 ± 14.37	37.13 ± 12.49	0.17 ± 0.41	8.17 ± 2.23
60	34.00 ± 27.57	68.00 ± 41.58	51.00 ± 34.58	51.56 ± 6.72	0.17 ± 0.41	7.33 ± 1.97
62	38.00 ± 11.35	94.00 ± 13.50	66.00 ± 12.43	49.96 ± 11.39	0.50 ± 0.84	7.67 ± 0.82
65	20.00 ± 28.28	56.00 ± 46.48	38.00 ± 37.38	34.26 ± 8.30	0.67 ± 0.52	8.67 ± 1.03
67	37.00 ± 12.52	66.00 ± 44.02	51.50 ± 28.27	34.30 ± 11.22	0.33 ± 0.49	8.33 ± 0.82
72	26.50 ± 4.74	56.50 ± 24.27	41.50 ± 14.51	36.20 ± 4.55	0.67 ± 0.52	7.67 ± 0.82
74	31.00 ± 3.94	53.50 ± 15.28	42.25 ± 9.61	38.95 ± 8.58	0.83 ± 0.41	7.67 ± 0.82
76	31.67 ± 3.54	55.56 ± 6.82	43.62 ± 5.18	39.23 ± 5.19	0.83 ± 0.41	7.33 ± 1.03
79	33.00 ± 7.89	52.50 ± 23.48	42.75 ± 15.69	40.50 ± 5.32	0.83 ± 0.41	7.83 ± 0.98
81	41.50 ± 10.29	52.50 ± 7.55	47.00 ± 8.92	40.53 ± 5.27	0.67 ± 0.52	7.33 ± 1.63

Tabla 24 Parámetros de campo en el Tratamiento E pila 2.

Tiempo (días)	Humedad a 30cm (%)	Humedad a 60cm (%)	Media Humedad (%)	Temperatura (°C)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)
17	96.00 ± 8.21	96.00 ± 8.21	96.00 ± 8.21	61.30 ± 5.88	0.60 ± 0.58	4.60 ± 4.16
19	95.29 ± 7.49	60.00 ± 0.00	77.65 ± 3.75	62.23 ± 5.32	4.75 ± 4.82	11.00 ± 5.10
22	92.00 ± 10.33	100.00 ± 0.00	96.00 ± 5.16	52.36 ± 10.20	2.00 ± 2.19	14.67 ± 1.37
24	87.69 ± 30.04	100.00 ± 0.00	93.85 ± 15.02	54.81 ± 10.67	1.50 ± 1.22	13.00 ± 1.26
26	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	55.68 ± 10.73	1.17 ± 0.98	12.00 ± 3.35
29	96.92 ± 7.51	100.00 ± 0.00	98.46 ± 3.76	57.12 ± 9.12	0.33 ± 0.82	4.33 ± 0.52
31	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00	53.82 ± 9.81	1.20 ± 1.64	5.80 ± 1.30
33	93.75 ± 9.57	100.00 ± 0.00	96.88 ± 4.79	55.53 ± 7.61	0.25 ± 0.61	4.17 ± 0.41
36	96.00 ± 8.43	100.00 ± 0.00	98.00 ± 4.22	51.75 ± 11.71	0.83 ± 1.17	4.00 ± 0.00
38	50.00 ± 24.94	100.00 ± 0.00	75.00 ± 12.47	58.33 ± 6.25	0.50 ± 0.55	3.50 ± 0.55
40	50.00 ± 27.08	100.00 ± 0.00	75.00 ± 13.54	58.72 ± 7.13	0.67 ± 0.52	4.17 ± 0.98
43	83.08 ± 13.77	100.00 ± 0.00	91.54 ± 6.89	52.47 ± 10.52	2.17 ± 0.98	12.20 ± 0.45
47	74.00 ± 9.66	100.00 ± 0.00	87.00 ± 4.83	47.73 ± 9.54	0.33 ± 0.52	5.33 ± 1.37
50	78.00 ± 14.76	92.00 ± 13.98	85.00 ± 14.37	47.13 ± 9.93	0.50 ± 0.55	9.00 ± 1.10
52	52.00 ± 22.51	98.00 ± 6.32	75.00 ± 14.42	39.19 ± 9.31	0.33 ± 0.52	8.67 ± 2.50
55	54.00 ± 20.11	72.00 ± 10.33	63.00 ± 15.22	37.95 ± 9.37	0.17 ± 0.41	9.00 ± 3.35
58	29.00 ± 13.70	67.30 ± 31.30	48.15 ± 22.50	55.94 ± 22.44	0.17 ± 0.41	7.83 ± 1.60
60	38.00 ± 11.35	94.00 ± 13.50	66.00 ± 12.43	49.96 ± 11.39	0.50 ± 0.84	7.67 ± 0.82
62	60.00 ± 18.86	96.00 ± 12.65	78.00 ± 15.76	50.50 ± 11.37	0.33 ± 0.52	7.33 ± 2.07
65	31.00 ± 36.65	56.00 ± 46.48	43.50 ± 41.57	34.26 ± 8.30	0.33 ± 0.52	8.67 ± 1.03
67	28.00 ± 6.32	60.00 ± 29.06	44.00 ± 17.69	36.89 ± 6.65	0.20 ± 0.45	8.40 ± 1.67
72	29.00 ± 2.11	53.50 ± 24.73	41.25 ± 13.42	39.37 ± 6.84	0.50 ± 0.55	8.33 ± 0.82
74	31.50 ± 4.74	52.50 ± 12.30	42.00 ± 8.52	39.22 ± 5.32	0.83 ± 0.41	7.67 ± 0.82
76	31.50 ± 2.42	52.50 ± 13.59	42.00 ± 8.01	41.94 ± 5.11	0.67 ± 0.52	7.67 ± 0.82
79	34.50 ± 8.64	52.50 ± 14.77	43.50 ± 11.71	40.83 ± 4.33	0.67 ± 0.52	7.67 ± 1.97
81	39.50 ± 1.58	46.00 ± 6.58	42.75 ± 4.08	43.92 ± 2.92	0.67 ± 0.52	7.67 ± 0.82

# **ANEXO 2**

## **PRODUCTOS DERIVADOS DEL PROYECTO**



**US Composting Council®**

*The Magic of Compost!*  
**21st Annual Conference and Tradeshow**  
 Buena Vista Palace Hotel and Spa  
 January 28-31, 2013 | Orlando, FL

## **USCC 21<sup>st</sup> Annual Conference**

**The Largest Conference and Exhibition in North America for the Composting, Wood Waste, & Organics Recycling Industry**

**TO REGISTER: [HTTP://WWW.COMPOSTINGCOUNCIL.ORG/CONFERENCE](http://www.compostingcouncil.org/conference)**

**[Click here to see full schedule "at a glance"](#)**

### **Sunday, January 27 -- Special Preconference Event!**

**8:00 AM USCC 1ST ANNUAL CONFERENCE GOLF OUTING AND BENEFIT [CLICK FOR MORE DETAILS](#) HAWK'S LANDING GOLF CLUB AT THE ORLANDO WORLD CENTER MARRIOTT**

### **Monday, January 28**

#### **PRE-CONFERENCE TRAINING COURSES & WORKSHOPS ([FOR DETAILS CLICK HERE](#))**

8:00 am – 5:00 pm	Foundations of Composting <i>Instructors: Dr. Robert Rynk and Matthew Cotton</i>
8:00 am – 5:00 pm	Compost Use in Agriculture, Horticulture and Landscaping <i>Instructor: Dr. Monica Ozores-Hampton and Dr. Donald Rockwood</i>
8:30 am – 4:00 pm	Aerated Static Pile Composting – Applications and Advancements <i>Instructor: Peter Moon, PE</i>
8:30 am – 4:00 pm	Compost Business Management <i>Instructors: Craig Coker, David Hill and guests</i>
8:00 am – noon	Compost Marketers Toolkit <i>Instructor: Ron Alexander</i>
8:30 am – noon	The In-depth Food Waste Recycling Workshop for the Restaurant and Supermarket Industries: The Keys to Success for the Generator and Hauler <i>Instructor: Mike Manna</i>
8:30 am – noon	Compost Outreach: Best Practices in Compost Education Programs <i>Instructor: Stan Slaughter</i>
1:00 pm – 4:30 pm	What's in YOUR Compost? How to Know and What to Put on Your Label <i>Instructor: Ron Alexander</i>
1:00 pm – 5:00 pm	Zero Waste and Organics Collection Training for Special Event Coordinators: Planning and Implementation <i>Instructor: Peter Klaich</i>
1:00 pm – 5:00 pm	Odor Control and Process Management: Focus on Food Wastes <i>Instructor: Jeff Gage</i>
1:00 pm – 5:00 pm	Vermicomposting Food Residuals at Restaurants, Businesses and Institutions <i>Instructor: Rhonda Sherman</i>
noon – 1:00 pm	Lunch for those taking a full day of classes

#### **PRE-CONFERENCE TOURS (BUSES LEAVE FROM BUENA VISTA PALACE-- [FOR DETAILS CLICK HERE](#) )**

<b>9:30 am – 4:30 pm</b>	<b>Tour of Local Composting Facilities</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• C &amp; C Peat Windrow Composting and Potting Soil Production</li> <li>• Vista Park In-vessel Composting of Mixed Organics, operated by Waste Management</li> <li>• Lunch is included, sponsored by Publix Markets</li> </ul>
<b>1:00 PM - 4:30 PM</b>	<b>Disney Institute's "Business Behind the Magic" Behind-the-Scenes</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Walt Disney World® Resort Nursery and Tree Farm</li> <li>• The "Utilidor" System</li> <li>• Epcot® Cast Services</li> <li>• Textile Services</li> </ul>
<b>11:00 am – 7:00 pm</b>	<b>Exhibitor Registration &amp; Set Up</b>

## CONCURRENT SESSION 2 (contunued)

**2:00 PM – 3:30 PM**

**UPDATE ON PERSISTENT HERBICIDES**

**GREAT HALL EAST/WEST**

*Moderator: Ginny Black, Minnesota Pollution Control Agency*

- Persistent Herbicide Damage in Vermont *Tom Moreau and Dan Goosen, Chittenden Solid Waste District (CSWD), Williston, VT*
- Recent Research Results, *Fred Michel, Ohio State University, Wooster, OH*
- Discussion, USCC Response and Strategy

**2:15 PM – 3:45 PM**

**URBAN AND COLLEGE COMPOSTING**

**KIIGHTS HALL**

*Moderator: Robert Rynk, SUNY Cobleskill*

- Composting in a Big Apple High Rise *Michael Bryan-Brown, Green Mountain Technologies, Bainbridge Island, WA*
- The Business of Organics Recycling in Dense Urban Centers: Updates and Case Studies from New York City *Matt de la Houssaye, Global Green USA, New York, NY*
- SSO Composting at St. John's University *Peter Moon, O2Compost, Snohomish, WA*
- The Goshen College Composter - Food Waste to Garden Greens *Lewis Naylor, Goshen College, Goshen IN*

**2:15 PM – 3:45 PM**

**COMPOSTING EDUCATION**

**CLOISTER**

*Moderator: Michele Young, City of San Jose*

- Composting as Co-Curricula Activity for Secondary Schools: The Nigerian Experience *George Oladele Opeolu, Osun State College Of Technology, Esa Oke, Nigeria*
- Closing the Loop While Building Communities - The Value of Connecting Organic Recycling and Compost with Schools and Community Gardens *Anne Ludvik and Rob Friend, Specialized Environmental Technologies, Inc., Eden Prairie, MI*
- Green School Solutions: Innovative School Composting Program *Jason Sanders, Texas Disposal Systems, Buda, TX*
- Austin Home Composting Rebate Program *Daniela Ochoa Gonzalez, SOLURSO Sustainable Urban Solutions, Austin, TX*

## BREAK WITH EXHIBITORS IN EVENT CENTER

## CONCURRENT SESSION 3

**4:15 PM – 5:45 PM**

**MUNICIPAL PLANNING AND COMPOSTING**

**GREAT HALL CENTER**

*Moderator: Brain Fleury, WeCare Organics*

- The Challenges of Composting in Rockbridge County in Southwestern Virginia: Bringing County, City, and Institutional Stakeholders to the Table. *Bill Hamilton, Washington and Lee University, Lexington, VA*
- The City of Dallas - Critical Importance of Composting in Reaching Long-term Resource Recovery Goals *Risa Weinberger, Risa Weinberger & Associates, Inc., Dallas, TX*
- Bordo Poniente Composting Facility in Mexico City: 2,500 ton/day of Feedstock Producing 500 ton/day of Compost *Luis Raúl Tovar, Francisco Javier Barrón, Ma. Eugenia Gutiérrez, and María Teresa Nuñez, National Polytechnic Institute, Mexico City, Mexico*

**4:15 PM – 5:45 PM**

**TOOLS OF THE TRADE**

**GREAT HALL EAST/WEST**

Jeff Gage of Compost Design Services will lead an informative interactive workshop on getting the most out of new and common tools of the industry. The emphasis will be on tools to help monitor various aspects of the process, including proper techniques for sampling your piles.

**4:30 PM – 6:00 PM**

**COMPOSTER AS COLLECTOR**

**KNIGHTS HALL**

*Moderator: Matt Cotton, IWM Consulting*

*Panel of composters discuss the advantages and pitfalls of being their own hauler. Panelists will include:*

- George Jordan, AgRecycle, Pittsburgh, PA
- Amy Brooks, Brooks Contracting, Goldston, NC
- Chuck Wilson, A-1 Organics, Eaton, CO
- Everett Hoffman, Bootstrap Compost, Boston, MA

**4:30 PM – 6:00 PM**

**RECENT RESEARCH IN COMPOST USES**

**CLOISTER**

*Moderator: Frank Franciosi, Novozymes*

- Nutrient Budget for Fruit and Vegetables Based on Compost and Inorganic Fertilizer *Monica Ozores-Hampton, University of Florida/Southwest Florida Research and Education Center. Immokalee, FL*
- Turfgrass Seeding Practices for Reclaiming Disturbed Urban Land with Compost *Gregory Evanylo, Virginia Tech, Blacksburg, VA*
- Use of Composted Wastes of the Tequila Industry as Growing Media for Blue Agave Tequila *Marcos Rafael Crespo-Gonzalez, University of Guadalajara, Guadalajara, Mexico*
- Water Productivity Under Different Puddling Intensities and Organic Amendments in SR I Method of Rice Establishment *Veena Sharma, SKUAST-Jammu, Jammu, India*

**6:00 PM – 8:00 PM**

**EXHIBITORS RECEPTION**

**EVENT CENTER**

## **Bordo Poniente Composting Facility in Mexico City: 2,500 ton/day of Feedstock Producing 500 ton/day of Compost.**

*Luis Raúl Tovar, Ph.D., Francisco Javier Barrón, Ma. Eugenia Gutiérrez, Ph.D. and Ma. Teresa Núñez, Ph.D.<sup>1</sup>*

*Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto Politécnico Nacional, México D.F. 07340*

*<sup>1</sup>Autonomous Metropolitan University-Xochimilco, 04960 Mexico City*

### **ABSTRACT**

This paper details work undertaken during three months at the Bordo Poniente Composting Plant (PCBP) located northeast of Mexico City, 2,230 m above sea level, over a lacustrine zone constituted by soft and highly compressible soils in the Texcoco Lake. It is surrounded by wastewater drainage infrastructure that permanently discharges rain and untreated municipal effluents specifically from an open canal known as “Canal de la Compañía” and the right and left arms of the confined Churubusco River. The PCBP was built in 2001 then by 2004 to 2006 processed about 60 ton/day of food scraps and yard trimmings from city parks and gardens.

Mexico City, including some counties from neighboring states, generates about 12,500 ton/day of municipal solid waste (MSW), 44% of it corresponds to food scraps and yard trimmings. Since the only landfill available to the City, called Bordo Poniente Stage IV (BPIV), with an area of 375 ha, concluded its useful life at the end of 2011 after a final disposition of approximately 70 million tons of MSW, this closure urged the City to implant a separation at the source program that was started in March of 2011. The PCBP location is next to the BPIV.

Since the landfills nearby Mexico City are much farther away than BPIV, the transportation cost of waste to these sites is almost double and tipping fees to these sites are higher than what the City paid to BPIV, this made the capacity of the PCBP to be increased, new equipment was purchased and nowadays the PCBP is processing 2,500 ton/day of food scraps and yard trimmings in an area of 30.24 ha yielding 500 ton/day of compost.

We sampled the feedstock and product at windrows 10, 20 and 30 days of age as well as the mature compost. Windrows were turned once every two weeks. Physical, organic and biological as well as chemical parameters were carried out. ICP of all the samples and elemental analysis of the feedstock and the final product were run by duplicate the former and by triplicate the latter. Solvita® Compost Maturity Test kit was used to measure stability and maturity of the final product. Pathogens were determined in samples of compost from two different collection dates.

All parameters were within the California Compost Quality Council standards. But the C/N ratio both of the feedstock and the mature compost, were 13.1 and 15.9, respectively. This was due to erratic mixing of food scraps and yard trimmings at the beginning of the process because of the huge amount of organics that reached the facility every day.

So far the separation at the source program is operating properly, although the citizens are not aware of the benefits of the City making compost.

## INTRODUCTION

This paper describes work undertaken during three months precisely from February till May of 2012 at the Bordo Poniente Composting Plant (PCBP) evaluating the quality of the compost and the process to produce it from the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) generated in Mexico City. The PCBP is located northeast of Mexico City, 2,230 m above sea level, over a lacustrine zone constituted by soft and highly compressible soils in the Texcoco Lake next to the only landfill that the City had until December 2011, Bordo Poniente stage IV (BPIV). It is surrounded by wastewater drainage infrastructure that permanently discharges rain and untreated municipal effluents specifically from an open canal known as “Canal de la Compañía” and the right and left arms of the confined Churubusco River. The PCBP was built in 2001 then by 2004 to 2006 processed about 60 ton/day of food scraps and yard trimmings from city parks and gardens.

Figure 1 shows the PCBP in 2001, at the rear is a material recovery facility (MRF) called Bordo Poniente, Mexico City has two more MRF’s one called San Juan de Aragón and the other one Santa Catarina, the three together can handle 6,500 ton/day of MSW.



Figure 1. The composting facility of Bordo Poniente in 2001.

On April 2003 the Official Gazette of Mexico City published the Law of Municipal Solid Waste which in its article 61 indicates that the Ministry of Works and Services will design, build, operate and maintain composting facilities to process the organic fraction of municipal solid wastes (OFMSW). This goes along with the Program on the Management of MSW and the Program to keep the City clean, the latter depends on the Ministry of Works and Services. From 2004 to 2010 the PCBP processed 60 ton/day of OFMSW.

In an agreement signed between the government of the City and the federal government, in November 2010, the BPIV landfill where the City disposed 12,600 ton /day of MSW that had to be closed by December 2011, after 16 years in operation, since already about 70 million tons of waste were buried there. In order to accomplish this agreement from the end of 2010 the amount of waste disposed at BPIV had to be gradually reduced so one of the strategies followed by the Ministry of Works and Services was to ask the citizens to sort at

the source therefore for the first time in Mexico City, since March 2011, the MSW was collected separately. Thus on Tuesday, Thursday and Saturday the collecting vehicles received only food scraps and yard trimmings whereas on Monday, Wednesday, Friday and Sunday the other items, mostly non-biodegradable, were collected.

Due to the fact that the OFMSW can circumvent land disposal and undergo anaerobic digestion or composting. The latter has been in practice even before Roman times, and the method has since been streamlined in terms of efficiency, time of completion, health impacts and area requirements. We recovered a definition of composting from the USDA (1980) that states: "An ancient practice whereby farmers convert organic waste into useful organic soil amendments that provide nutrients to crops and enhance the tilth, fertility, and productivity of soils".

Then in 2011 the PCBP expanded and processed 1,650 ton/day of OFMSW and in 2012, after the BPIV closure, the PCBP receives 2,500 ton/day of the OFMSW. The area of the PCBP is 30.24 ha.

Figure 2 shows what the PCBP looks like in 2012.



Figure 2. The PCBP in 2012, a compost turner is shown on the right and windrows on the background.

The purpose of this study was to evaluate the quality of the compost produced as well as the process used in the PCBP.

#### MATERIALS AND METHODS

Sampling took place on May the 3rd of 2012, from 9:00 AM till 1:00 PM. We sampled the feedstock that just arrived to the PCBP and took subsamples at windrows where the

material being composted was 10, 20, and 30 days old, respectively as well as compost at the end of the maturation stage (TMECC, 2000). Five subsamples of the feedstock were taken at random after grinding and compost was taken from a maturation pile at five locations. The subsamples were thoroughly mixed to make one sample of the feedstock and another one of the compost. We took 15 subsamples in 5 points of the windrows at 10, 20 and 30 days of age therefore 5 samples of each windrow were taken. Samples were stored in zip-lock polyethylene bags and kept at 4°C till reaching the laboratory. For microbiological analysis of compost samples were collected in sterile plastic containers, kept at 4°C and analyzed no more than 24 hr later. We carried out a second sampling campaign on the 21<sup>st</sup> of May of 2012 to repeat microbiological analysis and to run tests of stability and maturity (Solvita®, Changa et al., 2003).

The parameters measured on each sample were: pH, conductivity, total solids, moisture, apparent density, organic matter, organic carbon, total nitrogen, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N and ultimate analysis (C, H, O, N). By ICP-OES we measured Mg, Ca, K, Na, Fe, As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sb, Se, Sr, Ti, V and Zn.

Maturity and stability were only measured in the compost as well as fecal coliforms and Salmonella sp.

Duplicate measurements of each parameter were carried out.

## RESULTS

Table 1 Physicochemical characteristics of feedstock, process and finished product of PCBP

<i>Parameter</i>	<i>Units</i>	<i>OFMSW Feedstock</i>	<i>Process</i>			<i>Finished product</i>
			<i>10 days</i>	<i>20 days</i>	<i>30 days</i>	
pH	pH units	7 ± 0.06	5.3 ± 0.05	5.1 ± 0.4	5.2 ± 0.4	5.6 ± 0.05
Electric conductivity	dS/m or mmhos/cm	10.5 ± 0.8	10.6 ± 0.9	10.2 ± 2.0	12.2 ± 1.8	12.3 ± 1.0
Total Solids	% dry weight	44 ± 2.3	44.8 ± 7.3	42.9 ± 6.3	42.0 ± 5.4	74.8 ± 0.1
Humidity	%	55.9 ± 2.3	55.2 ± 7.3	57.0 ± 6.3	57.9 ± 5.4	25.2 ± 0.1
Bulk density	kg /m <sup>3</sup>	282 ± 13	154.7 ± 32	141.4 ± 46	143.8 ± 33	166 ± 1.3
Organic matter	% dry weight	43.5 ± 0.5	30.3 ± 6.5	34.8 ± 10.3	36.9 ± 12.5	44.9 ± 1.6
Organic carbon	% dry weight	24.2 ± 0.3	16.81 ± 3.6	19.34 ± 5.7	20.5 ± 6.9	25 ± 0.3
Total nitrogen	% dry weight	1.85 ± 0.02	2.16 ± 0.25	1.57 ± 0.15	1.43 ± 0.14	1.57 ± 0.02
C/N ratio		13.08	7.78	12.32	14.34	15.92
Ammoniacal nitrogen (NH <sub>4</sub> -N)	mg/kg dry weight	1.9 ± 0.15	1.9 ± 0.4	2.0 ± 0.6	2.8 ± 0.3	3.6 ± 0.1
Nitric nitrogen (NO <sub>3</sub> -N)	mg/kg dry weight	0.24 ± 0.05	0.12 ± 0.07	0.1 ± 0.07	0.13 ± 0.07	0.3 ± 0.05
Elemental Analysis C N H	% dry weight	29.69 ± 1.66	not determined			29.04 ± 0.73
		1.87 ± 0.01				2.16 ± 0.06
		4.42 ± 0.14				3.73 ± 0.1
Mg	%	0.35-0.36	0.18-0.37	0.14-0.46	0.18-0.33	0.28-0.40
Ca		2.12-2.2	1.6-2.8	1.3-2.3	1.7-2.2	2.1-2.7
K		0.69-0.73	0.53-0.80	0.52-0.8	0.59-0.87	0.68-0.77

<i>Parameter</i>	<i>Units</i>	<i>OFMSW Feedstock</i>	<i>Process</i>			<i>Finished product</i>
			<i>10 days</i>	<i>20 days</i>	<i>30 days</i>	
Na		0.17-0.18	0.13-0.24	0.14-0.20	0.12-0.21	0.18-0.21
Fe		0.37-0.50	0.26-0.49	0.15-0.52	0.16-0.57	0.48-0.55
P		0.285	0.21-0.80	0.18-0.37	0.20-0.36	0.33-0.40
As	ppm (mg/kg dry weight)	N.D.	2.94-3.18	2.05-3.95	1.13-4.15	1.68
Be		N.D.	N.D.	N.D.	0.16	N.D.
Cd		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Co		N.D.	1.5-2.2	1.05-3.93	1.02-2.65	2.90
Cr*		N.D.	2.07-2.91	1.51-5.06	1.36-7.07	7.08
Cu*		3.10-4.30	2.86-25.71	7.48-34.71	0.12-92.49	23.13-55.89
Hg*		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Mn		77.34	51.09-133.42	29.89-126.70	32.35-159.38	82.71-144.04
Mo		15.67	6.19-8.66	6.07-7.91	5.38-37.35	6.63
Ni		N.D.	5.16-8.5	1.87-16.47	4.34-11.58	10.28
Pb		N.D.	19.86-20.46	9.65-23.53	15.21-50.05	22.03-67.40
Sb		N.D.	N.D.	5.11	N.D.	5.60
Se		N.D.	3.12-5.74	2.94-4.96	0.95-5.84	4.45
Sr*		62.55-70.81	31.46-77.52	33.61-92.30	53.0-84.09	64.07-104.87
V		N.D.	N.D.	10.86-15.46	10.48-16.33	16.84
Ti*		71.32-95.02	22.50-94.33	31.59-155.83	31.65-106.47	74.97-112.48
Zn*		44.28-120.19	29.84-104.32	6.28-103.73	20.97-87.83	89.90-124.11

N.D. Not detected.

\* Interval data

Table 2

<i>Parameter</i>	<i>Units</i>	<i>Finished product</i>	
		Sample 1	Sample 2
Stability	Stability index	7	7
Maturity	1. Maturity index	7	7
	2. Anaerobic conditions and pH $\geq$ 6.5	6.54 $\pm$ 0.01	7.59 $\pm$ 0.19
	3. Germination index %	60	83.3
Fecal coliforms	NMP/ g TS	N.D.	
<i>Salmonella</i> and <i>Shigella</i>	NMP/ 4 g TS	N.D.	

The monthly amounts of the OFMSW and yard trimmings received in the PCBP from January 2011 to April 2012 are shown in Figure 3.

Figure 3. Food scraps (RED) and yard trimmings (GREEN) received at the PCBP in 2011 and four months of 2012.

The trapezoidal windrows were 436 m long; the base was 5.1 m and the top 1 m long with a height 2.95 m. Each day 4.5 windrows are made for about 2,500 ton of feedstock received at the PCBP.

On the other hand, the composition of the MSW in 2008 to 2009 that arrived to the thirteen transfer stations that are located in Mexico City is shown in Table 3.

**Table 3. Composition, generation and percentages of the several categories of waste that arrived at the transfer stations in Mexico City in 2008 and 2009**

<i>Category</i>	<i>Total from 13 TS</i> <i>tons/day</i>	<i>% of each Category</i>	<i>Mean±SD</i> <i>without waste</i> <i>from CEDA</i>
Cotton	33.16	0.3	
Flat cardboard	338.49	3.09	3.5±0.83 <sup>a</sup>

Corrugated cardboard	303.4	2.77	2.56±1.47 <sup>a</sup>
Other cardboards	54.39	0.5	
Laminated cardboard with/without aluminum	165	1.51	1.87±0.84 <sup>a</sup>
Leather	36.42	0.33	
Fine rubble	293.24	2.68	2.91±1.56 <sup>a</sup>
Gross residue	187.55	1.71	1.78±0.97 <sup>a</sup>
Hard plant fibre	54.36	0.5	
Synthetic fibre	54.1	0.49	
Bone	77.25	0.70	0.87±0.45 <sup>a</sup>
Car tires	52.8	0.48	
Van tires	6.51	0.06	
Bus tires	40.84	0.37	
Other rubbers	18.51	0.17	
Aluminum can	29.71	0.27	0.30±0.24 <sup>a</sup>
Tin can	159.8	1.46	1.61±0.4 <sup>a</sup>
Clayware and other ceramics	57.63	0.53	
Wood	214	1.95	1.63±1.52 <sup>a</sup>
Construction and demolition debris	191.63	1.75	
Ferrous material	40.69	0.37	
Aluminum	8.21	0.075	
Bronze	3.01	0.027	
Copper	2.48	0.023	
Electric batteries	7.67	0.07	
Stainless steel	2.3	0.021	
Writing paper	229.55	2.09	2.31±1.05 <sup>a</sup>
Newspaper	183.8	1.68	1.60±0.51 <sup>a</sup>
Magazine	68.56	0.62	

Toilet paper	736.02	6.72	7.40±2.02 <sup>a</sup>
Diapers, menstrual pads	310.17	2.83	3.17±1.13 <sup>a</sup>
PET (Polyethylene–terephthalate)	306.46	2.80	3.13±0.8 <sup>a</sup>
HDPE (High density polyethylene)	319.64	2.92	3.4±0.97 <sup>a</sup>
PVC (Polyvinyl chloride)	16	0.15	
LDPE (Low density polyethylene)	595.81	5.44	5.34±2.52 <sup>a</sup>
PP (Polypropylene)	101.37	0.92	
PS (Polystyrene)	107.62	0.98	
Food scrap	3821.87	34.87	30.80±4.3 <sup>a</sup>
Yard trimmings	1006.44	9.18	9.15±7.0 <sup>b</sup>
Fabrics	322.03	2.94	3.27±1.44 <sup>a</sup>
Clear glass	190.45	1.74	
Color glass	81.13	0.74	
Tennis shoes	22.16	0.2	
Shoes	47.76	0.44	
Glass fiber	47.11	0.43	
Electronic waste	12.01	0.11	
Total en ET's	10,959.11 <sup>d</sup>	100	

<sup>a</sup>Mean and SD of the percentages of the categories in each TS, without the % at the CEDA TS (Wholesale Central Market), with a coefficient of variation less or equal to 50%

<sup>b</sup>Includes the CEDA TS

Source: Orta et al. (2013, in press)

## DISCUSSION

Results from the various analyses of all the samples will be shown and discussed at the meeting. Food scrap and yard trimmings make about 4,828.31 ton/day or 44.05% which means that 2,328 ton/day of the OFMSW are disposed in landfills in the state of Mexico, a new composting facility or several anaerobic digesters would reduce substantially greenhouse gas emissions.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Ministry of Works and Services, Government of Mexico City. LRT and MEG are research fellows of the Commission for the Promotion of Academic Activities, an organization that belongs to the National Polytechnic Institute.

## REFERENCES

Changa, C.M., Wang, P., Watson, M.E., Hoitink, H.A.J. and Michel Jr, F.C. (2003). Assessment of the Reliability of a Commercial Maturity Test Kit for Composted Manures, *Compost Science & Utilization*, 11(2), 127-145.

Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal. Última reforma publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal, 23 de diciembre de 2010.

Orta-Ledesma M.T.; Saucedo-Castañeda, G.; Tovar-Gálvez, L.R. “Composición y Generación de Residuos Sólidos Urbanos de la Ciudad de México Durante 2008-2009, incluye los generados en la Central de Abasto el D.F.” Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal. Instituto Politécnico Nacional, Universidad Nacional Autónoma de México y Universidad Autónoma Metropolitana. In press, 2013.

TMECC (2000) Test Method for Examination of Composts and Composting. First Final Release, United States Composting Council .

USDA (1980) Report and Recommendations on Organic Farming. Washington, DC



31/5/2012

INSTITUTO  
POLITÉCNICO  
NACIONAL

VIABILIDAD DE LA  
CAPACIDAD DEL ÁREA  
ACTUAL DE LA PLANTA DE  
COMPOSTA, ASÍ COMO,  
SU CAPACIDAD DE  
OPERACIÓN Y LA  
VIABILIDAD DE LA  
INCLUSIÓN DEL ÁREA DE  
LA PLANTA DE SELECCIÓN  
A LA PLANTA DE  
COMPOSTA

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIONES Y  
ESTUDIOS SOBRE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

VIABILIDAD DE LA CAPACIDAD DEL ÁREA ACTUAL DE LA PLANTA DE COMPOSTA, ASÍ COMO, SU  
CAPACIDAD DE OPERACIÓN Y LA VIABILIDAD DE LA INCLUSIÓN DEL ÁREA DE LA PLANTA DE  
SELECCIÓN A LA PLANTA DE COMPOSTA

---

**PARTICIPANTES**

Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez  
Responsable del Estudio, CIIEMAD  
Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo  
CIIEMAD  
Dra. María Teresa Núñez Cardona  
UAM-Xochimilco  
M. en C. Alfonso Espitia  
UAM-Azcapotzalco

**Estudiantes de Posgrado:**

Ing. Francisco Javier Barrón Santos  
CIIEMAD  
Ing. Rodrigo Abraham Castro Corona  
CIIEMAD  
Diana Paola Molina Zamora  
UAM- Xochimilco

**Estudiantes de Licenciatura:**

Juan José Calónico Nieva  
ENCB  
Ma. del Pilar Hernández López  
ENCB  
Juan Alberto Flores Ahuactzin  
UAM-Azcapotzalco

**Personal de la Secretaría de Obras y Servicios:**

Ing. Ricardo Estrada Núñez  
Subdirector de Reciclaje  
Ing. Cristina Ramos Cortez  
Jefa de la Unidad Departamental de Reciclaje  
Biol. Joaquín Díaz Garcés  
Coordinador Operativo de la Planta de Composta Bordo Poniente  
Biol. Jesús Llerandi  
Jefe de la Unidad Departamental de Planta de Composta

