

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PRODUCCIÓN DE ABONO ORGÁNICO A PARTIR DEL MATERIAL BIODEGRADABLE PRESENTE EN LOS RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS DE LA OCV JOSÉ FÉLIX RIBAS

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Buhmann M Stefan O
Para optar al Título
De Ingeniero Químico

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PRODUCCIÓN DE ABONO ORGÁNICO A PARTIR DEL MATERIAL BIODEGRADABLE PRESENTE EN LOS RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS DE LA OCV JOSÉ FÉLIX RIBAS

TUTOR ACADÉMICO: Prof^a. Rebeca Sánchez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Buhmann M Stefan O
Para optar al Título
De Ingeniero Químico

Caracas, 2010

Caracas, 17 de Mayo de 2010

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Stefan Orlando Buhmann Morales, titulado:

“Producción de abono orgánico a partir del material biodegradable presente en los residuos sólidos domésticos de la OCV José Félix Ribas”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Ali Lara
Jurado



Prof. Henry Blanco
Jurado



Prof^a. Rebeca Sánchez
Tutor Académico



Facultad de Ingeniería



Universidad Central de Venezuela

ACTA MENCIÓN HONORÍFICA

Los abajo firmantes, miembros del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado para optar al Título de Ingeniero Químico presentado por el Br. Stefan Orlando Buhmann Morales, CI:14.486.256, cuyo título es **"PRODUCCIÓN DE ABONO ORGÁNICO A PARTIR DEL MATERIAL BIODEGRADABLE PRESENTE EN LOS RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS DE LA OCV JOSÉ FÉLIX RIBAS"**, queremos dejar constancia del excelente trabajo realizado, ya que el mismo en cuanto a su ejecución, presentación y utilidad de los resultados, ameritó que se le asignara la nota máxima obtenible en estos casos: **Veinte puntos (20)**.

Así mismo, hemos decidido concederle Mención Honorífica por considerar que el trabajo constituye un valioso e innovador aporte en el desarrollo y adaptación de tecnologías para la producción de abono orgánico, que permite, además de la revalorización del material orgánico, atenuar el impacto ambiental ocasionado por los desechos sólidos de origen doméstico. Adicionalmente el Br. demostró que se compenetró con el tema y utilizó todas las herramientas y conceptos relacionados en el área, logrando a partir de un excelente diseño experimental y discusión estructurada, el escalamiento conceptual del proceso. Además el trabajo presentado por su alto nivel y contenido, va más allá de lo establecido en los requerimientos de trabajos de Pregrado.

Dado en Caracas, a los 17 días del mes de mayo del año dos mil diez.

Prof. Ali Lara
Jurado Principal

Prof. Henry Blanco
Jurado Principal

Prof. Rebeca Sánchez
Coordinadora del Jurado

"Hacia los 50° Aniversario del Aula Magna de la UCV"

DEDICATORIA

Adonáí por abrigarnos con tu luz, colmándonos de sabiduría y salud por siempre.

A los que nos están físicamente, mi abuela Miña y mi padrino, quienes siempre me acompañan y nunca saldrán de mi corazón, porque son estrellas que guían mi camino, mostrándome a cada paso que con voluntad se puede cambiar el mundo.

A mi mama, por hacer posible el milagro de traerme a la vida, por ser madre y padre, por tener fe en mi, por apoyarme y poner un millón de granitos de arenas que me ayudaron a cumplir esta meta, por mantenerte siempre como una luchadora, porque te amo y estoy orgulloso de ti.

Adriana, por brindarme ayuda y apoyo, por los consejos, por mostrarme que todavía existen personas dispuestas a cambiar el mundo, por mostrarme un nuevo sentimiento y encender en mi la llama inagotable e inextinguible del amor.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, por ser una segunda madre.

A la Facultad de Ingeniería y a la Escuela de Química por una segunda casa, llenas de aprendizajes.

A la profesora Rebeca Sánchez por su tutoría y brindarme el conocimiento necesario para cumplir esta meta.

A la OCV José Félix Ribas por permitirme ser participe en la solución de sus problemas.

Al todo el personal que labora en el comedor universitario, por todo su apoyo y colaboración.

A todos los que trabajan en la PETA, por su inmensa ayuda.

A la vida que me ha dado tanto y siempre me muestra un sin número de oportunidades.

A mi mamá por la espera y poder ver al fin los frutos de su esfuerzo.

A mi tía Nancy por su apoyo para poder cumplir los objetivos.

A los Rodríguez, Schiarizza e Izaguirre por su apoyo y cariño.

Adriana por estar conmigo en la lucha y siempre estar brindándome su apoyo.

Al profe Luis y a la profesora Milena por su inmensa y desinteresada ayuda en todos los ámbitos.

A los hermanos y hermanas de la vida, Vevi, Migue, Simón, Héctor, Ini, Andru, Miguel, Albert, Luis, Ricardo, Alberti, Vidal y el Portu por las buenas vibras y darme el placer de compartir con ellos.

Al UCVRFC y todos los hermanos con quien he sudado y sangrado en la cancha por poner en alto el nombre de la UCV.

Y a todas aquellas personas que a través de la vida me he encontrado y aunque sea un pequeño momento he compartido, dejándome un aprendizaje o buen recuerdo.

Buhmann M., Stefan O.

PRODUCCIÓN DE ABONO ORGÁNICO A PARTIR DEL MATERIAL BIODEGRADABLE PRESENTE EN LOS RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS DE LA OCV JOSÉ FÉLIX RIBAS

Tutora Académica: Prof^a. Rebeca Sánchez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2010, 152 p.

Palabras Claves: Compostaje, Biodegradación, Desechos sólidos.

Resumen. El compostaje se ha mostrado como una estrategia, en otras partes del mundo, para disminuir la cantidad de materia orgánica que llega a vertederos y rellenos sanitarios, es por ello que el objeto de este estudio es proponer parámetros de diseño y operación del proceso de elaboración de abono orgánico para aplicación en un futuro complejo habitacional, denominado Organización Comunitaria para la Vivienda (OCV) José Félix Ribas, ubicado en Los Teques. Para ello se hicieron una serie de evaluaciones partiendo de una mezcla de residuos que simulaba las composiciones de los desechos que podrían generar en la comunidad. Inicialmente, se estimó que 334 kg/d de residuos orgánicos serán los disponibles para una planta de compostaje, lo que significaría un aporte por habitante de 0,2 kg/d. Se determinó a través de la evaluación de pilas de diferentes tamaños que la pila de mayor volumen (0,045 m³) mostró mejores resultados; con este tamaño de pila se analizó la influencia de algunas variables en las propiedades del producto final (compost), entre las pruebas realizadas están: una aireación diaria y una interdiaria, el uso de un agente estructurante de aserrín (A) y un agente estructurante de desechos de jardín (combinado grama-hojas [GH]), la relación de desechos orgánicos-agente estructurante 1:1 y 2:1 en ambos agentes, la variación del tiempo de compostaje entre 15 y 30 días, por último el compostaje en una pila de pared cerrada y una de pared abierta. Para definir cuál fue el producto final con mejores resultados,

se hizo el seguimiento en el tiempo de las variables temperatura, pH, conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), porcentaje de humedad (%H), porcentaje de materia orgánica (%MO) y porcentaje de carbono orgánico total (%C), también se midió al inicio y final del proceso porcentaje de nitrógeno y relación carbono nitrógeno (C/N), además de porcentaje de fósforo, porcentaje de potasio, densidad aparente, color y olor, al final del proceso. Todo lo expuesto anteriormente permitió definir para esta investigación, que el mejor producto se obtuvo con una aireación diaria, el uso del agente estructurante GH en una relación 1:1, en un tiempo de 15 días y con la utilización de una pila de pared cerrada. A partir de estos resultados, los cuales son tomados como parámetros de diseño y operación, se propuso un esquema de proceso para la elaboración de compost en el futuro complejo habitacional.

 ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
Planteamiento del problema.....	3
ANTECEDENTES.....	6
Internacionales	6
Nacionales	9
Objetivos	13
<i>General</i>	13
<i>Específicos</i>	13
MARCO TEÓRICO.....	14
1. DESECHOS Y RESIDUOS SÓLIDOS.....	14
2. GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS (GIRS).....	15
Tratamiento Biológico.....	16
Proceso biológico.....	16
Selección del proceso biológico.....	20
3. COMPOST	21
Componentes químicos principales del compost	22
Etapas del Compostaje:	23
Materiales utilizados para el compostaje	25
Métodos de compostaje	28
4. PARAMETROS DE PROCESO Y VARIABLES DEL PROCESO	33
Temperatura	34
pH.....	37
Conductividad eléctrica (CE)	38
Humedad	40
Tamaño de partícula.....	42
Aireación	42
Relación carbono-nitrógeno	44

Color	49
Olor	49
5. ESTABILIDAD, MADUREZ Y CALIDAD DEL COMPOST	49
Materia orgánica fresca.....	50
Compost fresco	50
Compost.....	50
Compost curado.....	51
Granulometría.....	53
Densidad aparente (Da)	53
Nitrógeno total.....	53
Carbono orgánico	55
Carbono hidrosoluble.....	56
Potencial Redox	58
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	58
Relación N/lignina.....	59
Relación N/polifenoles.....	59
Fósforo total.....	59
Cationes totales: K ⁺ , Ca ⁺² , Mg ⁺² y Na ⁺	60
Presencia de metales pesados	62
6. PARÁMETROS BIOLÓGICOS	63
Parámetros bioquímicos.....	63
Parámetros microbiológicos.....	71
7. SELECCIÓN DE PARÁMETROS	76
8. ORGANIZACIÓN COMUNITARIA PARA LA VIVIENDA JOSÉ FÉLIX RIBAS .	77
CAPITULO III METODOLOGÍA	81
FASE I. ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE DESECHOS A PROCESAR.	81
FASE II. DEFINIR LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS DESECHOS ORGANICOS	83
FASE III. MONTAJE Y SEGUIMIENTO DEL SISTEMA DE ELOBORACION DE COMPOST	83
Experiencias.....	84
Determinación de parámetros físico-químicos en la mezcla inicial.....	87
Monitoreo de los parámetros del proceso.....	88

Evaluación de calidad de compost	89
FASE IV. DEFINICIÓN DEL ESQUEMA DE PROCESO DE ELABORACIÓN DE ABONO ORGÁNICO.	94
CAPÍTULO VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	95
FASE I. ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD Y EL TIPO DE DESECHOS A PROCESAR	95
FASE II. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS DESECHOS ORGÁNICOS ..	95
FASE III. MONTAJE Y SEGUIMIENTO DE COMPOSTEROS A FIN DE DETERMINAR LAS MEJORES CONDICIONES DE BIODEGRADACIÓN....	96
Previas	97
Variación del tamaño de la pila:	98
Variación de la frecuencia de aireación:	100
Tipo de agente estructurante y relación desechos orgánicos-agente estructurante:	106
Tiempo de biodegradación:	114
Tipo de pila:.....	119
Rendimiento.....	127
Fitotoxicidad.....	128
FASE IV. DEFINICIÓN DEL ESQUEMA DE PROCESO DE ELABORACIÓN DE ABONO ORGÁNICO.	128
Acondicionamiento de la materia prima y los insumos:	129
Reacción	131
Acondicionamiento del producto:.....	132
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	134
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
APENDICES.....	143

ÍNDICE DE TABLAS

TablaNº1. Clasificación de los desechos y residuos sólidos	15
TablaNº2. Comparación de procesos aerobios y anaerobios	20
TablaNº3. Composición de compost de residuos sólidos urbanos, intervalos para cada variable.	27
TablaNº4. Temperatura y tiempo de exposición necesario para la destrucción de algunos patógenos y parásitos comunes	36
TablaN 5. Influencia de la relación C/N sobre la conservación de nitrógeno	46
TablaNº6. Relaciones C/N nominales de materiales compostables seleccionados (base seca)	47
TablaNº7. Parámetros de control del Compost	52
TablaNº8. Condiciones climatológicas del Municipio Guacaipuro del Estado Miranda	78
TablaNº9. Composición promedio de los desechos sólidos del Municipio Guacaipuro del Estado Miranda	80
TablaNº10. Datos estimados de la Comunidad José Félix Ribas.	95
TablaNº11. Relaciones de contenido de carbono y nitrógeno en los composteros al variar la frecuencia de aireación.	103
TablaNº12. Propiedades finales de los composteros al variar la frecuencia de aireación.	104
TablaNº13. Relaciones de contenido de carbono y nitrógeno al variar el agente estructurante y la relación materia orgánica agente estructurante	110

TablaNº14.Propiedades finales de los composteros al variar el agente estructurante y la relación materia orgánica agente estructurante	112
TablaNº15.Relaciones de contenido carbono nitrógeno para diferentes tiempos de biodegradación	115
TablaNº16.Propiedades finales de los composteros para diferentes tiempos de biodegradación	117
TablaNº17.Propiedades relaciones de carbono nitrógeno de los composteros al el tipo de pared	124
TablaNº18 Propiedades finales de los composteros al el tipo de pared	125
TablaNº19.Rendimiento del proceso	127
TablaNº20.Variación de carbono orgánico total en el tiempo	146
TablaNº21.Concentración de nitrógeno total al inicio y al final del proceso de compostaje	147

ÍNDICE DE FIGURAS

FiguraNº1.Muestra de pila agitada	31
FiguraNº2.Evolución de la temperatura y pH durante las diferentes etapas del compostaje.	34
FiguraNº3.Perfiles de temperaturas en varios compost durante su proceso de compostaje.	35
FiguraNº4.Valores de pH en diferentes compost durante el proceso de compostaje.	38
FiguraNº5.Tendencia evolutiva de la Conductividad Eléctrica (CE).	39
FiguraNº6.Valores de CE de un compost durante el proceso de compostaje.	40
FiguraNº7.Porcentaje de humedad de un compost durante el proceso de compostaje.	41
FiguraNº8.Tendencia evolutiva del Porcentaje de Humedad.	42
FiguraNº9.Variación de temperatura versus tiempo de compostaje.	43
FiguraNº10.Efecto Chimenea.	44
FiguraNº11.Relación C/N durante su proceso de compostaje.	46
FiguraNº12.Tendencia evolutiva de la Relación Carbono-Nitrógeno (C/N).	47
FiguraNº13.Transformaciones de los compuestos nitrogenados durante el proceso de compostaje.	48
FiguraNº14.Contenido de nitrógeno en varios compost durante su proceso de compostaje.	54

FiguraNº15.Contenido de carbono orgánico total (%) en varios compost durante su proceso de compostaje.	56
FiguraNº16.Contenido de carbono hidrosoluble (%) en varios compost durante su proceso de compostaje.	57
FiguraNº17.Porcentaje de fósforo en varios compost durante su proceso de compostaje.	60
FiguraNº18.Porcentaje de cationes totales en el compost elaborado con restos de alimentos del comedor de la USB durante su proceso de compostaje.	62
FiguraNº19.Métodos de extracción y fraccionamiento del carbono orgánico de lodos secos y compost.	65
FiguraNº20.Actividad de algunas enzimas en el compost elaborado con restos de alimentos del comedor de la USB durante su proceso de compostaje.	68
FiguraNº21.Desprendimiento de CO ₂ en el compost elaborado con restos de alimentos del comedor de la USB durante su proceso de compostaje.	69
FiguraNº22.Población de microorganismos en diferentes etapas de la elaboración del compost elaborado con restos de alimentos del comedor de la USB.	72
FiguraNº23.Índice de germinación (IG) en dos compost durante su proceso de compostaje.	75
FiguraNº24.Valores totales de producción de tomate obtenida.	76
FiguraNº25.Mapa del Estado Miranda.	78
FiguraNº26.Producción de desechos sólidos en Venezuela por Estado.	79

FiguraNº27.Producción de desechos y cantidad de habitantes por Municipio en el Estado Miranda.	79
FiguraNº28.Esquema del análisis de fósforo y potasio.	93
FiguraNº29.Variación de la Temperatura del compost en el tiempo evaluada en composteros de 0,006 m ³ .	97
FiguraNº30.Variación de la Temperatura del compost en el tiempo evaluada en composteros de dos tamaños.	98
FiguraNº31.Imágenes de los composteros luego de 15 días	99
FiguraNº32.Variación de la Temperatura promedio de los composteros en función del tiempo con diferentes frecuencias de aireación.	100
FiguraNº33.Variación del pH y la conductividad de los composteros en función del tiempo con diferentes frecuencias de aireación.	101
FiguraNº34.Variación del porcentaje de humedad y porcentaje de materia orgánica en función del tiempo con diferentes frecuencias de aireación.	103
FiguraNº35.Imágenes de producto final adiferentes aireación.	106
FiguraNº36.Variación de la Temperatura promedio del compostero en función del tiempo con diferentes tipos y relaciones de agente estructurante.	107
FiguraNº37.Variación del pH y la conductividad de los composteros en función del tiempo con diferentes tipos y relaciones de agente estructurante.	108
FiguraNº38.Variación del porcentaje de humedad y de materia orgánica en función del tiempo con diferentes tipos y relaciones de estructurante.	109

FiguraNº39.Imágenes de producto final con diferentes estructurantes y distintas relaciones	113
FiguraNº40.Variación de las Temperaturas promedios en función de tiempo para un tiempo de biodegradación de 30 días.	114
FiguraNº41.Imágenes de producto final a los treinta días.	118
FiguraNº42.Variación de las Temperaturas promedios en función de tiempo para diferentes composteros con paredes de malla	119
FiguraNº43.Variación de pH en función de tiempo para diferentes composteros con paredes de malla.	120
FiguraNº44.Variación de la conductividad eléctrica en función de tiempo para diferentes composteros con paredes de malla	121
FiguraNº45.Variación del porcentaje de humedad en función de tiempo para diferentes composteros con paredes de malla	122
FiguraNº46.Variación del porcentaje de materia orgánica en función de tiempo para diferentes composteros con paredes de malla	123
FiguraNº47.Imágenes de producto final de pared cerrada y pared abierta.	126
FiguraNº48.Esquema de proceso propuesto para la producción de abono.	129
FiguraNº49.Diagrama de Flujo de proceso para la producción de abono.	133

INTRODUCCIÓN

Esta investigación plantea una posible herramienta de solución, al problema de generación de desechos, ocasionado por un mal manejo de los desechos sólidos e inadecuada disposición final, lo que trae como resultado la contaminación ambiental. En Venezuela se registra una producción diaria de más de 19000 t de desechos con un contenido de material orgánico (>40%), el cual puede ser utilizado a través de un tratamiento biológico.

Unos de los tratamientos biológicos ampliamente usado y que ha dado buenos resultados en otras localidades, es el compostaje, ayudando a la reducción de los desechos llevados a los sitios de disposición final y la obtención de un producto de valor agregado como lo es el abono orgánico. La aplicación de esta alternativa, necesita un análisis de diversas variables y parámetros, que permitan conceptualizar el proceso en determinado caso de estudio.

Como objeto de estudio se tiene el futuro complejo habitacional, Organización Comunitaria para la Vivienda (OCV) José Félix Ribas, el cual se ubicará en el Sector Pan de Azúcar, Municipio Guacaipuro, Los Teques, Estado Miranda, donde serán construidas 400 viviendas. Esta alternativa permitirá a la ciudadanía participar en la solución de sus problemas y obtener beneficios en la mejora de su calidad de vida.

Para llevar a cabo éste trabajo de investigación, se desarrollan cinco capítulos, primeramente se encuentra los fundamentos de la investigación, donde se plantea el problema, del cual se generan los objetivos específicos a realizar para alcanzar el objetivo general de la investigación. En el segundo capítulo, se desarrolla un marco teórico, donde se presentan diferentes aspectos referidos a los residuos sólidos, los diferentes tratamientos para la gestión de

desechos sólidos, el compostaje y los parámetros y variables de procesos que están involucradas en el proceso de compostaje .

Una vez sentadas las bases de la investigación se elaboró la metodología experimental, capítulo tres, que permitió llevar a cabo los objetivos planteados, en la cual se explican los pasos seguidos para el montaje de los composteros a través de los cuáles se pudo estimar la influencia de diversas variables en los parámetros del producto final “compost”, así como también, se indican las técnicas empleadas para el seguimiento en el tiempo de las variables y los parámetros del producto.

En el capítulo cuatro, se presentan los resultados obtenidos junto con el análisis correspondiente, derivándose así las conclusiones y recomendaciones de esta investigación, las cuales se presentan en el quinto capítulo.

Adicionalmente se presenta una sección de apéndices donde se encuentra información adicional generada en éste Trabajo Especial de Grado.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se expone el planteamiento del problema y los objetivos propuestos para llevar a cabo este Trabajo Especial de Grado.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A lo largo de la historia, a nivel mundial, la generación de desechos es algo intrínseco de la sociedad, el crecimiento poblacional e industrial ha generado un aumento en la producción de residuos y desechos de diversas índoles (Villalba, 2005). Solo en Venezuela se registra una producción diaria de más de 19000 t de desechos (Navas, 2008). Lo antes planteado, unido a un mal manejo de los desechos sólidos e inadecuada disposición final, traen como resultado la aparición de problemas de contaminación ambiental, que generan la pérdida de valor de terrenos, deterioro paisajístico e impacto negativo en la salud humana y animal. Uno de estos problemas es la emisión de gases de efecto invernadero. En Venezuela el 9,7% de las emisiones de metano son producidos por la descomposición de desechos orgánicos que llegan a vertederos y rellenos sanitarios (Sánchez, 2004). Este gas es siete veces más perjudicial que el dióxido de carbono en términos de su efecto en los cambios climáticos (Ciavatta, Francioso, Montecchio, Cavani y Grigatti, 2001).

Se espera que el problema de disposición de desechos sólidos se agrave debido al crecimiento de la población, la cual podría tener mayores exigencias en la mejora de la calidad de vida. Estas proyecciones originaron para el año 2001 que el Poder Ejecutivo a través de la Asamblea Nacional declarara el problema de manejo de residuos y desechos sólidos como emergencia nacional y de atención prioritaria en todo el territorio nacional (MINAMB, 2005). Es así que la

búsqueda de soluciones enmarcadas en una Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS), basada en la planificación y jerarquización del manejo de residuos, con el uso de aspectos como minimización, reuso, reciclaje, tratamiento biológico, tratamiento térmico con o sin recuperación de energía y disposición final, muestra el tratamiento biológico como herramienta importante para la utilización de la gran cantidad de residuos orgánicos y un mecanismo de reducción de los desechos llevados a los sitios de disposición final, obteniendo beneficios ambientales y económicos (McDougall y otros, 2004).

Uno de los tratamientos biológicos de mayor importancia es el compostaje, por ser un proceso eficiente, de larga trayectoria y relativa sencillez, del cual se obtiene como producto un abono orgánico resultante de la descomposición de los desechos orgánicos (McDougall y otros, 2004). Este método presenta como ventajas, no solo la optimización en el manejo de los desechos, sino también la mejora de las propiedades de los suelos, debido a la obtención de un producto que aumenta el estado de agregación del suelo y el desarrollo de su flora microbiana; del mismo modo mejora la estabilidad del suelo, aumenta su porosidad y capacidad de retención hídrica, favoreciendo el intercambio de gases y agua, traduciendo todo esto en el aumento de la eficiencia de los cultivos (Costa, García, Hernández y Polo, 1991).

El método de compostaje es una herramienta poco utilizada en el país para el aprovechamiento de desechos orgánicos, por ello hay poca experiencia en su utilización y carencia de una metodología que permita obtener un producto confiable y reproducible. Debido a lo anterior planteado, es necesario establecer las condiciones operacionales para su elaboración por medio del estudio del proceso de compostaje, a fin de determinar los parámetros que permitan dimensionar el proceso según las variables específicas de una población y lugar, obteniendo un producto que mejore las condiciones de los

suelos y cumpla con ciertas especificaciones, como 2% de nitrógeno, 2,5% de fósforo y 0,5% de potasio, fijados en Venezuela por COVENIN (1963).

La utilización de esta alternativa en las comunidades, permite a la ciudadanía participar en la solución de sus problemas, por lo que es necesario la conceptualización de un sistema de compostaje, el cual pueda ser aplicado y evaluado como plan piloto en el futuro complejo habitacional, Organización Comunitaria para la Vivienda (OCV) José Félix Ribas. Esta comunidad se ubicará en el Sector Pan de Azúcar, Municipio Guacaipuro, Los Teques, Estado Miranda, estando al servicio de unas 400 familias para tratar los desechos orgánicos que allí se generen, permitiendo la obtención de abono orgánico. Es de gran importancia para el Estado Miranda, la búsqueda de soluciones, ya que está catalogado como zona de muy alto impacto potencial al ambiente, coincidiendo con una de las zonas de mayor generación de desechos sólidos, con más de 200000 kg/d, donde los restos orgánicos abarcan en promedio un 39% (Navas, 2008).

Con base en lo antes expuesto esta investigación tiene como finalidad, proponer parámetros de diseño del proceso de elaboración de abono orgánico a partir de desechos orgánicos de una comunidad, proveyendo una solución ambiental y una mejora en la economía del sector donde se aplique, mediante la creación de plazas de trabajo.

ANTECEDENTES

Diferentes instituciones en el mundo y el país, realizan proyectos de investigación para conocer el proceso de degradación biológica y obtener como producto final abono orgánico, a continuación se señalan algunas de estas instituciones.

Internacionales

- La Universidad Federal de Bahía en Brasil, en búsqueda de mejorar el destino de los residuos producidos por actividades domésticas, propuso el compostaje como una alternativa, para ello se produjo abono a partir de desechos orgánicos urbanos para evaluar su aplicación en plantaciones de maíz. Se elaboraron dos tipos de compost, el compost seleccionado (SC), producido a partir de residuos orgánicos recogidos selectivamente y el compost no seleccionado (NSC). El maíz se sembró en macetas de polietileno, con sustrato de mezcla del suelo-compost en diferentes proporciones. Los análisis químicos del compost y propiedades de crecimiento de la planta como el contenido de clorofila, la altura y el diámetro del tallo; biomasa seca aérea y radicular, se utilizaron para evaluar la calidad del compost. Las plantas cultivadas con SC presentó una ganancia superior, siendo de 52,5% en el diámetro del tallo, el 71,1 y del 81,2% en raíz y tallo biomásas, respectivamente. El estudio permitió concluir que a partir de desechos orgánicos urbanos con recolección selectiva se logró producir un compost que ejerce un efecto beneficioso sobre el crecimiento de las plantas de maíz (Lima, Queiroz y Freitas, 2004).
- La Universidad Central de Venezuela conjunto con la Universidad de Puerto Rico, se llevó a cabo un estudio del efecto del compost sobre la calidad de la materia orgánica del suelo, en condiciones tropicales. El compost fue aplicado anualmente durante 3 años en diferentes

cantidades a cuatro parcelas. Donde anualmente a muestras de la superficie del suelo se les determinó el índice de ácidos húmicos y fúlvicos (C-HA/C-FA), la relación E4/E6 y la clasificación Kumada de los ácidos húmicos. Como resultado de dicha investigación se obtuvo que al aplicar compost a suelos con baja fertilidad, el contenido de materia orgánica generalmente incrementa y por ende su fertilidad (Rivero, Chirinje, Ma y Martínez 2004).

- La Universidad de New York, desarrolló un programa educativo para los trabajadores de las cafeterías para separar los desechos destinados al compostaje. La meta del programa es reducir costos de disposición de los desechos de alimentos de cafeterías. El programa emplea aproximadamente 300 toneladas de desechos de alimentos anualmente (Instituto de Manejo de Desechos Cornell, 1998)
- En Ecuador se llevaron a cabo proyectos de compostaje en el año 1998, los cuales tenían por objetivos:
 - Dar una alternativa viable a los problemas causados por el mal manejo de desechos sólidos, usando como base la elaboración de abono.
 - Involucrar a la comunidad en el manejo de desechos sólidos mediante la clasificación y separación de los desechos en el origen.
 - Mejorar la estructura y rendimiento de los suelos a nivel agrícola.Teniendo como resultado que el 75% de los proyectos cumplieron con la totalidad de sus objetivos y el 25% de los restantes proyectos lo han conseguido parcialmente, esto se debió a una falta de planificación en los procedimientos para la elaboración del compost en las zonas de la costa y oriente, a una la falta de realización de estudios de ubicación de las plantas por lo que se vieron afectados los proyectos por inundación o escases de agua y por el descontento en la zonas urbanas por la generación de malos olores e insectos, a causa de una falta de seguimiento y control de las variables de proceso (Campos y otros, 1998).

- La Facultad de Ambiente de la Universidad de Teherán y la Organización de Reciclado de Desechos y Compost, con el fin de determinar el proceso más adecuado de compostaje en un sistema residuos sólidos urbanos, llevó a cabo un experimento utilizando tres niveles de aireación. Durante cada tasa de aireación, se evaluó los parámetros tales como temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE), relación carbono-nitrógeno, $\text{NO}_3\text{-N}$, nitrógeno, potasio y fósforo. El resultado de este estudio muestra que para media y baja tasa de aireación se tiene un impacto significativo sobre el nitrógeno, la relación carbono-nitrógeno y perfil de temperatura, mientras que para la mayor tasa de aireación se muestran valores más altos de CE. Por otra parte, la fase termófila duró 13, 9 y 4 semanas para las tasas de aireación de 0,4, 0,6 y 0,9 $\text{L min}^{-1}\text{kg}^{-1}$, respectivamente. En consecuencia, se concluyó que a partir de una tasa de 0,6 $\text{L min}^{-1}\text{kg}^{-1}$ durante los primeros 2 meses del proceso y luego continuar a un ritmo de 0,4 $\text{L min}^{-1}\text{kg}^{-1}$ hasta el final del proceso de compostaje se traduciría en menor consumo de energía (Rasapoor, Nasrabadi, Kamali y Hoveidi, 2009).
- El Departamento de Ingeniería de Biorecursos de la Universidad McGill investigó la efectividad de tres agentes estructurantes en el compostaje, utilizando el picado de paja de trigo (CWS) paja, el picado de heno (CH) que consiste de 80% heno y 20% de trébol y la virutas de madera de pino (WAS). Estos agentes fueron mezclados en diferentes relaciones con residuos de alimentos (FW). Cada mezcla fue sometida a un proceso de biodegradación en recipientes con aireación forzada durante 10 días, tiempo en el cual fueron registradas la tendencia de temperatura y pH barriles verticales. Luego cada mezcla fue llevada a barriles verticales para madurar durante 56 días y al final del proceso medir el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio. Como resultado se obtuvo que las mezclas con estructurante CWS y CH fueron la únicas en alcanzar la etapa

termófila durante los 10 días. Después de los 56 días todos los agentes muestran contenidos adecuados de nitrógeno, fósforo y potasio para su uso como enmienda de suelos (Adhikari, Barrington, Martínez y King, 2009).

- El Departamento de Agricultura e Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Iowa y el Departamento de Agricultura e Ingeniería Biológica de la Universidad de Pensilvania, realizó el estudio de las tasas de respiración microbiana para 12 composteros en función del contenido de humedad y el tipo de agente estructurante. La tasas se midieron con un método de sensor a presión a seis diferentes niveles de humedad y utilizando agentes estructurantes de heno de alfalfa, forraje ensilado, paja de avena y paja usada en los nidos de pavos. Como resultado se obtuvo que todos los estructurantes son apropiados para alcanzar altas temperaturas y a su vez altas tasas de destrucción de patógenos. Además para todos los agentes se observó que el contenido óptimo de humedad iba desde 60% a 80%, intervalo en donde se obtuvo una tasa máxima de respiración (Anh, Richard y Glanville, 2008).

Nacionales

- Una experiencia exitosa de compostaje de lodos, fue realizada en la planta de tratamiento de las aguas residuales de la Cervecería de Oriente. Estos lodos están constituidos fundamentalmente por masas de bacterias y restos orgánicos que surgen en los diferentes procesos y operaciones que se hacen para elaborar la cerveza. Los lodos son mezclados con levadura y tierra de infusorios, originando una especie de compuesto, que al salir de la planta de tratamiento de aguas, va a un silo donde es almacenado para luego ser trasladado en forma semilíquida en camiones, especialmente acondicionados para ello hasta el Centro de Protección Ambiental para el Reciclaje de Lodos (CEPAREL), el cual funciona en el

sector Mesones, de la ciudad de Barcelona, estado Anzoátegui. Este compuesto semilíquido es llevado a un área de presecado, durante 3 días, la mezcla recibe un proceso de rastreado, con el fin de eliminar gran parte de la humedad y eliminar materiales indeseables. Luego del presecado del material, se utiliza la técnica de pilas estacionarias con ventilación forzada, las cuales se construyen sobre una tubería perforada que está conectada a un sistema de vacío. Las dimensiones de la pila son de 2,5 m. de alto por 10 m. de largo y 5 m. de ancho. El sistema de aireación negativa (vacío) promueve la remoción de gases que se generan en el proceso de descomposición y permite la difusión del oxígeno atmosférico hacia la pila, creándose condiciones aeróbicas para iniciar la acción de microorganismos termófilos que generan temperaturas cercanas a los 70°C. Estas condiciones aceleran el proceso y permiten producir un compost de óptima calidad, libre de malos olores, malas hierbas y enfermedades para las plantas (Polar, 1990).

- Como iniciativa agro-ecológica para reciclar desechos orgánicos producidos en la Universidad de Los Andes y la Comunidad Santa Rosa de la ciudad de Mérida, se planteó la posibilidad de consolidar una estación piloto entre los años 1998 y 1999. La planta piloto está ubicada en el Instituto de Investigaciones Agropecuarias de la ULA dentro del Programa para el Manejo de los Desechos Orgánicos del Circuito Universidad de Los Andes para el Manejo Integral de los Desechos (CIULAMIDE), esta planta piloto emplea el método Indore para una descomposición previa, además la planta cuenta con un área de compostaje, un área cantera, secado-tamizado, ensayo y depósitos. Esta estación piloto produce abono orgánico líquido y en fibras, el cual es comercializado y aplicado prioritariamente en las áreas de jardinería de la ULA, en avenidas de la ciudad de Mérida y en FUNDACITE (Suárez, 2002)

- El Centro de Reciclaje de Caricuao, ha trabajado intermitentemente desde el año 1987, conjuntamente con la Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez, en el desarrollo de un proyecto para producir abono orgánico por vía aerobia. Se emplearon desechos orgánicos provenientes del mercado de Coche ubicado en Caracas, para obtener el abono correspondiente. En la actualidad continua produciendo abono solo a partir de los desechos de jardín del centro, el cual es utilizado para uso propio (E. Silva, entrevista personal, Agosto 17, 2009).
- En el Jardín Botánico “Dr. Tobías Lasser”, Ciudad Universitaria de Caracas, se elabora abono a partir de desechos de materia orgánica vegetal (hojas caídas de los arboles, ramas, resto de poda y en algunos casos papel que forma parte de la mezcla vegetal). En el desarrollo de este programa se planteó a futuro realizar análisis químicos y microbiológicos, contribuyendo de esa manera al conocimiento científico de este proceso (Suarez, 2004). Actualmente la producción de compost le ha permitido generar ingresos propios a la Fundación.
- En la Unidad Experimental de Apicultura y Lombricultura “Los Cositos” de la Facultad de Ciencias Veterinarias, se produce abono mediante el método de lombricultura, utilizando los desechos de jardín generados en el recinto universitario y el estiércol de los distintos establos de la Facultad, obteniendo un humus líquido producto de las excretas de las lombrices, el cual tiene un alto contenido de nutrientes, y un humus sólido de gran calidad. Productos que a través de la venta son obtenidos por viveros y productores agrícolas. La falta de personal no permite obtener mayores beneficios, ya que el personal encargado en su mayoría son estudiantes, cumpliendo labores como pasantes, lo que ocasiona una constante renovación del personal (G. Liendo, entrevista personal, Septiembre 29, 2009).

- En la Universidad Simón Bolívar, con el fin de conocer, identificar y analizar los parámetros físicos, químicos y biológicos más comúnmente usados para determinar la madurez de un compost. Se realizó un inventario de los desechos sólidos de naturaleza orgánica generados en la USB y su caracterización desde el punto de vista físico-químico, se elaboró un compost con el uso de los desechos sólidos orgánicos generados en la USB y se le determinó la calidad con respecto al grado de madurez y su potencial uso agrícola considerando su caracterización físico-química y biológica. Resultando de todos los parámetros analizados durante el proceso de compostaje, son más eficientes para catalogarlos como indicadores de madurez de los composts los siguientes:

Físico-químicos: La temperatura, el contenido de carbono orgánico total e hidrosoluble y la relación CHS/Ntotal.

Parámetros biológicos-bioquímicos: Grado de humificación, porcentaje de humificación, actividad de las enzimas hidrolíticas (ureasa, fosfatasa y b-glucosidasa) y el desprendimiento de CO₂.

Parámetros biológicos-microbiológicos: Índice de germinación y pruebas de campo.

Todos estos parámetros mostraron la importancia de incorporar una fase de maduración-estabilización después del proceso de compostaje, además luego de ser analizados diversos parámetros físico-químicos y biológicos, pueden catalogarse los productos como compost maduro con potencial uso agrícola (Villalba, 2006).

OBJETIVOS

A continuación se presentan los objetivos para el desarrollo de la investigación.

General:

Proponer parámetros de diseño y operación del proceso de elaboración de abono orgánico a partir de la degradación de los desechos orgánicos domésticos simulando la mezcla inicial de una comunidad.

Específicos:

- Determinar la producción y composición de los desechos sólidos domésticos de la comunidad, permitiendo dimensionar el proceso.
- Definir los criterios para la selección de los desechos orgánicos que serán utilizados en la elaboración de abono orgánico.
- Analizar la influencia del tamaño de pila, aireación, tipo de estructurante y relación de estructurante-materia orgánica, tiempo de biodegradación y tipo de pila en la evolución del proceso y en la calidad del compost.
- Plantear un esquema de proceso de elaboración de abono orgánico a partir del material biodegradable presente en los desechos sólidos domésticos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

A continuación se presentan una serie de términos y datos relevantes para el desarrollo de la investigación.

1. DESECHOS Y RESIDUOS SÓLIDOS

Para los efectos de este trabajo, se toma de la Ley de Residuos y Desechos Sólidos (2004) las siguientes definiciones:

Desechos: todo material o conjunto de materiales resultantes de cualquier proceso u operación, para los cuales no se prevé un destino inmediato y deba ser eliminado o dispuesto en forma permanente.

Residuos: es todo material resultante de los procesos de producción, transformación y utilización que sea susceptible de ser tratado, reusado, reciclado o recuperado, en las condiciones tecnológicas y económicas del momento específicamente por la extracción de su parte valorizable.

Los desechos y residuos sólidos pueden ser clasificados según la fuente, riesgos a la salud y ambiente; y asimilación ecológica. Esta clasificación es detallada en la Tabla N° 1.

Una de las claves para evitar los problemas ambientales por la generación y acumulación de residuos, es tener una gestión integral de residuos sólidos responsable y bien planificada.

Tabla N° 1. Clasificación de los desechos y residuos sólidos

	Residenciales o Domésticos	
Según la Fuente de Origen	<ul style="list-style-type: none"> -Transporte (Terrestre, Ferroviario, Acuático y Aéreo; incluyendo sus terminales y puertos) -Servicios -Comercial -Industrial Metal, Mecánico y Químico -Construcción/Demolición -Agro-Pecuarios, Pesqueros y Forestales -Energéticos, Petroleros y Mineros -Medico-Hospitalarios (Biomédicos) 	
Según Riesgos a la Salud y/o Ambiente	Domésticos o de bajo riesgo	<p>Generales; desechos domésticos propiamente dichos los cuales son el producto de todas aquellas actividades realizadas en los hogares.</p> <p>Especiales; animales muertos, escombros, chatarras, briznizas, trastos, polvillo, electrodomésticos, etc.</p>
	Especiales o de alto riesgo	<p>Patógenos; infecciosos, tóxicos, alérgicos, cancerígenos, mutagénicos y teratogénicos.</p> <p>Letales</p> <p>Peligrosos; combustibles, inflamables, explosivos, radioactivos, corrosivos, térmicos, etc.</p>
Según Proceso de Asimilación Ecológica	Biodegradables u Orgánicos	<p>Bio-Activos, putrescibles o de rápida descomposición; restos de alimentos, excrementos, etc.</p> <p>Bio-Pasivos o de muy lenta descomposición; papel, cartón, textiles, madera, etc.</p>
	No Biodegradables, Inorgánicos o Inertes	Vidrios, metales (ferrosos y no ferrosos), plásticos y sintéticos, escombros, trastos, cenizas, lodos inorgánicos y otras sustancias.

Fuente: (MINAMB, 2008)

2. GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS (GIRS)

“Es el conjunto de acciones normativas, financieras y de planeamiento, que se aplican a todas las etapas del manejo de los residuos y desechos sólidos

desde su generación hasta su disposición final, basándose en criterios sanitarios, ambientales y de viabilidad técnica y económica para la reducción en la fuente de aprovechamiento, tratamiento y disposición final” (Ley RDS, 2004).

El desarrollo de la GIRS se realiza a través de la planificación y jerarquización de estrategias como minimización, reúso, reciclaje, tratamiento biológico, tratamiento térmico con o sin recuperación de energía y disposición final. Requiriendo un estudio global que permita reconocer la combinación de estrategias que lleven a un sistema sustentable, el cual debe ser ambientalmente efectivo, económicamente costeable y socialmente aceptable (McDougall y otros, 2004).

Tratamiento Biológico

Es la transformación de la fracción orgánica biodegradable de los desechos, compuesta principalmente por proteínas, aminoácidos, lípidos, hidratos de carbono, celulosa, lignina y ceniza (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994). Esta transformación se efectúa por acción de los microorganismos bajo condiciones controladas, a un estado lo suficientemente estable como para estar libre de olores desagradables (Sánchez, 2007). Esto se lleva a cabo debido a la necesidad de los microorganismos de reproducirse y funcionar correctamente, precisando fuentes de energías de carbono para la síntesis de nuevo tejido celular. La fracción orgánica de los desechos domésticos contienen normalmente cantidades adecuadas de estos nutrientes para soportar la conversión biológica (Tchobanoglous y Kreith, 2002).

Proceso biológico

Los nutrientes, en ocasiones pueden ser una limitante para la síntesis y el crecimiento celular microbiano, los principales nutrientes inorgánicos son nitrógeno, azufre, fósforo, potasio, magnesio, calcio, hierro, sodio y cloro. Los nutrientes menores, no sin menos importancia, están zinc, manganeso, molibdeno, selenio, cobalto, cobre, níquel y wolframio. Además de los nutrientes

inorgánicos, los organismos también necesitan nutrientes orgánicos, conocidos como factores de crecimiento, estos son compuestos precursores o constituyentes del material celular orgánico, que no puede sintetizarse a partir de otras fuentes de carbono. Aunque los factores de crecimiento difieren de un organismo a otro, sus principales se encuentran entre los aminoácidos, purinas, pirimidinas y vitaminas (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994).

Dependiendo de la fuente de energía y del carbono, los organismos se pueden clasificar de la siguiente manera: según la fuente de carbono, el cual es necesario para el tejido celular, los organismos se clasifican en heterótrofos y autótrofos, los heterótrofos utilizan el carbono orgánico y los autótrofos obtienen carbono a partir del dióxido de carbono. La conversión de este dióxido de carbono se lleva a cabo de un proceso reductor que requiere una entrada de energía neta. Por lo cual los organismos autótrofos requieren mayor cantidad de energía, lo que provoca una tasa de crecimiento baja con respecto a los heterótrofos. Según la energía, necesaria para la síntesis celular, la cual puede obtenerse con la luz o con una reacción de química de oxidación, clasifica a los organismos en aquellos capaces de utilizar la luz como fuente de energía llamados fotótrofos y los que obtiene su energía mediante reacciones químicas conocidos como quimiótrofos (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994)

Para llevar a cabo la conversión biológica, es de importancia primordial la presencia de organismos quimioheterotróficos, estos pueden agruparse adicionalmente según su tipo metabólico y sus necesidades de oxígeno molecular. Los organismos con un metabolismo respiratorio generan energía mediante el transporte de electrones, a través de enzimas, desde un donante de electrones hasta un receptor de electrones externo (como oxígeno). Por el contrario los organismos con metabolismo fermentativo, no requieren la participación de receptor externo de electrones. La fermentación es un proceso productor de energía menos eficaz que la respiración, en consecuencia, los organismos heterótrofos fermentativos se caracterizan por tasas de crecimiento

y reproducción celular menor que los heterótrofos respiratorios (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994).

La utilización de oxígeno molecular como receptor de electrones en el metabolismo respiratorio, se conoce como respiración anaerobia. Los organismos de respiración aerobia satisfacen sus necesidades energéticas y solo existen cuando hay un suministro de oxígeno, éstos son conocidos también como organismos aerobios obligados. Algunos compuestos inorgánicos oxidados, como el nitrito y sulfito, pueden funcionar como receptores de electrones para algunos organismos respiratorios en ausencia de oxígeno molecular, conociendo este proceso como anóxico (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994)

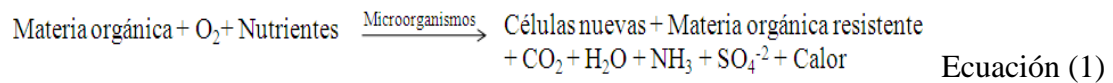
Los anaerobios obligados o estrictos, generan energía mediante la fermentación y existen únicamente en ambientes libres de oxígeno. Otros organismos capaces de crecer en presencia o en ausencia de oxígeno molecular, son llamados anaerobios facultativos (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994).

Los organismos facultativos están clasificados en dos subgrupos según sus capacidades metabólicas. Los verdaderos anaerobios facultativos pueden cambiar su metabolismo respiratorio desde el fermentativo al aerobio, según la presencia o ausencia de oxígeno molecular. Los anaerobios aerotolerantes poseen un metabolismo estrictamente fermentativo, pero son relativamente insensibles a la presencia de oxígeno. Además de una fuente de energía y nutrientes, los microorganismos necesitan de un ambiente propicio para su desarrollo, sin distinguir en el tipo de microorganismo que actúe, las condiciones ambientales de temperatura, pH y humedad tienen importante efecto sobre la supervivencia y el crecimiento de los microorganismos (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994).

Por lo tanto, dependiendo de los microorganismos que actúen, el tratamiento biológico puede llevarse a cabo mediante dos procesos distintos, tratamiento aerobio y anaerobio (McDougall y otros, 2004).

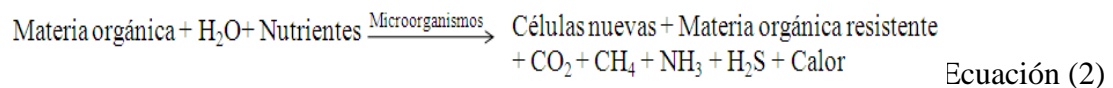
- Tratamiento Aerobio

Los organismos aerobios requieren de oxígeno molecular para utilizarlo como receptor de electrones externos en el metabolismo respiratorio; esto conlleva a tasas de crecimiento rápidas y rendimientos celulares altos, descritos por la siguiente ecuación (Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994)



- Tratamiento Anaerobio

Los organismos se desarrollan en ausencia de oxígeno y no involucra un aceptor de electrones externo. Debido a que es un proceso fermentativo, de generación de energía menos efectivo, conduce a tasas de crecimiento y rendimientos celulares más bajos, descritos con la siguiente ecuación Tchobanoglous, Theisen y Vigil, 1994):



La utilización del tratamiento biológico tiene diversos objetivos, entre los que se encuentran la reducción de volumen, estabilización, eliminación de patógenos y valoración de los desechos. En el caso de la reducción de volumen, se debe a la producción de metano y/o dióxido de carbono y agua que pueden reflejarse en la descomposición de hasta 75% de los materiales orgánicos en términos de peso seco. Por otra parte, la estabilidad se relaciona de manera inversa con la actividad biológica, la cual es medida por la demanda de oxígeno acumulativa de los materiales orgánicos, la actividad biológica puede disminuir en un factor de 6 aproximadamente durante el tratamiento. En cuanto a la higienización, el tratamiento biológico es efectivo en la destrucción de los organismos patógenos presentes en los residuos, ya que es un proceso

exotérmico (con temperaturas hasta de 60-65°C en el caso aerobio y en el proceso anaerobio de 55°C). Además la condición de ausencia de oxígeno en el caso anaerobio, es suficiente para destruir la mayoría de los organismos patógenos. Finalmente en cuanto a la valorización, el tratamiento biológico genera productos útiles como biogas, energía y compost (McDougall y col., 2004).

Selección del proceso biológico

Los tratamientos aerobios y anaerobios tienen cabida en la gestión de residuos sólidos, ofreciendo distintas ventajas. En general los procesos anaerobios son más complejos que los aerobios. Los procesos aerobios ofrecen la ventaja de un funcionamiento relativamente sencillo, dan como resultado una reducción del volumen de la materia orgánica al operar correctamente. Para una mejor comprensión en la Tabla N° 2 se comparan los procesos aerobios y anaerobios.

Tabla N° 2. Comparación de procesos aerobios y anaerobios

Características	Proceso Aerobio	Proceso Anaerobio	Observaciones
Uso energético	Consumidor neto de energía	Productor neto de energía	Para la obtención del biogás como combustible en el proceso anaerobio es necesario de una mayor tecnología. También debe haber gran control ya que el contenido de CH ₄ en el biogás puede causar contaminación ambiental.
Productos finales	Humus, CO ₂ , H ₂ O	Fangos, CO ₂ , CH ₄	
Reducción de volumen	Hasta 50%	Hasta 50%	
Tiempo de procesamiento	20-30 días	20-30 días	
Objetivo primario	Reducción de volumen	Producción de energía	
Objetivo secundario	Producción de compost	Reducción de volumen, estabilización de residuos	

Fuente: (Tchobanoglous y otros, 1994)

3. COMPOST

El “compost” es un humus elaborado o fabricado por el hombre a través de la técnica de compostaje, presentando sustancias nutritivas, almacenadas en redes vivas de procesos biológicos encadenados, donde la liberación y la fijación de iones se equilibra en una forma continua, de acuerdo al ritmo de crecimiento de cada planta en particular (Suarez, 1981). Es producido mediante la degradación bioquímica de la materia orgánica por la acción microbiana controlada, a partir de desechos orgánicos, los cuales alcanzan un grado de digestión tal que los convierte en un compuesto bioquímicamente inactivo, el cual al ser aplicado en suelos no ocasiona competencia entre sus microorganismos y las plantas (Trejo, 1996).

El compost puede elaborarse de modo aerobio o anaerobio, de modo aerobio descomponiendo la materia orgánica biodegradable de manera controlada a un estado estable, para evitar incomodidad de almacenamiento, manipulación y segura utilización en distintas aplicaciones. De modo anaerobio degradando la materia orgánica, con formación de una mezcla gaseosa de gas carbónico y metano (biogas).

La degradación se hace solo de la fracción orgánica de los desechos sólidos, luego de ser debidamente trituradas para lograr un tamaño de partícula deseado. Aunque la composición de los desechos sólidos domiciliarios depende de la estación del año, características de la localidad, aspectos socioeconómicos y culturales de la población, generalmente un 50% en peso está constituido de materia orgánica, conteniendo desperdicios de cocina, restos de origen animal, vegetal, además de papel cartón y otros materiales proclives a la degradación biológica. Se debe evitar para la mezcla inicial el empleo de carne, pescado, aceites y otros productos animales, que producen malos olores y atraen plagas. También deben evitarse los excrementos de gatos y perros, dada la posibilidad

de contener organismos transmisores de enfermedades, al igual que papel con algunas tintas de color, que puedan contener metales tóxicos (ADAN, 1999).

La aplicación del compost a los suelos mejora las propiedades físicas del suelo, como también la actividad biológica, ayudando en la descomposición de los compuestos minerales insolubles, además de reducir la lixiviación del nitrógeno y fósforo.

Componentes químicos principales del compost

En el proceso de degradación biológica de los desechos orgánicos en condiciones anaerobias, se encuentran compuestos glúcidos y sus derivados, generalmente bajo la forma de diversas celulosas, estos son los más abundantes en la fracción orgánica de los desechos domésticos, los mismos pueden ser divididos en solubles en agua, poco solubles en agua e insolubles en agua.

Entre los compuestos solubles en agua encontramos a los monosacáridos como la glucosa, disacáridos como sacarosa y lactosa. Los hemicelulosos, almidón y materias pépticas, son compuestos más lentos de degradar y forman parte de los pocos solubles en agua, finalmente entre los insolubles en agua está la celulosa (Trejo, 1996).

Otros compuestos orgánicos de los desechos domésticos son las proteínas, las cuales son fuente de nitrógeno, sustancias fermentables como fenoles, antocianinas, alcaloides, terpenos, etc. También se encuentran ligninas que son degradadas junto a la celulosa, en el periodo de maduración a través de reacciones secundarias de condensación y polimerización, dando origen al humus o compost en forma estable y compleja (Trejo, 1996).

Este compost, producto final del proceso, está compuesto por materia orgánica, factor responsable de la fertilidad de los suelos y fuente de energía para los microorganismos que allí habitan. Además en el compost encontramos un aporte de nutrientes minerales, como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio,

magnesio, azufre y micronutrientes, los cuales son utilizados por las plantas (Trejo, 1996).

Etapas del Compostaje:

Soliva (2001) plantea que la biodegradación de la materia orgánica en una pila de compostaje, es un proceso continuo que se lleva a cabo en dos etapas, descomposición y maduración, las cuales se explican a continuación:

Etapas de Descomposición

Aquí se lleva a cabo el fraccionamiento de las moléculas complejas para formar moléculas orgánicas e inorgánicas más sencillas, a través de reacciones exotérmicas debidas principalmente a la actividad biológica. Esta etapa se compone de dos fases, la fase mesófila con temperaturas hasta los 45°C y la termófila con temperaturas que pueden llegar a los 70°C.

Al inicio del proceso, se desarrollan las familias de microorganismos mesófilos, iniciando la descomposición de las moléculas más fáciles de degradar. La actividad de descomposición genera energía liberada en forma de calor, esto se traduce en un incremento paulatino de temperatura. Al avanzar el proceso y variar las condiciones, comienzan la aparición de los organismos termófilos, con una proporcional disminución de los organismos mesófilos. Esta etapa se caracteriza por el elevado consumo de oxígeno y liberación de gran cantidad de energía por la población microbiana. Las sustancias fácilmente degradables como los azúcares, grasas, almidones y proteínas, son rápidamente consumidas, alcanzando elevadas temperaturas que elimina microorganismos patógenos y semillas de malas hierbas, siendo de gran importancia ya que se cumple con unos de los objetivos del compostaje, asegurar la higienización del producto final.

Las proteínas pasan a ser péptidos, aminoácidos y amoníaco, y progresivamente la mezcla se va alcalinizando. En función de las condiciones de temperaturas, humedad y pH, el amoníaco estará en equilibrio con el ion amonio, evitando posibles pérdidas de amoníaco, favorecidas por la aireación y las elevadas temperaturas que se alcanzan. El control del proceso es conveniente, ya que condiciona la fase de maduración e influye en la calidad de producto.

Etapa de Maduración

La etapa de maduración está compuesta de dos fases, una de enfriamiento, con temperaturas que van desde los 40°C a temperatura ambiente y la etapa de estabilización, a temperatura ambiente, caracterizada por una baja actividad microbiana y por la aparición de organismos superiores.

Durante la etapa de estabilización se genera mucho menos calor y el pH se mantiene ligeramente alcalino. Los microorganismos mesófilos y algunos tipos de microfauna colonizan el compost que está parcialmente maduro. También se genera una intensa competencia por el alimento, la formación de antibióticos y la aparición de antagonismos, para finalmente obtener un producto más o menos estable según la duración de la fase.

La maduración suele llevarse a cabo en pilas, sin ser necesario sistemas de aireación, ni frecuencia de volteo, debido que la actividad biológica es reducida y los requerimientos de oxígeno son muy inferiores con respecto a la fase de descomposición. Esto implica que las pilas de maduración pueden ser de mayores dimensiones que las de descomposición. Los requerimientos de espacio menores por la reducción de peso y volumen dado en la etapa de descomposición.

Materiales utilizados para el compostaje

Las diferentes actividades realizadas por el hombre dejan como resultado una cantidad considerable de desechos; en el caso de los desechos de naturaleza orgánica, se encuentran los lodos de plantas de tratamientos de aguas, lodos de procesos agroindustriales, desechos de verduras, hortalizas, frutas y alimentos, los restos de poda de árboles, hojas, ramas, estiércoles de animales, restos de cosechas, en fin, una gran variedad de productos, cada uno con particularidades específicas que ofrecen una serie de ventajas y desventajas al momento de ser utilizados en la elaboración de compost. De esto se deriva la conveniencia de analizar algunos de estos materiales:

Lodos (Barrena, 2006):

De acuerdo al Departamento de Agricultura de la DGA (2001), lodos de plantas de tratamiento (no autorizados en agricultura ecológica), residuos agroindustriales y ganaderos, contienen una gran cantidad de materia orgánica que puede ser usada con fines agrícolas.

En el caso de la depuración de las aguas residuales urbanas produce importantes cantidades de lodos para los que hay que buscar una solución adecuada de eliminación a fin de evitar los riesgos de infección y contaminación que su acumulación origina. Debido a su elevado contenido de materia orgánica y la no despreciable cantidad de algunos elementos nutritivos, permiten su utilización en agricultura como fertilizante órgano-mineral. Dicha utilización puede ir precedida del compostaje de los lodos junto a otros residuos como por ejemplo virutas de aserrín y residuos de poda.

Residuos sólidos urbanos (RSU)

Los residuos sólidos urbanos son algo más que los generados a nivel doméstico, ya que se ha de incluir el conjunto de otras actividades que los producen dentro del ámbito urbano, tales como: residuos domiciliarios,

comerciales y de servicios, limpiezas varias (zonas verdes, recreativas y espacios públicos), abandono de muebles y enseres, industriales y de la construcción.

Para el caso de los RSU, se requieren que la fracción orgánica sea separada de los materiales inertes, en general, todos requieren una reducción de tamaño y algunos un acondicionamiento químico biológico antes de su incorporación al suelo como compost. Esta fracción de material orgánico constituye alrededor de un 20 a un 50% de los desechos sólidos urbanos en países industrializados. En países en desarrollo, por otra parte, los desechos orgánicos pueden representar aproximadamente entre un 40 a un 85% de los residuos sólidos urbanos (Lardinois y Van de Klundert, 1994). Para Venezuela se ha señalado un valor de 70,42% (Sánchez, 2000).

La aplicación de compost de RSU ha estado muy limitada, la razón de mayor peso es la gran cantidad de material biológicamente no degradable, como por ejemplo plástico y a veces metales pesados (Chanyasak y Kubota, 1983).

Según Rivero (1999) el compost producto de los RSU puede presentar ciertas características (ver la Tabla N°3), encontrando algunas variables físico químicas acotadas en intervalos.

La calidad del compost de RSU, está definida en muchos aspectos por la utilización de un sustrato original idóneo, lo que se consigue mediante recolección selectiva, buen preprocesado y acondicionamiento del producto final (Dobao, Benítez y González, 1998). El principal problema de la recolección selectiva es la cooperación de los ciudadanos, así como la decisión de las autoridades en solventar estas limitantes.

Tabla N° 3. Composición de compost de residuos sólidos urbanos, intervalos para cada variable.

Variable	Rango
Materia orgánica (g/kg)	200-600
Ácidos húmicos (g/kg)	6-70
Ácidos fúlvicos (g/kg)	1-100
Nitrógeno total (%)	0,4-1,8
N-nítrico (g-1)	0-70
N-amoniaco (g-1)	0-30
Fósforo total (%)	0,15-0,50
Azufre total (%)	0,3-0,9
Potasio (%)	0,25-1,00
Calcio (%)	2-12
Magnesio (%)	0,5-2,5
pH	7,0-8,5
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	6-15
Densidad aparente (g/ml)	0,5-0,7

Fuente: (Rivero, 1999)

Residuos animales

Uno de los residuos animales más utilizados en la producción de compost es el estiércol vacuno. Según el Departamento de Agricultura de la DGA (2001) señala que el estiércol de vacuno es un material rico en nitrógeno y muy húmedo; la humedad y relación C/N de este compost dependerán de la cantidad de cama utilizada, de las prácticas de manejo, del tipo de operación y del clima. Generalmente, el estiércol requiere ser mezclado con materiales secos y ricos en carbono (tales como el aserrín, las hojas y las astillas de madera), con frecuencia son necesarios de dos a tres volúmenes de material seco por volumen de estiércol. Su elaboración tiene un bajo riesgo en la producción de olores, se descompone rápidamente y el compost obtenido resalta en su potencialidad de retener humedad (DGA, 2001).

Otro método ha sido la aplicación directa del estiércol de diversos orígenes, esto ha sido una práctica tradicional en Venezuela, existiendo algunas zonas agrícolas importantes (algunos estados Centro-Occidentales y los Andes) donde se usa combinado con los fertilizantes químicos (Luque, 1992).

Otros

Es el caso de los materiales de desecho líquidos, los cuales se recomienda la fermentación anaerobia para producción de biogas, que es una tecnología con frecuencia utilizada de forma previa al compostaje (Menoyo, 1995). Elementos tales como derivados del petróleo, que son similares a las sustancias naturales en su estructura y son biodegradables (Pagga, 1999).

También encontramos suelos contaminados, que mediante de una tecnología "*in situ*", como el compostaje en biopilas, los cuales se agregan por materia orgánica, cortezas de madera picadas como agente voluminoso a una serie de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo. Habiendo experiencias donde los resultados indicaron que durante el compostaje, la mayor disminución de la concentración de los materiales estudiados le ocurrió al aceite mineral. Degradando dos terceras partes del aceite mineral original (Jorgensen, Puustinen y Suortti, 2000).

Métodos de compostaje

El compostaje entendido como un proceso de oxidación biológica exotérmica de la materia orgánica que ocurre por una dinámica y rápida sucesión de poblaciones de microorganismos aerobios (Iglesias y Pérez, 1992). Que abarca un adecuado manejo y tratamiento de los desechos sólidos, como parte de una concepción sistémica del origen y utilización de los desechos sólidos, convirtiéndolo en un método de recuperación y reciclaje de desechos orgánicos (Campos, Lugo y Gitscher, 1998). Tiene como finalidad facilitar el control y la optimización de parámetros operacionales para obtener un producto final con la suficiente calidad, tanto desde el punto de vista sanitario como de su valor fertilizante (Departamento de Agricultura de la DGA, 2001).

El compostaje puede llevarse a cabo por diversos sistemas, pudiéndose clasificar en dos grupos: abiertos y cerrados.

Sistemas abiertos

Son sistemas tradicionales de compostaje, los sustratos a procesar se disponen en montones o pilas que pueden estar al aire libre. La aireación de la masa fermentable puede hacerse por volteo mecánico de la pila o mediante ventilación forzada. Esta última tiene la ventaja de permitir el control del nivel de oxígeno, así como de la humedad y de la temperatura. Los sistemas abiertos más utilizados son: compostaje en pilas estáticas con aireación natural, compostaje en pilas estáticas con ventilación forzada y compostaje en pilas por volteo (Departamento de Agricultura de la DGA, 2001).

Suarez (1981), hace referencia a varias técnicas de elaboración de compost en sistemas abiertos empleadas en la agricultura orgánica, como el método biodinámico, método de la G. G. A. (Good Gardeners Association), método del retorno rápido, método de Jean-Pain, método de compost de algas, método de los catorce días de la Universidad de California, tambores rotatorios, compost de "sabana", compost de "papel y cartón", compost de toilette o W.C. sin agua, compost de "Lombrices de tierra", compost de gallinero y compost de cochineros y potreros. Todos estos métodos son sistemas aerobios, dando una idea de la gran variedad de formas o fórmulas para hacer compost, con la finalidad de aprovechar los desechos existentes y obtener un buen producto final.

A continuación, se describen los sistemas más comunes:

- Pilas estacionarias

El material a degradar no requiere volteo, se le inyecta aire a través del material, la técnica es conocida también como pila estática aireada. Es una red de tuberías de aireación sobre la cual es colocada la fracción orgánica de los desechos domésticos, colocados en pilas de aproximadamente 2 a 2,5 m de altura. La inyección de aire es controlada por cronómetro o una computadora,

que controla un perfil específico de temperatura. El material es fermentado por tiempo de tres a cuatro semanas, para luego curar el material durante cuatro semanas más. Con frecuencia es colocado encima de la pila compost curado para el control de los malos olores.

- Pila agitada

El material se mueve periódicamente para introducir oxígeno, controlar la temperatura y mezclar el material con el fin de obtener un producto uniforme (ver Figura N°1). Éste es mejor conocido como la técnica de hilera, donde el material orgánico es triturado y cribado para obtener un tamaño aproximado de 2,5 a 7,5 cm y contenido de humedad ajustado entre 50 y 60%, luego es colocado en hileras de normalmente 2 a 2,3 m de altura por 4,5 a 5 m de ancho. Es volteado hasta dos veces por semana mientras se mantiene la temperatura en un poco más de 55°C, donde luego del periodo de volteo, el compost es curado tres o cuatro semanas más sin volteo.

Una variante de esta técnica es el método de los catorce, basándose en el uso de materia orgánica desmenuzada y molida en pequeños trozos, con una aireación frecuente de la pila. Los materiales finamente picados promueven la multiplicación de los microorganismos, debido al aumento de superficie expuesta a su acción. La aireación resulta más fácil por el poco peso de los materiales. El aporte frecuente de oxígeno, permite la multiplicación y acción rápida de la bacterias anaerobias. Se incrementa y acelera la aireación, volteando la pila por primera vez, a los tres días, revolviendo bien los materiales, para luego continuar aireando cada dos días.

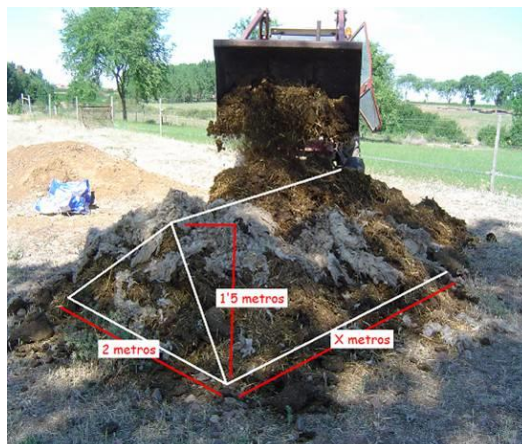


Figura N° 1. Muestra de pila agitada (Asociación Colectivo para el Desarrollo Rural de Tierra de Campos, s,f)

Sistemas cerrados

En estos sistemas la fase inicial de fermentación se realiza en reactores que pueden ser de dos tipos: horizontales o verticales, mientras que la fase final de maduración se hace al aire libre o en naves abiertas (Departamento de Agricultura de la DGA, 2001).

En los últimos 15 años se han desarrollado diversas tecnologías para estabilizar los desechos orgánicos municipales. Una de las alternativas manejables en cuanto al tratamiento y aprovechamiento de los desechos sólidos podría ser la condición de digestión en operación por carga (esta tecnología ha sido ampliamente difundida en la India y en China), pero cuando nos enfrentamos a la magnitud de la generación de desechos sólidos a sanear de origen municipal, la escasa eficiencia de estos sistemas impide su utilización (Taylhardat, 1999).

Los reactores de efluentes convencionales, presenta ventajas en su diseño ingenieril, las cuales se demuestran con pruebas de adecuada respuesta; sin embargo, la digestión anaerobia de alta tasa de desempeño, sólo se logra cuando los tiempos de retención son muy cortos (menores o iguales a un día) y esto se consigue únicamente cuando se puede ejercer la retención de la biomasa. Así

mismo, la condición de degradación en estos reactores, se basa en que la concentración de sólidos en suspensión sea relativamente baja, lo cual obliga a una elevada dilución. Esto es una disyuntiva, debido a que los sustratos son de alta concentración de sólidos, lo que ha generado diversas tendencias tecnológicas en búsqueda de buenas eficiencias.

Básicamente los reactores de efluentes convencionales, son estructuras por lo general metálicas: cilíndricas o rectangulares, donde se mantienen controlados determinados parámetros (humedad, aireación), los cuales permanecen en forma relativamente constante. Los reactores móviles además, posibilitan la mezcla continua de los desechos mediante dispositivos mecánicos, con lo que se logra un proceso homogéneo en toda la masa en compostaje. Este tipo de sistemas, permite acelerar las etapas iniciales del proceso, denominadas incorrectamente "fermentación". Finalizadas estas etapas activas biológicamente, el material es retirado del reactor y acopiado para que se cumpla la "maduración". Los sistemas de compostaje en reactores son siempre sistemas industriales. Se aplican en aquellas situaciones donde diariamente se reciben volúmenes importantes de desechos, y para los cuales sería necesario disponer de superficies muy extensas. Tal es el caso de las grandes plantas de tratamiento y selección de RSU., donde a partir de la fracción orgánica recuperada de este tipo de residuos se produce compost en forma industrial (Sztern y Pravia, 1999).

Lombricultura

Esta técnica también se conoce con el nombre de vermicompostaje y las lombrices son empleadas en la fase de maduración. Por sí solas no pueden elevar la temperatura para permitir el desarrollo de la fase termófila, dado que los principales agentes de esa fase inicial son las bacterias. El procesamiento por estos organismos del producto en la fase de maduración, permite teóricamente una humificación más elevada y la obtención de un producto de mayor calidad.

Sin embargo, los requerimientos de producción y procesamiento se incrementan considerablemente. Se puede necesitar un espacio cuatro veces mayor y el doble de tiempo y además se debe vigilar que las condiciones sean apropiadas para el desarrollo de las lombrices. De hecho el elevado número de estos productos que surgieron en el mercado hace algunos años se caracterizaba en líneas generales por presentar unos precios muy elevados que difícilmente podían ser competitivos (Menoyo, 1995).

Las lombrices son seres saprófagos, es decir, que se alimentan de materia orgánica en descomposición. Para su desarrollo, debe vigilarse principalmente la temperatura (15 a 23°C), el pH (7) y la humedad (40%). En condiciones óptimas la lombriz come una cantidad equivalente a su peso cada día. Pero más importante que su capacidad devoradora es que excreta un "estiércol", como resultado de su actividad sobre la materia orgánica en descomposición, de alta calidad como fertilizante y que puede mejorar la calidad de las tierras. La composición química del producto final o vermicompost, dependerá del tipo de residuos que la lombriz haya tenido como alimento (Del Val, 1998).

4. PARAMETROS DE PROCESO Y VARIABLES DEL PROCESO

El proceso de compostaje es realizado por microorganismos y aquellos factores que puedan limitar su desarrollo serán limitantes del proceso. Esta transformación se realiza en condiciones controladas (aeróbicas y termófilas) necesarias para el desarrollo de microorganismos, su debido control da información sobre la evolución del proceso, además de dar herramientas para la corrección de cualquier desviación.

Para esta investigación se toma en consideración que los parámetros son aquellos factores que serán observados y medidos para determinar el efecto de las variables, variables las cuales son aquellas características o propiedades que

se supone son la causa del fenómeno estudiado y serán las manipuladas durante la investigación.

Temperatura

Es consecuencia del tipo de proceso e indicador de su funcionamiento. El incremento de la actividad biológica genera calor, retenido en una masa autoaislante de residuos, provocando un incremento general de la temperatura. Como se puede observar en la Figura N°2, el incremento de temperatura en la primera parte del compostaje indica la presencia de materiales fácilmente biodegradables y una condición de trabajo adecuada, para el desarrollo correcto del proceso. Las moléculas orgánicas contienen energía almacenada en sus enlaces, liberada cuando la molécula se degrada y se transforma en una más sencilla.

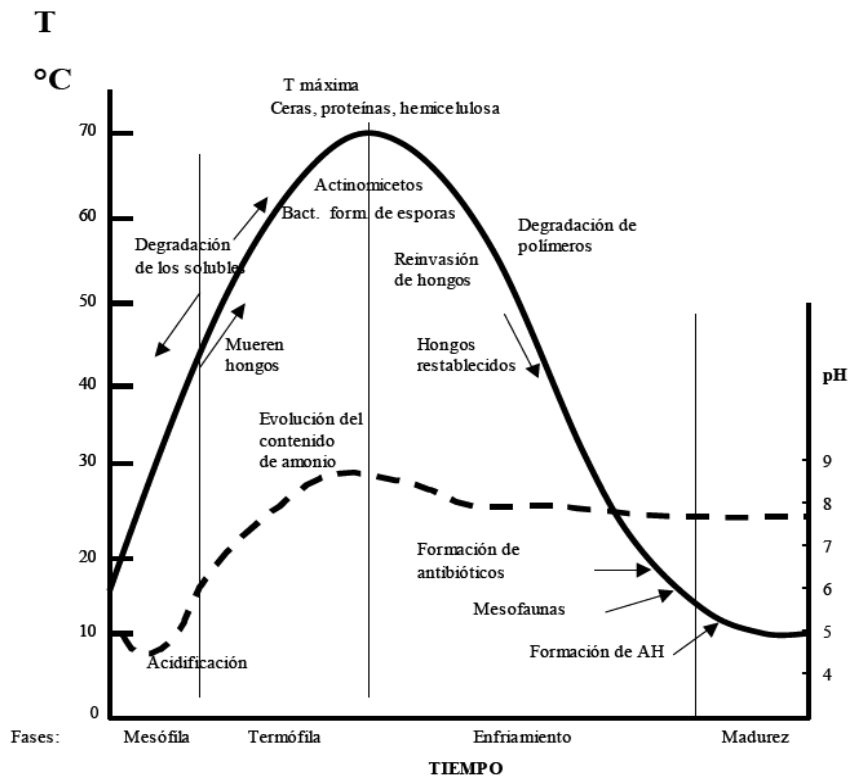


Figura N° 2. Evolución de la temperatura (—) y pH (- - -) durante las diferentes etapas del compostaje. Fuente. (Departamento De Agricultura de la DGA, 2001)

Los cambios de temperatura durante la evolución del proceso proporcionan información directa del funcionamiento del mismo, estos pueden verse en la Figura N°3, que muestra el registro de la temperatura en experiencias anteriores. También es posible definir cada fase del proceso a través de un perfil de temperatura (ver Figura N°2). El mantenimiento de temperaturas elevadas asegura la higienización del material, pero pueden presentar problemas de inhibición de la actividad de la mayoría de los microorganismos si estas son muy altas. Siendo necesario conseguir el equilibrio entre la máxima higienización y la biodegradación.

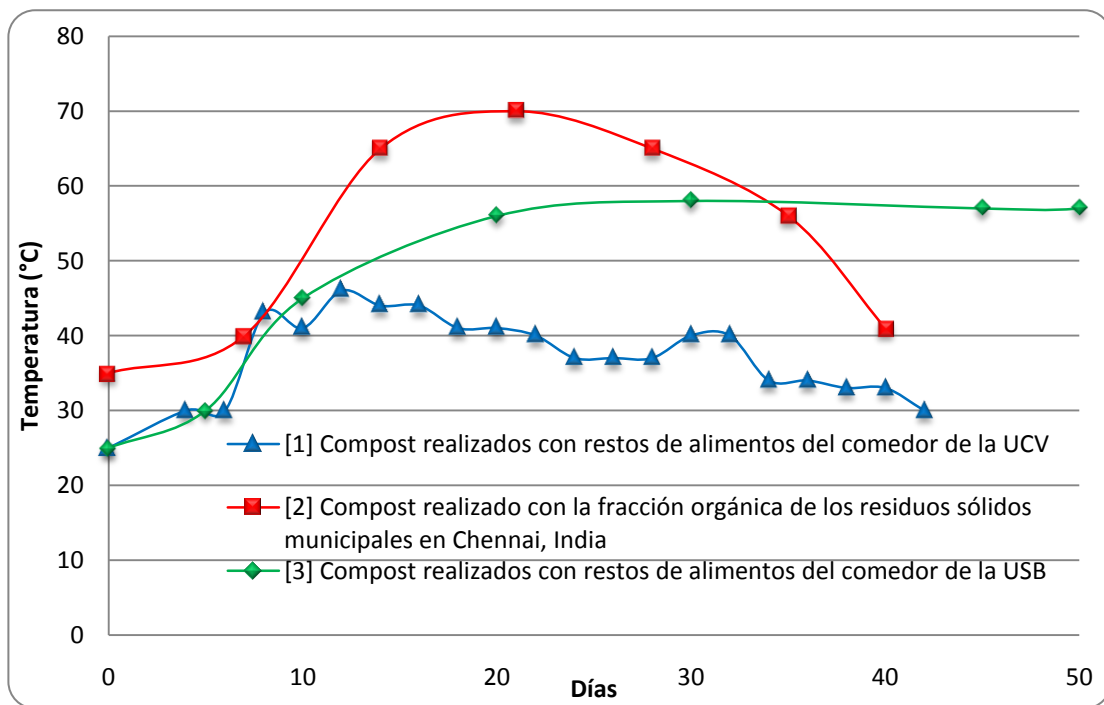


Figura N° 3. Perfiles de temperaturas en varios compost durante su proceso de compostaje.
Fuente: ([1] Carolla, 2006), ([2] Elango, Thinakara, Panneerselvam y Sivanesan, 2009) y ([3] Villalba, 2005).

La higienización llevada a cabo por la temperatura a través de la destrucción de organismos patógenos, también depende del tiempo, debido a que la tasa de mortalidad está en función de ambas variables, en la Tabla N°4 se resumen algunos datos sobre los puntos de muerte de organismos patógenos,

según la normativa específica para el control de patógenos impuesta por la Agencia para la Protección Ambiental (EPA) (Tchobanoglous y otros, 1994).

Tabla N° 4. Temperatura y tiempo de exposición necesario para la destrucción de algunos patógenos y parásitos comunes

Organismo	Observaciones
Salmonella typhosa	Sin crecimiento por encima de 46°C, muerte dentro de 30 minutos entre 55-60°C y dentro de 20 minutos a 60°C, destruida en un ambiente de compost.
Salmonella sp.	Muerte dentro de 1 hora a 55°C y alrededor de 15-20 minutos a 60°C.
Shigella sp.	Muerte dentro de 1 hora a 55°C.
Escherichia coli	La mayoría mueren alrededor de 1 hora a 55°C y en 15-20 minutos a 60°C.
Entamoeba histolytica cyts	Muerte en pocos minutos a 45°C y en segundos a 55°C.
Taenia saginata	Muerte dentro de pocos minutos a 55°C.
Trichinella spiralis larva	Muere rápidamente a 55°C e instantáneamente a 60°C.
Brucella abortus o Br. Suis	Alrededor de 3 minutos muere entre 62-63°C y en 1 hora a 55°C.
Micrococcus pyogenes var. Aerus	Muerte dentro de 10 minutos a 50°C.
Streptococcus pyogenes	A 54°C muere en 10 minutos.
Mycobacterium tuberculosis var. Hominis	Entre 15 a 20 minutos muere a 66°C o luego de calentamiento momentáneo a 67°C.
Coryne bacterium diphtheriae	Dentro de 45 minutos muerte a 55°C.
Nacator americanus	Muerte alrededor de 50 minutos a 45°C.
Ascaris lumbricoides huevos	En menos de una hora muere a temperaturas encima de 50°C.

Fuente: (Tchobanoglous y otros, 1994)

Se considera que la mayor diversidad microbiana se consigue entre 35°C y 40°C, la máxima biodegradación entre 45°C y 55°C; y superando los 55°C la higienización (Soliva, 2001). Solo puede controlarse la temperatura de manera indirecta, variando la frecuencia de volteo, basándose en las mediciones de temperatura. En general, la temperatura de la pila disminuye de 5 a 19°C

después del volteo, pero pasadas unas horas volverá a su nivel anterior (Tchobanogluos y otros, 1994).

La temperatura alcanzada en cada etapa depende de la energía desprendida, de las pérdidas (convección, radiación y conducción) y de la capacidad de almacenar calor (relacionado con el calor específico y la conductividad térmica del material), que afecta sobre todo cuando el desprendimiento de energía es bajo. El contenido de humedad y la cantidad de material mineral intervienen en el mantenimiento de la temperatura en las últimas fases del proceso gracias a su elevada capacidad de almacenar calor (Soliva, 2001).

pH

El valor de pH es el parámetro que condiciona la presencia de microorganismos, debido a que los valores extremos son perjudiciales para determinados grupos. Al inicio es necesaria una población microbiana variada, posible al trabajar con un pH cercano a siete (ver Figura N°2). Un pH extremo no es impedimento para el proceso, aunque dificulta su puesta en marcha, el tipo de reacciones y la velocidad, si bien con el tiempo aparece una cierta capacidad amortiguadora del residuo causada por la formación de dióxido de carbono y amoníaco (Soliva, 2001).

Además de condicionar la población microbiana, éste es también un indicador de la evolución del proceso (ver Figura N°2). Al inicio el pH puede disminuir debido a la formación de ácidos libres, pero en el transcurso del proceso aumenta por el amoníaco desprendido en la descomposición de proteínas. Al mismo tiempo, subidas bruscas de pH pueden facilitar la liberación de nitrógeno amoniacal, ya que un pH básico extremo afecta a los equilibrios acido-base que influye en la conservación de nitrógeno.

Una reducción de pH en algún momento del proceso puede indicar que se han producido condiciones anaerobias. Los microorganismos en ausencia de oxígeno producen ácidos de cadena corta como producto metabólico, acidificando el medio.

La evolución del proceso puede observarse en la Figura N°4, la cual es un registro de experiencia realizadas anteriormente, que describen el comportamiento anteriormente mencionado.

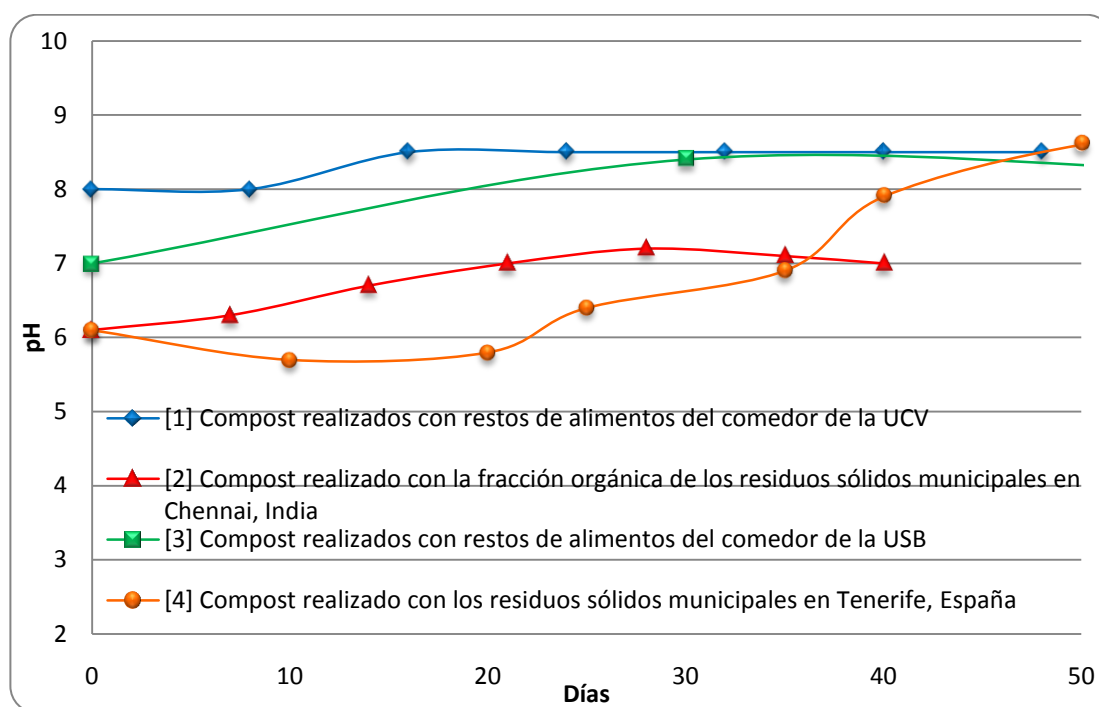


Figura N° 4. Valores de pH en diferentes compost durante el proceso de compostaje. Fuente: ([1] Carolla, 2006), ([2] Elango y otros, 2009), ([3] Villalba, 2005) y ([4] Iglesias y Pérez, 1991).

Conductividad eléctrica (CE)

La medida de conductividad eléctrica da una idea del contenido de iones en el compost. Este parámetro sufre un aumento conforme avanza el proceso de compostaje (ver Figura N°5), debido a la liberación de iones que tiene lugar al producirse la biodegradación de la materia orgánica (García, 1990).

La conductividad eléctrica depende de los materiales de partida usados al elaborar el compost, se debe ser más o menos exigente con su valor en función del uso que se dará al producto. No sería lo mismo confeccionar compost para ser incorporado al suelo como fertilizante, que como sustrato de plantas hortícolas producidas en alvéolos o contenedores. Lo deseable en el caso de compost es que se encuentren entre los 1.500-2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Departamento de Agricultura de la DGA, 2001).

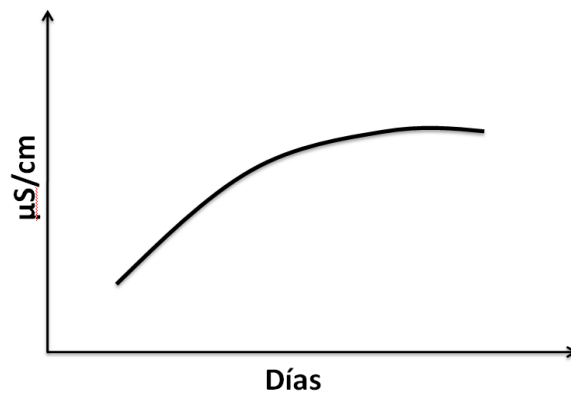


Figura N° 5. Tendencia evolutiva de la Conductividad Eléctrica (CE). Fuente. (ADAN, 1999)

En la Figura N°6 se observa la evolución de CE en el proceso durante experiencia anteriores, la cual se apega al comportamiento antes descrito.

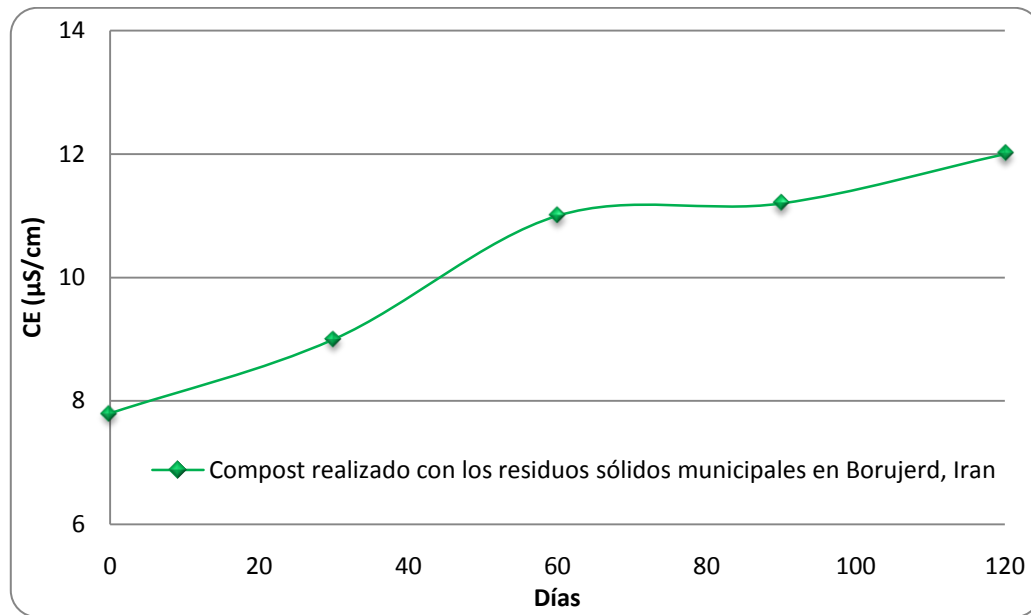


Figura N° 6. Valores de CE de un compost durante el proceso de compostaje. Fuente: (Rasapoor y col., 2009).

Humedad

La capacidad de retención de agua que presenta la materia orgánica (hasta 20 veces su peso en agua), es de importancia debido a que los distintos metabolismos microbianos deben ocurrir en la fase acuosa, solo utilizan las moléculas disueltas en agua. Además el agua favorece la migración y colonización microbiana (García, 1990).

La humedad baja, reduce la velocidad del proceso incluso llegando a detenerse. La actividad biológica comienza a disminuir a niveles de humedad del 40% (Haug, 1993) y a menores del 20% no existe prácticamente actividad. Por el contrario una humedad alta, origina la disminución de la transferencia de oxígeno, siendo éste insuficiente para la demanda metabólica, reduciendo la actividad microbiana aeróbica. Este hecho provoca la aparición de malos olores, la generación de lixiviados y la pérdida de nutrientes. El rango óptimo de humedad está entre un 40-60%, siendo éste variable según la naturaleza del

material. Como ejemplo se presenta la Figura N°7, la cual muestra la evolución del proceso en una experiencia.

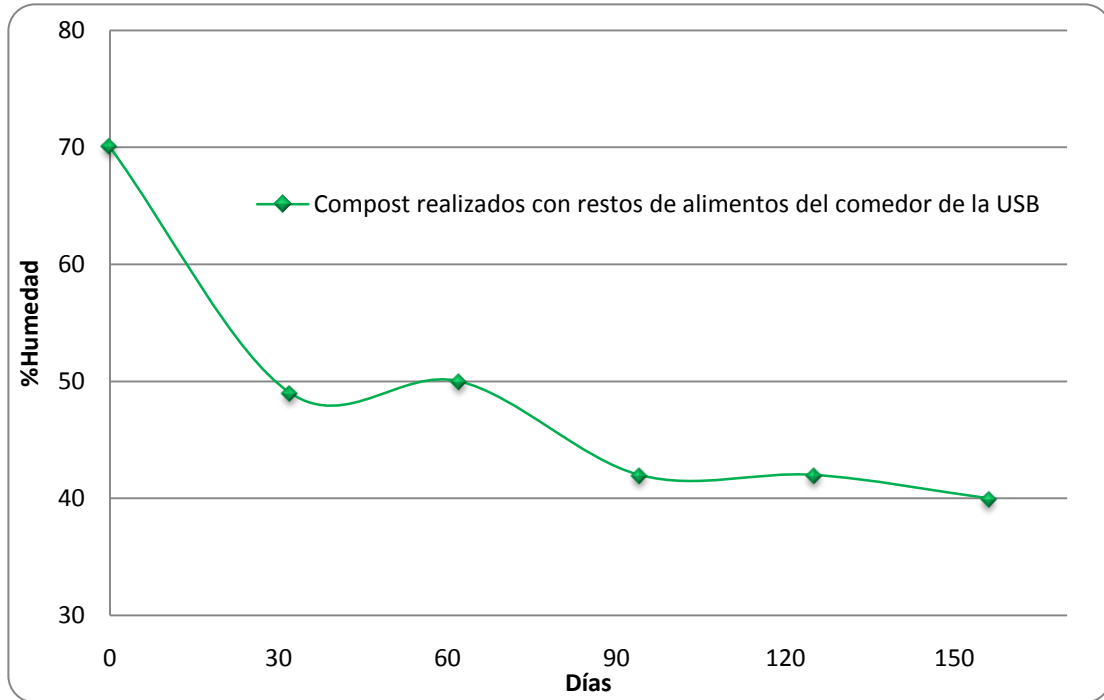


Figura N° 7. Porcentaje de humedad de un compost durante el proceso de compostaje. Fuente: (Villalba, 2005).

Como se observó anteriormente, durante el proceso, el contenido en agua disminuye (ver Figura N°8) a causa del calor generado por el propio proceso. La evolución de éste parámetro también es indicador del funcionamiento del proceso. Aunque la humedad debe mantenerse adecuada para la supervivencia de los microorganismos, al final del proceso debe conseguirse una disminución suficiente para el fácil manejo del producto.

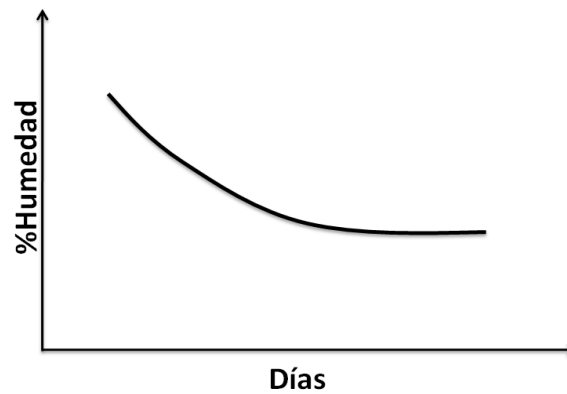


Figura N° 8. Tendencia evolutiva del Porcentaje de Humedad. Fuente. (ADAN, 1999)

Tamaño de partícula

Las velocidades de las reacciones bioquímicas durante el proceso de degradación aerobio, son incrementadas cuando existe un tamaño de partícula reducido que forma una masa homogénea, ya que aumenta la superficie disponible para el ataque de los microorganismos. Sin embargo, se disminuye la permeabilidad de la masa, dificultando la aireación, mientras más fina sea la partícula. Requiriendo entonces aire a presión, además de los volteos, debido a que la difusión natural de oxígeno es más lenta a la necesaria por los microorganismos, disminuyendo la velocidad de descomposición.

El tamaño deseado del producto final es generalmente menor de 5 cm. El tamaño de la partícula a degradar está controlado en parte por los requisitos del producto final y por consideraciones económicas, pero éste no debería ser menor a 5 cm, aunque depende de la posibilidad de biodegradación total, por lo que el tamaño puede ser un poco mayor (Tchobanoglous y otros, 1994).

Aireación

Según Barrena (2006) es imprescindible al ser el proceso aerobio, que el contenido de oxígeno del aire en la matriz del residuo no debe situarse nunca por debajo del 5 o 7%. Los microorganismos consumen oxígeno durante la degradación del material, el cual debe ser repuesto, ya que es fundamental para

mantener las condiciones anaerobias. Esta variación de oxígeno puede modificar el comportamiento de los microorganismos, como se puede observar en la Figura N°9, donde un compost elaborado con desechos orgánicos es sometido a diferentes tasas de aireación y según el caso, se promueve la llegada a la etapa termófila con mayor rapidez y con una mayor permanencia en esta.

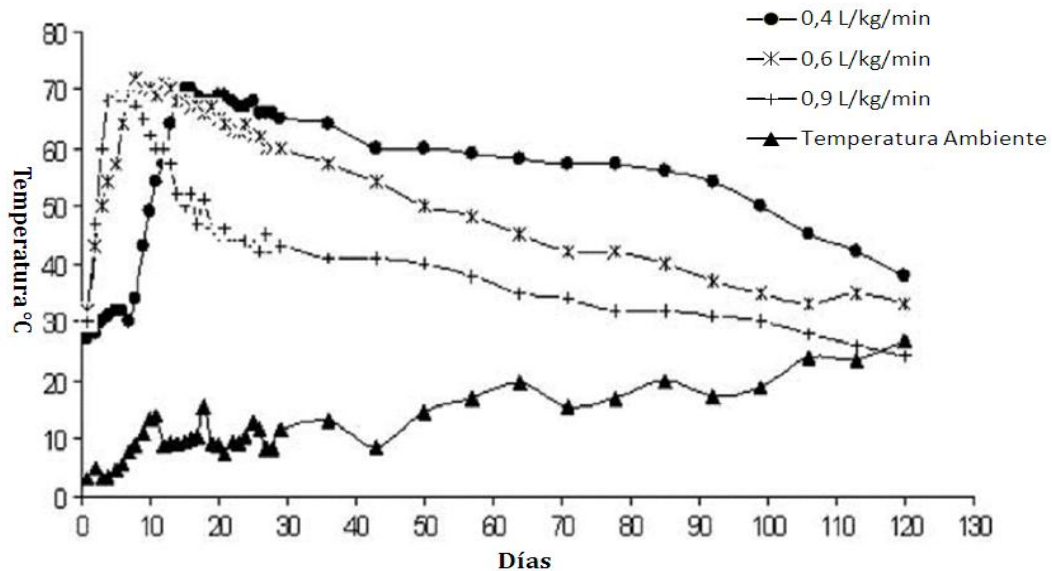


Figura N° 9. Variación de temperatura versus tiempo de compostaje. Fuente: (Rasapoor y otros, 2009).

La aireación no solo favorece la actividad de los microorganismos aerobios, al suministrar oxígeno, también regula el exceso de humedad por evaporación y mantiene la temperatura adecuada. Ésta se relaciona ampliamente con la temperatura, interviniendo en la generación o pérdida de calor. Genera desprendimiento de energía y como consecuencia aumento de la temperatura, al incrementar la actividad de los microorganismos. Favorece el enfriamiento al renovar aire caliente por frío y puede provocar una pérdida de humedad, frenando el proceso al provocar una bajada de temperatura.

El suministro de oxígeno al material en descomposición se realiza mediante los volteos o por sistemas de aireación, pero éste también puede

producirse de forma natural por ventilación pasiva cuando la mezcla tiene una porosidad y una estructura que favorece el intercambio de gases por fenómenos físicos: difusión, evaporación y diferencias de temperatura. En el caso del compostaje en pilas, el llamado efecto chimenea tiene un papel importante en la reducción del contenido en agua, como en la renovación de aire dentro de esta. Como se observa en la Figura N°10 el aire en el interior de la pila se calienta y se satura en agua, desplazándose hacia arriba por efecto de su menor densidad y provocando un ligero vacío que produce la entrada de aire fresco del exterior.

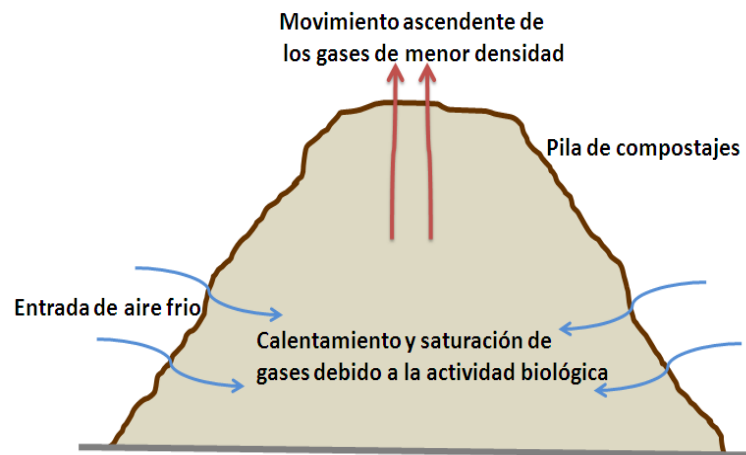


Figura N° 10. Efecto Chimenea. Fuente. (Haug, 1993)

El volteo no es eliminado incluso al disponer un buen sistema de aireación forzada, debido a los beneficios de homogenización del material y la redistribución de los microorganismos, la humedad y los nutrientes, a la vez que reduce el tamaño de las partículas y expone nuevas superficies al ataque de microorganismos. Debe tenerse en cuenta que si se voltea mucho se favorece el enfriamiento de la pila, también la pérdida de humedad y las emisiones de nitrógeno en forma de amoníaco.

Relación carbono-nitrógeno

La relación carbono nitrógeno es un factor importante, debido a que una adecuada fuente de estos elementos permite el crecimiento de los

microorganismos presentes en la mezcla. Generalmente, los residuos aportan suficientes nutrientes y oligoelementos, pero se debe asegurar la presencia de aquellos que se necesitan en más cantidad, como el caso del carbono y el nitrógeno. La relación ideal de estos elementos debe ser aproximadamente treinta partes de carbono a una parte de nitrógeno por peso seco, debido a consideraciones metabólicas de los microorganismos, permitiendo un proceso de degradación rápido y eficiente. Ya que a relaciones altas de C/N el proceso se hace lento y a relaciones bajas provocan la pérdida de nitrógeno.

Es el criterio tradicionalmente utilizado para la determinación de la estabilidad de un compost. Si bien puede presentar alguna dificultad en la selección de muestras lo suficientemente homogéneas, la determinación del mismo es relativamente sencilla y rápida. Por lo general, un compost se considera maduro cuando su relación C/N en fase sólida es menor de 20 y lo más cercano a 15, aunque en la práctica dicho valor puede ser superior (ver la Figura N°11), ya que gran parte del carbono orgánico, al encontrarse en formas resistentes como son celulosa o lignina, no puede ser utilizado de inmediato por los microorganismos.

Es importante una combinación apropiada de los desechos, debido que la materia orgánica sirve de alimento a los microorganismos, desarrollando tejido celular a partir del nitrógeno, fósforo, algo de carbono y otros nutrientes. Siendo el carbono fuente de energía para los microorganismos y es expulsado como dióxido de carbono (Tchobanoglous y otros, 1994).

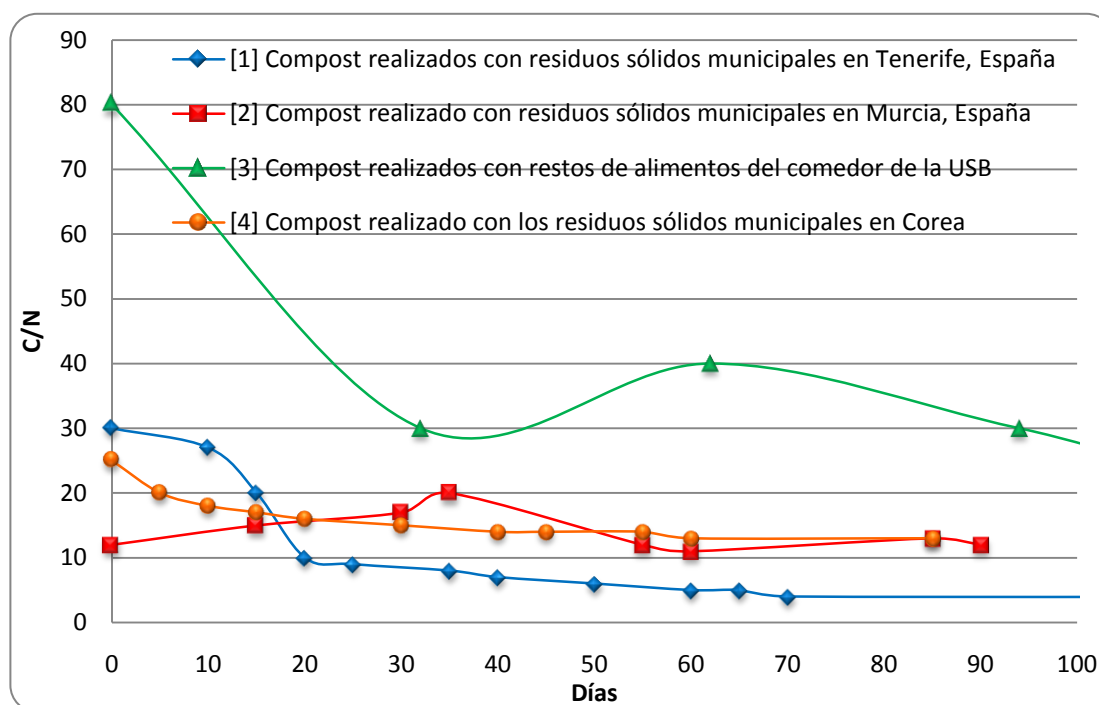


Figura N° 11. Relación C/N en varios compost durante su proceso de compostaje. Fuente: ([1] Iglesias y Pérez, 1991), ([2] García, 199), ([3] Villalba, 2005), ([4] Lee, Kim, y Chang, 2002)

La relación C/N tiene importancia en las condiciones de inicio del proceso de compostaje y en su cinética, como también en el desarrollo de las fases de descomposición y maduración. Al inicio del proceso una relación adecuada es clave para la conservación del nitrógeno como se puede ver en la ver Tabla N°5 (Soliva, 2001).

Tabla N° 5. Influencia de la relación C/N sobre la conservación de nitrógeno

C/N inicial	%N conservado respecto al inicial
20	61,2
22	85,2
30	99,5
35	99,5

Fuente: (Soliva, 2001)

Esta relación en los residuos puede ser ajustada mezclándolo con otro residuo de características complementarias. No obstante, es importante tener en cuenta la relación C/N real disponible para los microorganismos, debido que en algunas ocasiones se puede cometer el error de añadir un material

complementario que en la práctica no aumente la relación. Esto ocurriría por ejemplo, si se utiliza un material con alto contenido de carbono de difícil degradación (celulosas y ligninas) para aumentar la relación C/N de un material rico en nitrógeno.

La mezcla de desechos tales como: aserrín, vegetales, frutas y recortes de césped, pueden considerarse una buena combinación para realizar compost, con una relación aceptable o cercana a los valores recomendados, esto puede verse en la Tabla N° 6.

Tabla N° 6. Relaciones C/N nominales de materiales compostables seleccionados (base seca)

Material	Relación C/N
Aserrín	200-750
Vegetales	11-13
Frutas	20-49
Restos de Jardín	20-1

Fuente: (Tchobanoglous y otros, 1994. Tchobanoglous y Kreith 2002)

Además la relación C/N también puede ser considerada como un factor indicativo en la evolución del proceso, desde el inicio hasta obtener el producto final esta relación disminuye progresivamente, debido al mayor consumo de carbono por los microorganismos, pues se considera que utilizan entre 15 a 30 partes de carbono por una de nitrógeno (Soliva, 2001), tal como lo indica la Figura N°12.

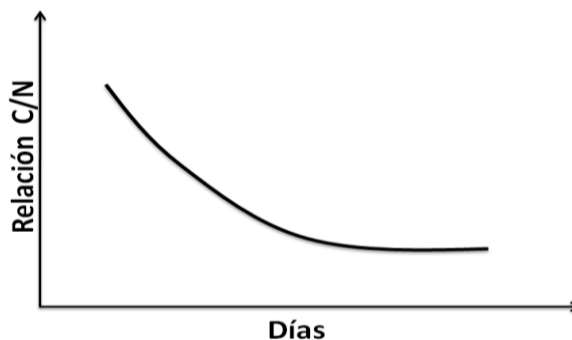


Figura N° 12. Tendencia evolutiva de la Relación Carbono-Nitrógeno (C/N). Fuente. (ADAN, 1999)

El seguimiento de algunas formas de nitrógeno puede proporcionar información del proceso sobre posibles pérdidas de nitrógeno. La mayoría del nitrógeno en el material a compostar es de origen orgánico, principalmente como parte de la estructura de proteínas y péptidos simples. Como se puede ver en la Figura N°13, parte de este nitrógeno orgánico se mineraliza en amoníaco mediante reacciones de amonificación, resultado de la actividad microbiana. El amoníaco formado puede tomar diferentes caminos según el desarrollo del proceso. En disolución, en forma de N-NH_4^+ , puede ser inmovilizado por los microorganismos, utilizando el nitrógeno como fuente de alimento y transformándolo de nuevo en nitrógeno orgánico. También pueden producirse pérdidas de amoníaco al volatizarse como ocurre cuando se alcanzan altas temperaturas y valores de pH por encima de 7,5 (Sánchez-Monedero, Roig, Paredes y Bernal, 2001). Por último, el N-NH_4^+ puede ser transformado en N-NO_3^- por bacterias nitrificantes cuando la temperatura del proceso se encuentra por debajo de los 40°C y bajo condiciones de aireación favorables.

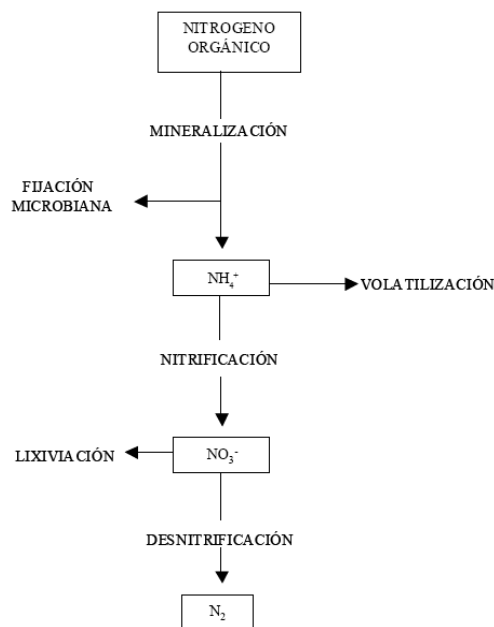


Figura N° 13. Transformaciones de los compuestos nitrogenados durante el proceso de compostaje. Fuente. (Pascual, 1992)

Al inicio del proceso, el contenido del nitrógeno amoniacal puede ser alto según los materiales tratados, incluso aumentar durante la fase termófila. Pero si la mezcla inicial y el desarrollo del proceso son correctos puede disminuir, incrementándose a su vez el contenido de $N-NO_3^-$ durante la última fase de maduración, siempre y cuando se hayan mantenido las condiciones aerobias (Soliva, 2001).

Color

Durante el proceso de compostaje, el material sufre un proceso de oscurecimiento o melanización hasta transformarse en un producto oscuro. Aunque los mecanismos del proceso citado no son bien conocidos, en ellos se incluyen reacciones de humificación, tipo amino carbonilo y tipo Maillard (reacciones entre azúcares y aminoácidos), sin descartar otras reacciones que ocurren a menor temperatura. Por otra parte, la formación de zonas más claras en el interior de la pila indicarían problemas de anaerobiosis durante el proceso de compostaje (Departamento de Agricultura de la DGA, 2001).

Olor

Los materiales orgánicos frescos tienen un olor característico, debido a la fase de descomposición de ácidos orgánicos: ácido acético, propiónico, butírico, etc.; los olores pueden aparecer en el centro de la pila de compostaje bajo condiciones de anaerobiosis, con la consiguiente producción de ácido sulfhídrico, amoníaco y mercaptanos. Los olores "anómalos" desaparecen con la madurez de los productos (Villalba, 2005). El olor de un compost maduro es semejante al de un suelo de bosque (similar al de tierra mojada), y está causado fundamentalmente por los actinomicetos (Costa y otros, 1991).

5. ESTABILIDAD, MADUREZ Y CALIDAD DEL COMPOST

La estabilidad y la madurez son dos propiedades diferentes aunque en ocasiones sean utilizadas indistintamente. La estabilidad definida en términos de

biodisponibilidad de la materia orgánica, refiriéndose a su grado de descomposición, describiendo así las condiciones en las que se encuentra el material. La madurez, sin embargo, depende del uso final que se le vaya a dar al material, requiriendo de una valoración sobre si el compost producido es apropiado o no para el uso que se destina (Cooperband, Stone, Fryda y Ravet, 2003). Esto se pueden enfocar desde un punto de vista agrícola para diferentes usos, estos son clasificados de acuerdo lo planteado por García y Polo (1999) como:

Materia orgánica fresca

Es el material reciente antes de iniciar su descomposición; no se le debe llamar compost. No es deseable su empleo agrícola, pero sirve como sustrato para el compostaje. Desde el punto de vista higiénico interesa decir que es peligrosa para el hombre, animales y plantas, y este peligro persistirá mientras que no sea pretratada.

Compost fresco

Es una materia orgánica que ha pasado por una etapa termófila, tiene una descomposición inicial, pero no está estabilizada. El producto podría ser usado en forma apropiada para mejoras agrícolas (para cultivo de orquídeas). Al añadir productos de este tipo al suelo, la estabilización que necesita su materia orgánica se produce "in situ" con los beneficios consiguientes para la mejora de su estructura, incremento de su actividad microbológica y mineralización de su materia orgánica.

Compost

Este término es sinónimo de compost maduro. Es un compost más estabilizado que el compost fresco y es totalmente adecuado para usos agrícolas como enmendante orgánico, incluso aplicándolo a los suelos cuando se inician

los cultivos. Pero conviene evitar su contacto con las raíces porque puede retardar su crecimiento.

Compost curado

Esta acepción que es poco usada normalmente, correspondería a un compost maduro pero que ha sido sometido a un largo período de humificación y mineralización. El contenido mínimo de humedad para un compost curado debe ser del 35%. Estos materiales pueden emplearse como sustratos que han de tener un contacto directo con el sistema radical; su empleo en cultivos intensivos, de flores, jardinería, etc., es bastante frecuente y sólo superado por el humus natural (Soliva, 2001).

Para determinar la madurez y estabilidad de un compost, se deben considerar una serie de parámetros físicos, químicos y biológicos, tales como los enunciados en la Tabla N^o7.

La calidad final del producto es influenciada por el tipo de materia prima, el tipo de recogida de la materia prima, el desarrollo del proceso y el tipo de tratamiento (tecnología, equipamiento, funcionamiento, organización y seguridad en el trabajo) (Soliva, 2001). Esta se relaciona con el contenido de materia orgánica estabilizada y fitonutrientes, aunque para algunos autores se relaciona mas con la ausencia de contaminantes (Barrena, 2006).

Los criterios para evaluar la calidad en general y la maduración en particular, se basan en la medición de las características físicas (evolución de la temperatura, humedad, granulometría, etc.), químicas (nivel y forma de los elementos minerales, presencia de compuestos odoríferos, metales pesados, grado de humificación, etc.) y pruebas biológicas que estiman el grado de toxicidad en plantas cuando los compost se utilizan como sustratos agrícolas (Madrid, Quevedo y Andrade, 2000).

Tabla N° 7. Parámetros de control del Compost

Parámetros	Observaciones
Temperatura	Estable
Color	Marrón oscuro-negro ceniza
Olor	Sin olor desagradable
pH	Alcalino
C/N	≥ 20
Nitrógeno total	
Fósforo total	1-2%
Potasio total	
N° de termófilos	Decreciente estable
Respiración	< 10 mg/g compost
Respiración media	<7,5 mg/g compost
COD	<700 mg/g (peso seco)
ATP	Decreciendo a estable
CIC	>60 meq/100 libre de cenizas
Actividad de enzimas hidrosolubles	Incrementándose a estable
Polisacáridos	<30-50 mg glúcidos/g peso seco
Reducción de azúcares	35%
Germinación	<8
Nematodos	Ausentes
Materia orgánica	25%
Humedad máxima	40%
Densidad aparente (g/cm ³)	0,5-0,6
Cadmio máx. (mg/kg)	10
Cobre máx. (mg/kg)	450
Níquel máx. (mg/kg)	120
Plomo máx. (mg/kg)	300
Zinc máx. (mg/kg)	1100
Mercurio máx. (mg/kg)	7
Cromo máx. (mg/kg)	400

Fuente: (Sztern y Pravia, 1999. Departamento de Agricultura de la DGA, 2001)

PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Algunos de los parámetros han sido explicados con anterioridad, debido a su importancia tanto al inicio, durante y al final del proceso, por lo cual no son descritos a continuación. Otros parámetros importantes son los siguientes:

Granulometría

El tamaño de partícula de un material que se someterá a compostaje es un parámetro que no conviene descuidar. Si se trata de trozos grandes disminuye la superficie de ataque de los microorganismos y se dificulta su acción. Si las porciones son muy pequeñas puede llegar a compactarse excesivamente el material de forma que se dificulte o impida la difusión del oxígeno necesario en el proceso. Después de una correcta maduración la mayor parte del material orgánico debería encontrarse en forma de partículas menores de 0,25 cm (Menoyo, 1995).

Densidad aparente (Da)

Este parámetro es un indicador de agregación o estructura del material. La densidad aparente (Da) se refiere al peso por unidad de volumen del material seco en el horno o estufa (Casanova, 1991).

Nitrógeno total

La recuperación económica de los nutrientes acumulados en los desechos de cosechas es un aspecto que se debe considerar como una gestión protectora de los agrosistemas. Se supone que macronutrientes muy importantes como P, K, Ca se concentran en los compost como resultado de la biodegradación, pero en el caso del nitrógeno puede suceder que cantidades entre 10 y 80% se pierdan durante el proceso de compostaje, ya sea como amoníaco gaseoso o por lixiviación. Para reducir las pérdidas de nitrógeno es necesario un control del pH (Blanco, Negro y Almendros, 1992). La aplicación de un compost insuficientemente maduro o "inmaduro" puede provocar un bloqueo biológico del nitrógeno asimilable, ocasionando posteriormente un descenso del contenido de este nutriente en la planta.

Una inmovilización del nitrógeno mineral en el suelo, es ocasionada porque el compost inmaduro posee una relación C/N elevada, debido

principalmente a que tiene alto contenido en sustancias carbonadas, con lo cual la aplicación al suelo en estas condiciones da lugar a un aumento de la microflora que utiliza parte del nitrógeno presente en el suelo para la formación de distintas estructuras intracelulares, como proteínas y ácidos nucleicos (Departamento de Agricultura de la DGA, 2001).

El nitrógeno orgánico en un compost maduro debe estar sobre el 90% del total y el inorgánico estar primordialmente en forma de nitratos, ya que el amonio al final del proceso no debe exceder de 0,04% (p.s.) (excepto para un compost fresco), puesto que su presencia denotaría un material poco estabilizado (García, 1990).

El comportamiento del nitrógeno a través del proceso de compostaje se puede observar en la Figura N°14, la cual muestra la evolución de varios compost.

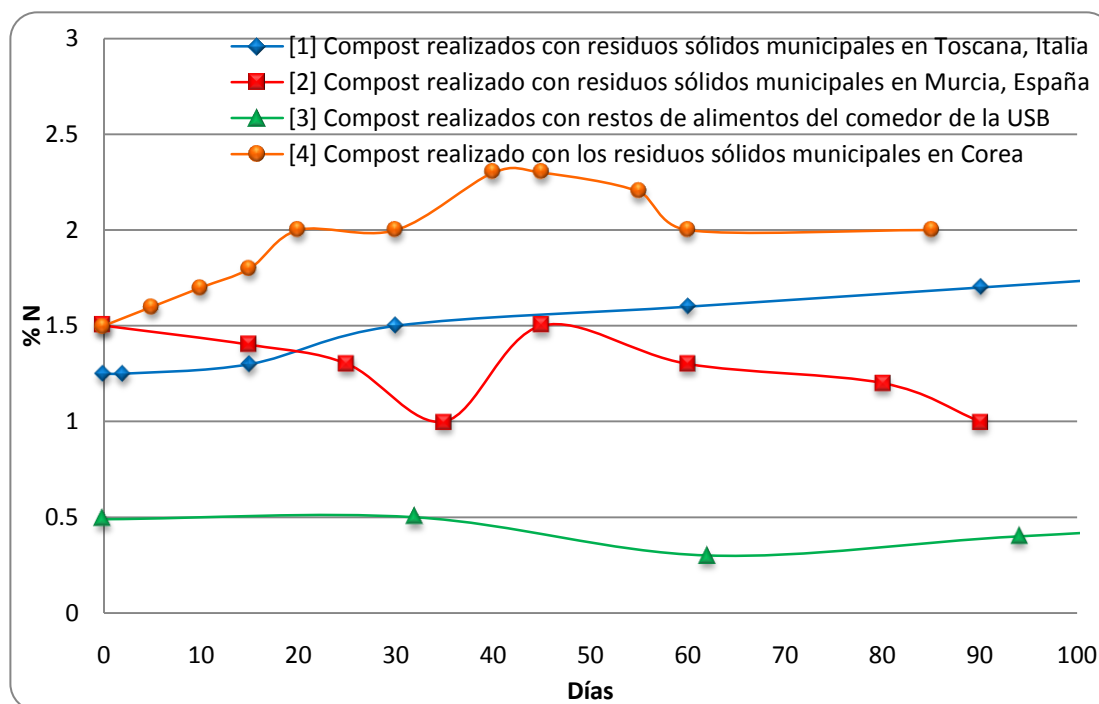


Figura N° 14. Contenido de nitrógeno en varios compost durante su proceso de compostaje.
Fuente: ([1] Levi-Minzi, Saviozzi. y Riffaldi, 1992), ([2] Pascual, 1992), ([3] Villalba, 2005) y ([4] Lee y otros, 2002)

Carbono orgánico

Los microorganismos activos en la descomposición aerobia de residuos (bacterias, actinomicetos y hongos) requieren carbono como fuente primaria de energía para su crecimiento y metabolismo, puesto que, al ser heterótrofos, no pueden asimilar el CO₂ del aire directamente con ayuda de la luz; por eso, su desarrollo dependerá de los compuestos de carbono a su disposición. Existen compuestos fácilmente asimilables como son los carbohidratos, de los cuales el 80-95% se mineraliza durante el proceso de compostaje, los microorganismos los descomponen en CO₂ y H₂O, produciendo energía en forma de calor; esa energía es también empleada en la construcción de células, las cuales, después de muertas, volverían a ser aprovechadas por ellos (Costa y otros, 1991).

A su vez, el uso de residuos biodegradables estabilizados sobre el suelo puede mejorar los niveles de carbono orgánico en el mismo, lo cual se convierte en una fuente de carbono efectiva y poco costosa. Es importante recordar que cada tonelada de compost estabilizado, contiene alrededor de 20% de carbono orgánico que aplicado al suelo tiene el potencial de secuestrar el equivalente a 740 kg-CO₂. (Ciavatta y otros, 2001).

Su comportamiento durante la evolución del proceso de compostaje se puede observar en la Figura N°15, la cual muestra la tendencia del carbono orgánico para varios compost.

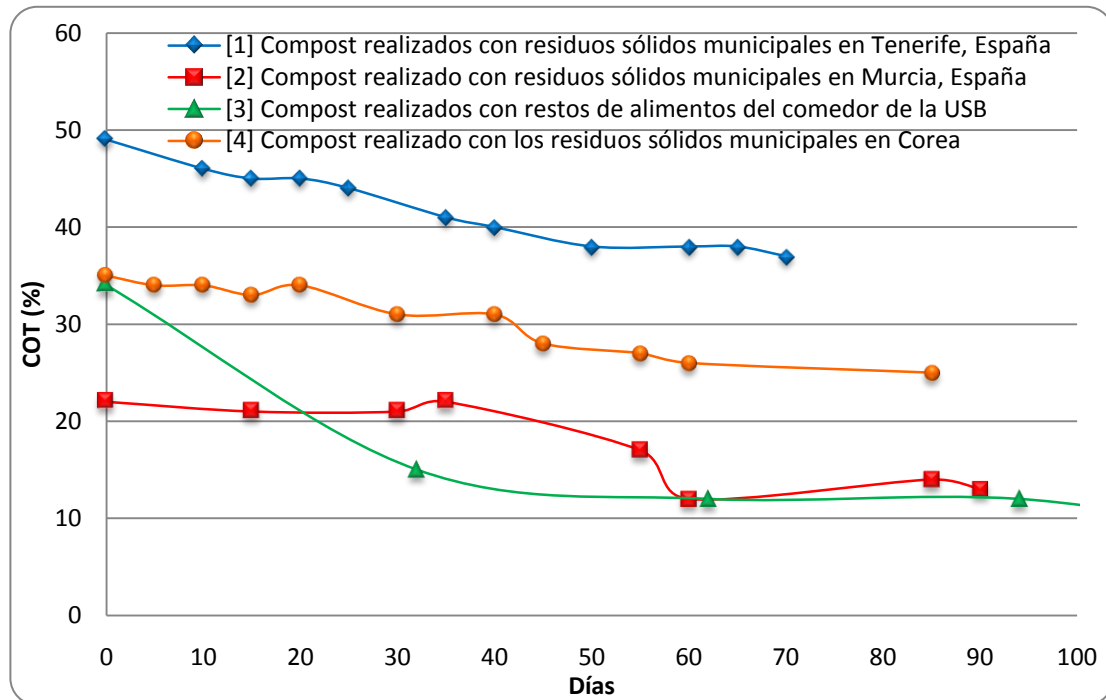


Figura N° 15. Contenido de carbono orgánico total (%) en varios compost durante su proceso de compostaje. Fuente: ([1] Iglesia y Pérez, 1991), ([2] García, 1990), ([3] Villalba, 2005) y ([4] Lee y otros, 2002).

Carbono hidrosoluble

De acuerdo a García (1990), el carbono hidrosoluble, es sin lugar a dudas, de todas las fracciones de carbono analizadas, la que está formada por las moléculas lábiles y fácilmente atacables por los microorganismos, pues aunque a esta fracción haya podido pasar algo de la parte más soluble de ácidos fúlvicos, fundamentalmente está constituida por hidratos de carbono, fenoles, etc. Su tendencia se puede observar en la Figura N°16.

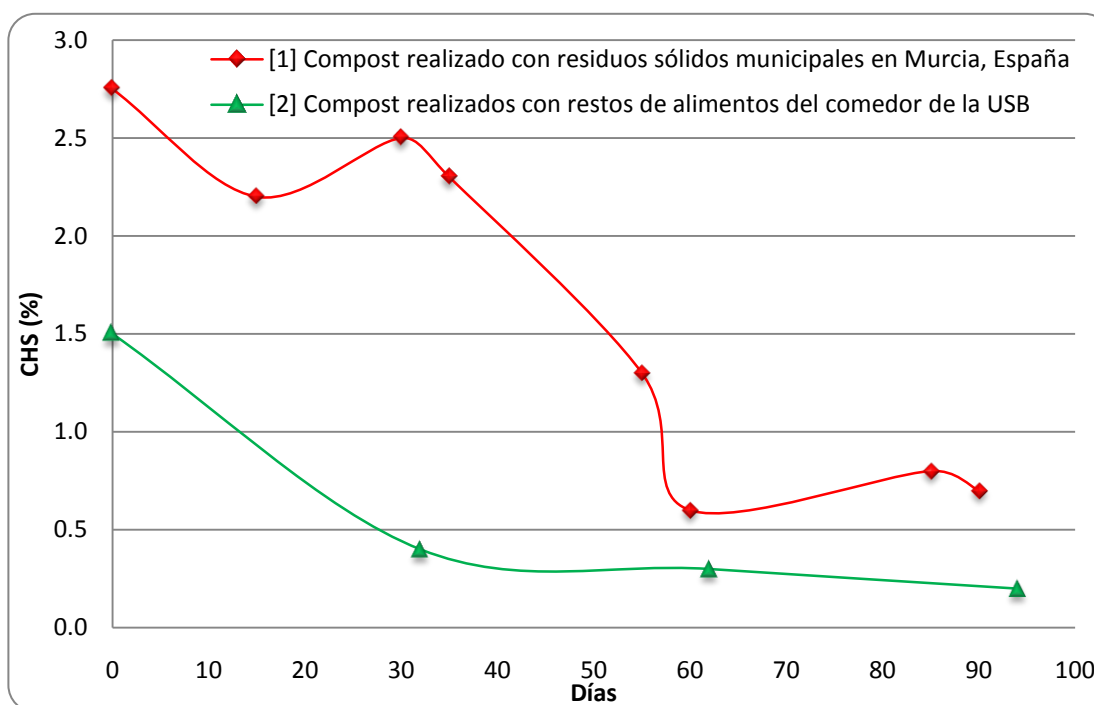


Figura N° 16. Contenido de carbono hidrosoluble (%) en varios compost durante su proceso de compostaje. Fuente: ([1] García, 1990) y ([2] Villalba, 2005).

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

Su determinación en un abono orgánico no solamente tiene interés por el valor agronómico que representa este parámetro, da la idea de la potencialidad en la retención de nutrientes y capacidad de inmovilización de sustancias fitotóxicas, así como la posibilidad de amortiguar cambios súbitos de pH, sino que además, utilizado adecuadamente puede informar de la estabilidad de la materia orgánica de dicho compost. Diversos estudios realizados con abonos orgánicos y compost de distintos residuos orgánicos han demostrado que la CIC aumenta a medida que aumenta el grado de estabilidad de la materia orgánica (Departamento de Agricultura de la DGA, 2001). Este parámetro está estrechamente relacionado con la relación C/N, al final del proceso, la CIC se estabiliza y se considera a un compost maduro cuando su valor es superior a 60 meq/100 g (Costa y otros, 1991).

Potencial Redox

Si al final del proceso de compostaje se detectan cantidades apreciables de NH_4 y H_2S , sería indicativo de que durante el mismo ha existido un potencial redox inadecuado de los materiales; concretamente, la cantidad de ión amonio del compost que se considera maduro, no debe sobrepasar una concentración de 0,04%. Existe un ensayo sencillo basado en la determinación de compuestos reductores en compost, cuya presencia indicaría un grado de madurez inadecuado del material, éste consiste en colocar sobre un papel de filtro una cantidad determinada de compost húmedo, una vez humedecido el papel se adicionan unas gotas de diversos reactivos químicos, comprobando, mediante la presencia de color en el papel, si el compost empleado posee compuestos tipo amonio o sulfhídrico, compuestos ambos característicos de un potencial redox inadecuado del material (Costa y otros, 1991).

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Por medio de un extracto de agua estilada, obtenido por agitación mecánica, se puede determinar el DQO (Laos, F., y col., 2000), con el cual puede considerarse un compost maduro, cuando su DQO es inferior a 700 mg/100 g, aunque dicho valor se reduce si se deja madurar más tiempo (Costa y otros, 1991).

La determinación de la DQO pudiese ser la mejor forma para conocer con exactitud la falta de aireación en las pilas de compostaje; pero en la práctica se opta por el sistema de volteos, en el cual para un período de compostaje de unas seis semanas, son suficientes de seis a ocho para asegurar un aporte adecuado de oxígeno; esto ocurre siempre que las pilas de compostaje no sobrepasen los 70 °C, que exista una falta de humedad, o que se aprecien síntomas de anaerobiosis, malos olores, etc., ya que esto sería indicativo de falta aireación (García, 1990).

Relación N/lignina

El proceso de compostaje intenta lograr una mejora de las transformaciones orgánicas con un aumento en su estabilidad, es decir, un producto resistente a la biodegradación pero, por otra parte, físico y químicamente activo. Se espera que no posea efectos agrobiológicos negativos y que sea posible su acumulación en el suelo durante varios años posibilitando una reserva estable de materia húmica. Una observación directa de los porcentajes de las fracciones del compost comparadas con las del sustrato original indica que la lignina tiende a concentrarse en la paja ya sometida a compostaje. Un modo simple de explicar el proceso de compostaje relacionando sus rendimientos máximos con la biodegradación selectiva requerida es, determinando los valores de depleción de las fracciones biopoliméricas más grandes (p. ej., celulosa y lignina). Siendo la disminución celulósica máxima mostrada en los compost estudiados de un 80% (Blanco y otros, 1992).

Relación N/polifenoles

Los fenoles han sido compuestos estudiados como inhibidores del crecimiento de las plantas. Se sabe también que los polifenoles aceleran la traslocación de iones metálicos en los suelos, contribuyendo al desarrollo de sus perfiles y también que las moléculas de ácido húmico contienen fenoles en su estructura química. El estudio de este parámetro es considerado útil para ver si el proceso de compostaje y maduración, logra eliminar o reducir, su concentración, evitando así problemas de fitotoxicidad a la hora de aplicar estos productos al suelo como fertilizantes (García, 1990).

Fósforo total

Es bien conocido que los macroelementos desempeñan un importante papel en la fertilidad de todo suelo. Por ello, conocer su contenido en las mezclas y el estudio de su evolución en los procesos de compostaje (ver Figura N°17),

puede ser de gran utilidad con el objeto de predecir el comportamiento de estos materiales cuando se incorporan al suelo, y su posterior efecto sobre el desarrollo de la planta (García, 1990). El fósforo desempeña un papel fundamental en los procesos de multiplicación celular y contribuye de manera insustituible a la formación de los tejidos vegetales (Pascual, 1992). Su concentración debe encontrarse entre 1 a 2% en los abonos orgánicos (Trejo, 1996).

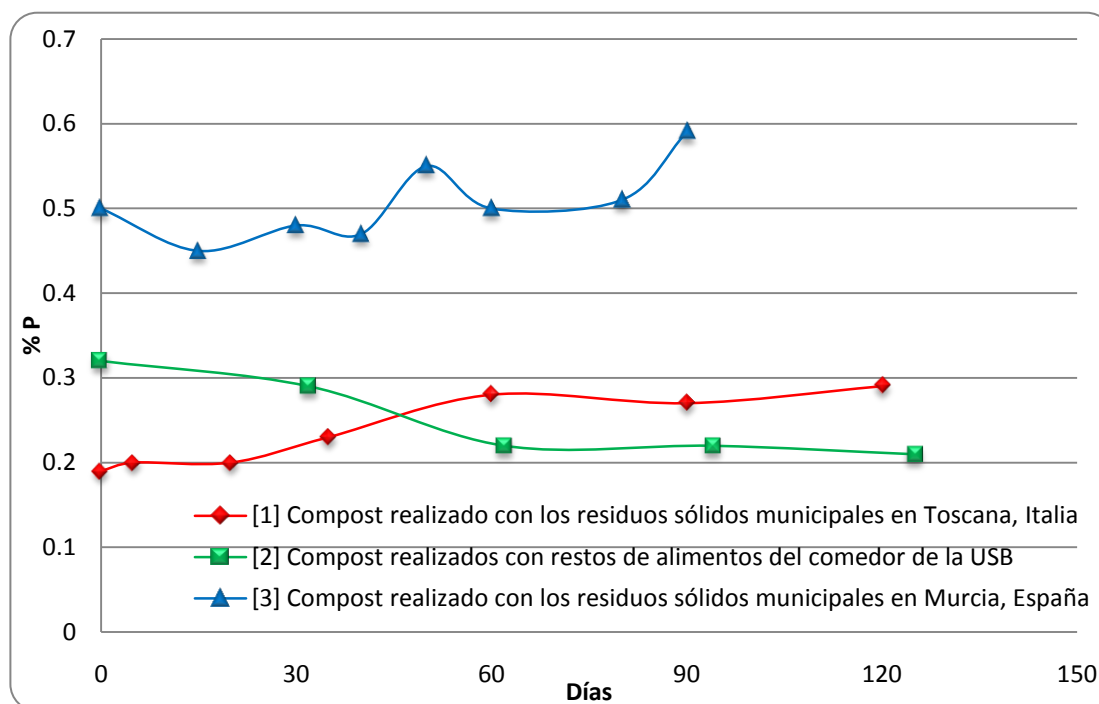


Figura N° 17. Porcentaje de fósforo en varios compost durante su proceso de compostaje.
Fuente: ([1] Levi-Minzi y otros, 1992), ([2] Villalba, 2005) y ([3] García, 1990).

Cationes totales: K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} y Na^+

La determinación de los cationes totales es un parámetro que indica el valor del producto desde el punto de vista de uso como fertilizante, pero no hacen ninguna referencia ni son indicadores de la madurez del producto (Villalba, 2005). Para fines prácticos, la suma de los cationes totales equivale generalmente a la capacidad de intercambio catiónico (Alan, 1989), lo que indica la capacidad de retener de forma eficaz más nutrientes (Stoffella y Kahn,

2004), además de estar relacionado con el grado de estabilidad de la materia orgánica.

Los cationes de mayor importancia con relación al crecimiento de las plantas son el calcio (Ca^{+2}) y el magnesio (Mg^{+2}), encontrándose involucrados directamente con el crecimiento de las plantas. El sodio (Na^{+}) tiene un efecto pronunciado en la disponibilidad de los nutrientes y la humedad (Lippert, s.f. y Mengel, s.f.). El potasio (K^{+}) interviene en la fotosíntesis y en la activación de sistemas enzimáticos que sirven como catalizadores para las reacciones químicas dentro de las plantas (Solórzano, 1997), su contenido en el suelo puede clasificarse en tres categorías: potasio no asimilable, potasio lentamente asimilable y potasio rápidamente asimilable. Diversos factores regulan las categorías antes señaladas, entre ellos están: la composición coloidal del suelo, la humedad y sequedad, la temperatura y el pH del suelo (Navarro, 2000).

En el caso de compost producto de los RSU, el contenido total de potasio es bajo, sin embargo, es fácilmente asimilable por las plantas (Pascual, Ayuso, García y Hernández, 1997).

En la Figura N°18, podemos observar el comportamiento de los cationes totales durante un proceso de compostaje, de un compost elaborado con restos de alimentos.

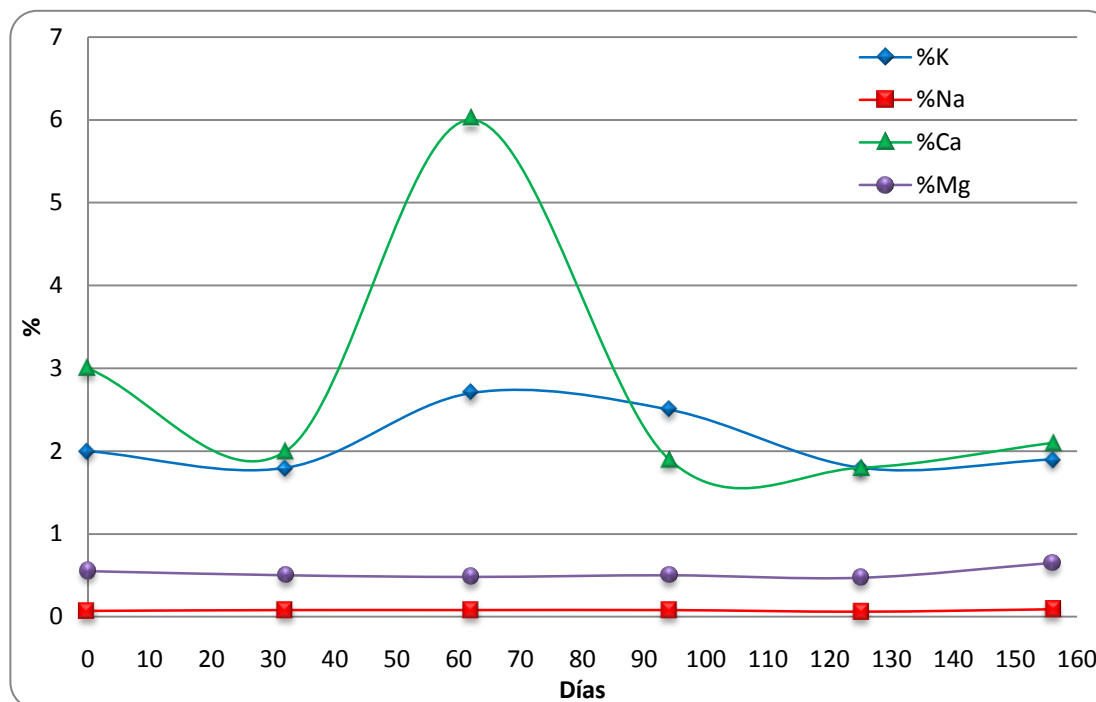


Figura N° 18. Porcentaje de cationes totales en el compost elaborado con restos de alimentos del comedor de la USB durante su proceso de compostaje. Fuente: (Villalba, 2005).

Presencia de metales pesados

Los metales más contaminantes son: cadmio (Cd), Cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), plomo (Pb), níquel (Ni) y zinc (Zn). Éstos y los contaminantes inorgánicos, no son degradados, tendiendo a concentrarse en el proceso de compostaje sobre la materia orgánica que se diluye y se mineraliza. Los metales que generan mayor preocupación son aquellos que persisten y tienden a bioacumularse, causando efectos tóxicos a corto y largo períodos de tiempo sobre los organismos y en el ambiente (Musmeci y Gucci, 1997).

Los procesos de compostaje y maduración se pueden considerar como beneficiosos en cuanto a metales pesados extraíbles se refiere, pues insolubilizan a algunos de ellos, dejándolos en menor disposición para las plantas (García, 1990).

6. PARÁMETROS BIOLÓGICOS

Aunque las técnicas bioquímicas y microbiológicas son adecuadas para determinar el grado de madurez de un compost, resultan laboriosas. Estos métodos están basados en la hipótesis que establece que la madurez de un compost se alcanza por estabilidad biológica del producto. El grado de estabilidad se puede determinar directamente a partir del conteo de la biomasa microbiana o de medidas de la actividad metabólica o bien, indirectamente, por medio del estudio de los constituyentes fácilmente biodegradables o su susceptibilidad a la degradación (Departamento de Agricultura de la DGA, 2001).

Parámetros bioquímicos

El compostaje es un proceso biológico en el que interviene una población microbiana considerable, la cual es responsable de las transformaciones que se producen en los residuos. Los microorganismos llevan a cabo su función por medio de una serie de reacciones bioquímicas complejas (las diferentes rutas metabólicas, por ejemplo); por ello se considera adecuado el estudio de determinados parámetros bioquímicos (Pascual, 1992), tales como los señalados a continuación:

Fraccionamiento de la materia orgánica (sustancias húmicas) e índices derivados

Se considera que las sustancias húmicas (SH) son la fracción orgánica más estable del suelo y además la más importante cuantitativamente, por cuanto pueden llegar a constituir hasta un 80% de dicha fracción orgánica (Rivero, 1999).

Aproximadamente, entre el 60-70% del carbono total del suelo se encuentra en los materiales húmicos, es por ello que desempeñan un papel importante en el ciclo del carbono, como reserva de este elemento y como fuente principal de CO₂ (García, 1990).

Los ácidos húmicos originados del compostaje de la materia orgánica, poseen la habilidad de mejorar la ecología de los suelos, su fertilidad y estructura, e inducen efectos benéficos en el crecimiento de las plantas. (Chefetz, Adani, Genevini, Tambone, Hadar y Chen, 1998).

Los procesos de humificación que tienen lugar durante la estabilización del compost de residuos sólidos municipales o bien de otros materiales orgánicos, representa una combinación de procesos biológicos, microbiológicos y químicos (Ciavatta, Govi, Pasotti y Sequi, 1993). Se ha tratado de relacionar el grado de madurez de un compost con las características de los compuestos húmicos presentes en el mismo, principalmente atendiendo a su grado de polimerización, tasa de extracción y su riqueza en el compost. Se emplea como índice de madurez, la relación carbono de ácidos fúlvicos/carbono de ácidos húmicos, que debe disminuir a lo largo del proceso (Departamento de Agricultura de la DGA, 2001).

La estabilización del compost es una etapa de síntesis progresiva anabólica y de polimerización, en la cual los compuestos húmicos predominan. Se puede medir por lo tanto como humificación, la desaparición durante el proceso de catabolitos solubles o de residuos que estarían presentes en la descomposición, así como la formación de sustancias tipo húmico (García, 1990).

El análisis del compost se hace mediante la extracción de la fracción de carbono empleando álcali (ver Figura N°19), definida también como “sustancias tipo húmico”, éstas se caracterizan por ser grandes polímeros formados por condensación y resistentes al ataque de los microorganismos. Encontrándose diferentes tipos de grupos funcionales como carboxilos, fenoles, alcoholes, quinonas y éteres. De todos ellos destacan los grupos carboxílicos y fenólicos en la capacidad de cambio catiónica que posee la materia orgánica y en sus efectos quelantes (Pascual, 1992).

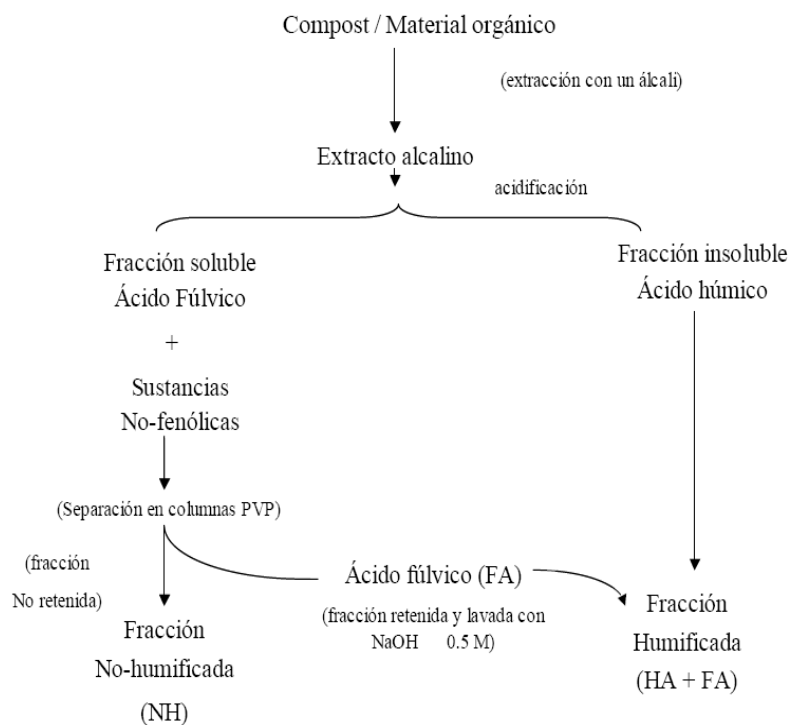


Figura N° 19. Métodos de extracción y fraccionamiento del carbono orgánico de lodos secos y compost. Fuente. (Sequi, Nobili, Leita y Cercignani, 1986)

Una serie de índices se calculan con base en el contenido de compuestos húmicos formados en el compost y que permiten apreciar el grado de madurez del mismo Rivero (1999), estos índices son:

- Relación E4/E6 (relación entre la absorbancia a 465 y 665 nm), que se plantea el uso de esta relación es indicativa del grado de polimerización y condensación de los materiales orgánicos.
- Relación de humificación (RH):

$$RH = \frac{CSH}{Corg} \cdot 100 \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde: CSH es el carbono unido a las sustancias húmicas.

Corg es el carbono orgánico.

- Índice de humificación (IH).

$$IH = \frac{CAH}{Corg} \cdot 100 \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde: CAH es el carbono unido a los ácidos húmicos.

Otra forma de obtener el índice, es la separación del carbono no húmico contenido en el compost con el uso de una resina adsorbente, la polivinilpirrolidona, permite calcular el carbono unido a las sustancias húmicas (CSH) y no húmicas (CNH). Una vez que se ha verificado la separación, estos valores permiten obtener el índice de humificación (IH).

$$IH = \frac{CNH}{CSH} \cdot 100 \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde: CNH es el carbono unido a las sustancias no húmicas.

El valor de IH de los compost fue comparado con el obtenido para una gran variedad de suelos (cuya variación estuvo entre 0,138 - 0,278), estableciendo la siguiente clasificación (Sequi y otros, 1986):

- Compost bien maduro: $IH \leq 1,00$ (en promedio se considera un valor de 0,32 como óptimo).
- Compost parcialmente madurado: $IH = 2 - 1$.
- Compost inmaduro $IH > 2,0$.
- Porcentaje de Ácidos Húmicos (%AH).

$$\%AH = \frac{CAH}{CSH} \cdot 100 \quad \text{Ecuación (6)}$$

- Índice RF (IRF): indica el progreso de la humificación, se deriva de la formación de compuestos con capacidad para absorber radiación a la longitud de onda de 600 nm.

$$IRF = \frac{K600}{CAH} \cdot 100 \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde: K600 es la absorbancia a 600 nm de una solución de ácidos húmicos extraídos del compost

- Gradiente de absorbancia de ácidos

$$\Delta\text{LogK} = \text{LogK400} - \text{LogK600} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde: K400 y K600 son las absorbancias de una solución de ácidos extraídos del compost a 400 y 600 nm.

En todos los casos las sustancias húmicas son extraídas con NaOH, pirofosfato o mezcla de ambos, lográndose luego la separación de los ácidos húmicos y fúlvicos a pH entre 1 y 2.

Enzimas

Las enzimas son catalizadores, generalmente son proteínas, que inducen reacciones o grupos de reacciones específicas. La especificidad de las enzimas es en general muy elevada, de modo que incluso reacciones químicas estrechamente relacionadas suelen estar catalizadas por enzimas distintas. La secuencia de aminoácidos es la que determina la estructura de una enzima así como su especificidad catalítica (Madigan, Martinko y Parker, 1997).

El uso de actividades enzimáticas específicas es un método económico y seguro, que combinados con otros permiten predecir la estabilidad y posible madurez de un compost con base en su actividad microbiana (Herrmann y Shann, 1993).

Las principales enzimas que han sido determinadas en los suelos son: catalasas, catecol oxidasa, deshidrogenasa, difenol oxidasa, glucosidasas, peroxidadasas y polifenol oxidadasas, transaminasas, celulasas, deamilasa, α y β

galactosidasa, α y β glucosidasa, lipasas, nucleosidasas, fosfatasa, arilsulfatasa, fitasa, pirofosfatasa, proteasas y ureasas (Rivero, 1999). En la Figura N°20 se observa en el comportamiento de unas de estas enzimas durante el proceso de compostaje.

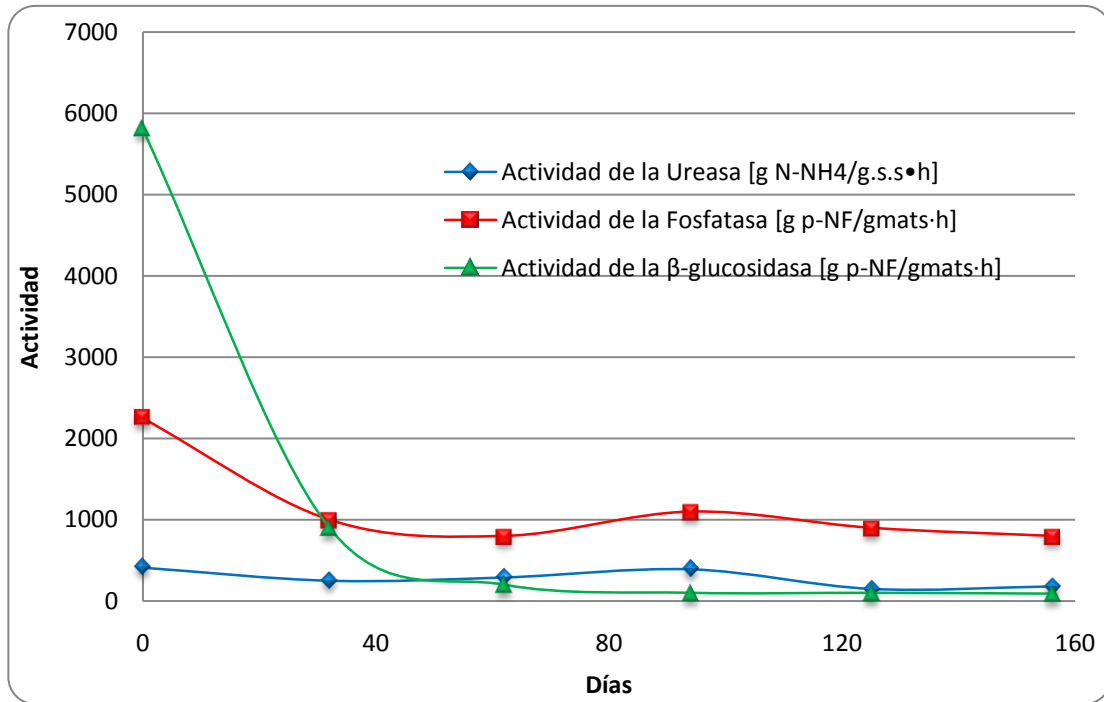


Figura N° 20. Actividad de algunas enzimas en el compost elaborado con restos de alimentos del comedor de la USB durante su proceso de compostaje. Fuente: (Villalba, 2005).

Desprendimiento de CO₂

El método respirométrico consiste en calcular el oxígeno consumido en la respiración o el CO₂ desprendido, bien del producto sin mezclar o mezclándolo con el suelo en la proporción adecuada para su empleo agrícola. Este parámetro indicará la mineralización de la materia orgánica y su evolución durante el ensayo. Los ensayos con plantas, como complemento de las medidas respirométricas, han indicado que cuando el consumo de oxígeno está por debajo de 40 mg/kg, la respuesta de la planta es adecuada y no existe ningún efecto depresivo en la producción. Las técnicas de este tipo son las más fiables para ser consideradas como buenos indicadores de la madurez. El problema

estriba fundamentalmente en que el proceso de incubación de los materiales lleva un tiempo, que puede oscilar entre 28 y 38 días (según la técnica), exigiendo la utilización de equipos adecuados y operadores calificados, esto constituye una traba a la hora de aplicar estos métodos, si bien hoy en día existen algunas técnicas simplificadas que se pueden realizar en sólo tres días (Costa y otros, 1991).

A continuación, se puede observar en la Figura N°21 la evolución de este parámetros, el cual disminuye a medida la actividad biológica cesa con el transcurrir de los meses (Mes 1 (M1), Mes 2 (M2), Mes 3 (M3), Mes 4 (M4) y Mes 5 (M5)).

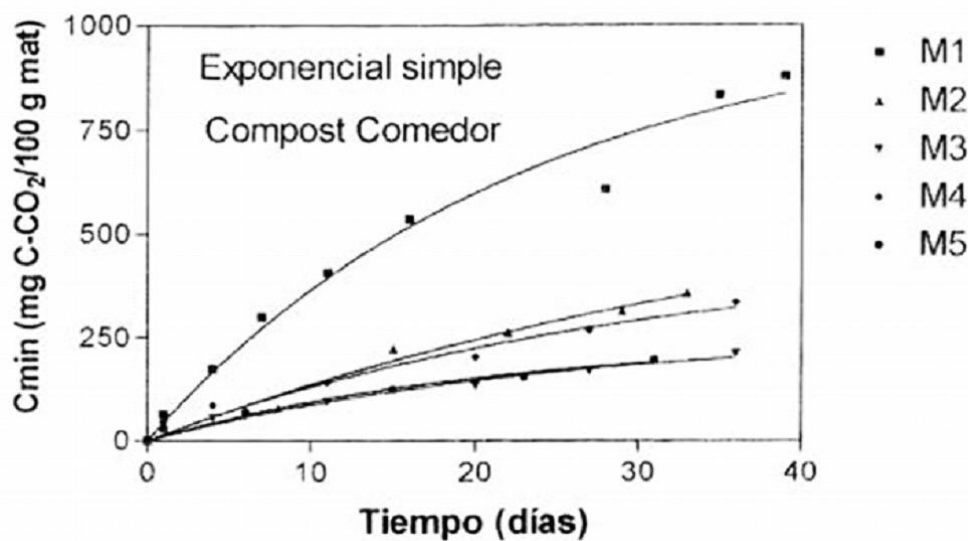


Figura N° 21. Desprendimiento de CO₂ en el compost elaborado con restos de alimentos del comedor de la USB durante su proceso de compostaje. Fuente: (Villalba, 2005).

Biodegradabilidad

En un proceso completo de degradación (mineralización), las sustancias orgánicas son separadas en partículas pequeñas, en agua y en dióxido de carbono, a través del consumo de oxígeno. En una degradación parcial

(degradación primaria), se pueden formar productos de la degradación estables (catabolitos) o temporales (metabolitos). Existen vías bioquímicas de degradación para muchas sustancias naturales, algunas de ellas han sido utilizadas en la nutrición de microorganismos durante millones de años. Sin embargo, muchas sustancias de origen antrópico, las cuales se encuentran en el ambiente en grandes cantidades desde que se inició la industrialización, tienen estructuras algo similares a las sustancias naturales y en consecuencia son biodegradables (Pagga, 1999).

Para determinar si ha ocurrido la completa degradación aeróbica (mineralización), se deben considerar los parámetros comúnmente medidos: demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO), los cuales son medidos a partir de abono con una extracción acuosa por agitación mecánica, o por desprendimiento de CO₂ (Pagga, 1999), método anteriormente descrito.

Otro medio es la determinación del índice de biodegradabilidad (IB), obtenido a partir del contenido de carbohidratos solubles en agua caliente (CS), el carbono orgánico total (COT) del compost sólido y la edad del compost en días (EC), según Costa y otros (1991) dicho índice viene expresado por la ecuación a continuación:

$$IB = 3,166 + 0,039 COT + 0,832 CS - 0,011 EC \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde: IB es el índice de biodegradabilidad

COT es el carbono orgánico total

CS son los carbohidratos solubles en agua caliente

EC es la edad del compost en días

Se propone un valor de 2,4 como apropiado para considerar que un compost es maduro.

Parámetros microbiológicos

La calidad microbiológica del compost depende de las condiciones de almacenaje, por lo tanto, la etapa del almacenamiento se puede considerar como una parte del proceso de compostaje (Déportes, Benoit-Guyod, Zmirou y Bouvier, 1998).

Cuantificación de la población microbiana

Para la cuantificación de la biomasa microbiana como indicador de la biomadurez de un compost, se utilizan métodos directos o indirectos. En el primer caso se procede al aislamiento e identificación de los diferentes grupos de microorganismos, mediante la obtención de extractos de suelo que luego son sembrados en medios de cultivo, en general, específicos para cada grupo a identificar. La evaluación del crecimiento y características de las colonias, por observación directa o al microscopio, suministra información acerca de las poblaciones presentes. Las técnicas más utilizadas son: el conteo en placa y el número más probable. En los denominados métodos indirectos se agrupan aquellos basados en propiedades funcionales de los grupos microbianos (ver Figura N°22) que pueden medirse y luego relacionarse con poblaciones presentes.

Existen métodos que identifican los grupos fisiológicos de microorganismos, ya que cada etapa del compostaje (mesófila, termófila, enfriamiento y maduración) está caracterizada por una microflora específica, es así que por el seguimiento de los organismos presentes es posible conocer el estado de madurez del compost (Costa y otros, 1991).

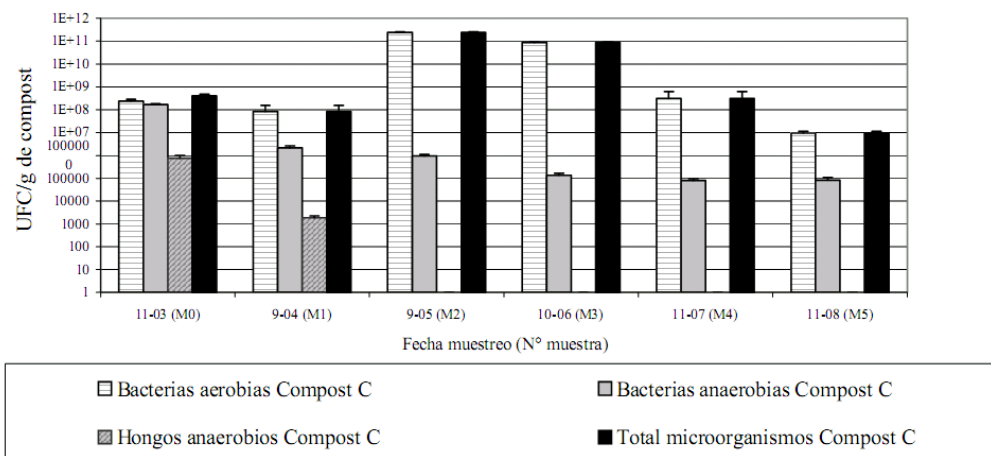


Figura N° 22. Población de microorganismos en diferentes etapas de la elaboración del compost elaborado con restos de alimentos del comedor de la USB. Fuente: (Villalba, 2005).

Medición de actividad de enzimas hidrolíticas trifosfato de adenosina (ATP)

La capacidad de degradar la materia orgánica es una propiedad común a todos los seres vivos heterótrofos. La presencia de estos organismos ha sido empleada a menudo para indicar el grado de oxidación de la materia orgánica. Entre las técnicas usadas para este tipo de medida, el contenido de ATP ha resultado ser de las más adecuadas, pues además de ser un buen indicador de la actividad microbiana, se ha empleado a veces como medida de la biomasa microbiana en suelos (Pascual, 1992).

Durante la evolución tanto de la fase de compostaje (etapa acelerada) como la de maduración se pueden medir las variaciones que experimentan ciertos parámetros bioquímicos, tales como, la concentración de la actividad de enzimas hidrolíticas (proteolíticas, amilolíticas y celulolíticas).

Durante el compostaje, este tipo de parámetros bioquímicos tiende a decrecer, inmediatamente o en un transcurso de tiempo corto. Dicho decrecimiento ocurre durante la etapa termogénica y se completa cuando la temperatura está entre 50-70°C, su duración es alrededor de cuatro días, al final

de los cuales la actividad biológica aparece ya muy baja. En la fase de maduración, cuando el material permanece apilado y estático, existe una segunda etapa, distinta de la precedente, en la cual se aprecian diferentes parámetros característicos de la actividad biológica (Costa y otros, 1991).

Presencia de microorganismos patógenos

La presencia de eventuales microorganismos patógenos hace necesaria la determinación de la calidad higiénico-sanitaria del compost, sobre todo para su utilización agronómica (Musmeci y Gucci, 1997).

Como una prueba sobre la presencia de microorganismos patógenos en compost, se recomienda el uso de un test de recrecimiento potencial de patógenos en compost esterilizados usando un antibiótico resistente para asegurar la bioseguridad del mismo antes de su utilización (Sidhu, Gibbs, Ho y Unkovich, 1999).

Es importante para un compost tener control de su índice epidemiológico, y éste debe ser más estricto conforme al uso que se le dé al producto y su contacto con el hombre. La inocuidad del material se puede controlar tanto durante el proceso de compostaje como cuando se ha obtenido el producto final. Los requerimientos desde el punto de vista higiénico de un compost son los siguientes (García y Polo, 1999):

- No debe contener *Salmonella*.
- No debe contener huevos de parásitos.
- El límite máximo para coliformes fecales es de 5×10^3 por g.
- El límite máximo para estreptococcus fecales es de 5×10^2 por g.

Parámetros de fitotoxicidad

Es frecuente la presencia de compuestos inhibidores de la germinación en la mayoría de los residuos. En virtud de lo ya experimentado se sabe que varias sustancias fitotóxicas se forman como resultado del metabolismo microbiano,

principalmente en condiciones anaeróbicas, pero es de destacar, que en la biomasa de muchos tipos de plantas estas sustancias están presentes en la forma de compuestos alelopáticos preexistentes y que pueden ser eliminados a través de reacciones de biodegradación o polimerización (Blanco y otros, 1992). La evolución de la fitotoxicidad durante el compostaje aparece estrictamente asociada con la etapa inicial de descomposición. Esta es una posible condición transitoria relacionada con la presencia de material fácilmente metabolizable (Zucconi, Pera, Forte y Bertoldi, 1981).

Índice de germinación

Es un test biológico de germinación que consiste en determinar frente a un testigo el poder germinativo de un compost, en placas de Petri y en condiciones idóneas de germinación; esta técnica utiliza semillas de *Lepidium sativum* L., ya que son de germinación rápida. Los extractos acuosos de los compost se sitúan sobre papel de filtro en placas de Petri y se incuban 24 horas a 27°C. Si el índice de germinación sobre el control es superior al 50% se considera maduro al compost (Costa y otros, 1991).

De acuerdo a Zucconi y Bertoldi (1987), el índice de germinación se determina mediante la Ecuación (10).

$$IG = [(\%GM * LM) / (\%GC * LC)] * 100 \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde: IG es el índice de germinación

%GM es el porcentaje de semillas germinadas (muestra)

%GC es el porcentaje de semillas germinadas (control)

LM es la longitud media de las raíces de las semillas de la muestra (extracto)

LC es la longitud media de las raíces de las semillas del control (agua)

A continuación se puede observar el comportamiento de este parámetro en la Figura N°23, que muestra el IG para dos tipos de compost durante el proceso de compostaje.

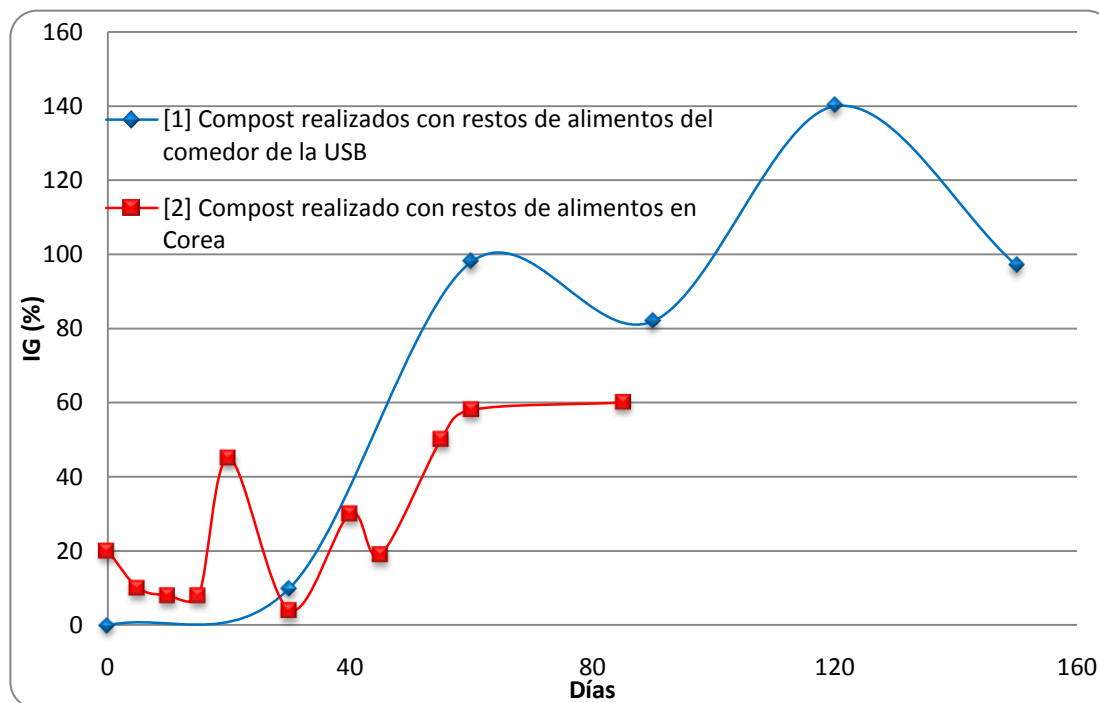


Figura N° 23. Índice de germinación (IG) en dos compost durante su proceso de compostaje.
Fuente. ([1] Lee y otros, 2002) y ([2] Villaba, 2005).

Pruebas de campo

El uso de compost en la agricultura (test de plantas) es considerado como el índice de mayor fiabilidad para evaluar su eficiencia (García, 1990). Desde el punto de vista agrícola, la aplicación al suelo de un compost no se debe considerar como algo aislado y referido única y exclusivamente a la calidad y características de dicho material, sino ligado a la propia problemática del suelo donde se aplicará, así como a los cultivos que se van a desarrollar (Costa y otros, 1991). Dado que el grado de madurez se establece siempre en función de la utilización de estos materiales como abonos orgánicos, es recomendable estudiar qué parámetros tienen incidencia lógica sobre el rendimiento vegetal

(Díaz, 1990). Esto se puede apreciar en la Figura N°24, donde se muestra estudio de la incidencia del compost en una cosecha de tomate.

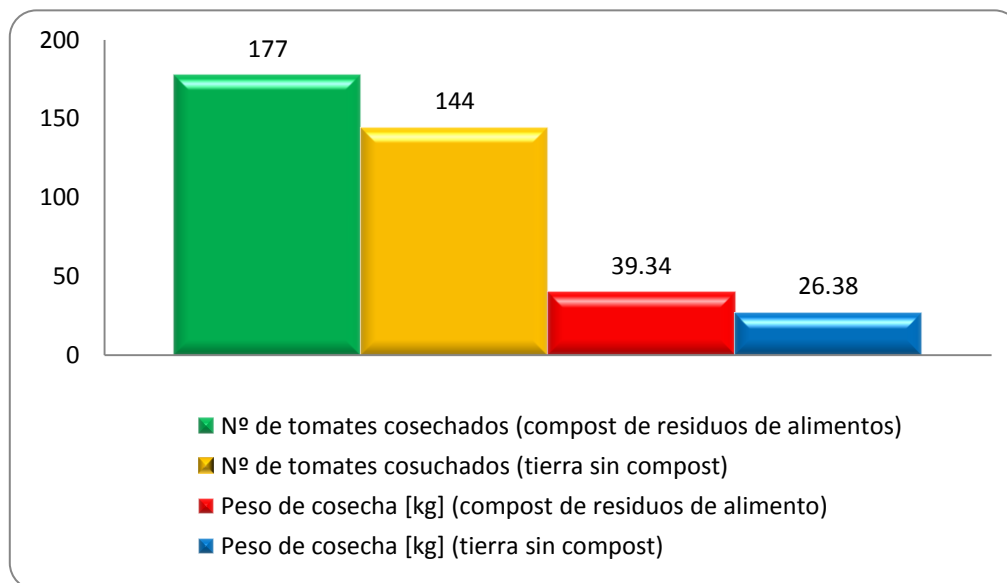


Figura N° 24. Valores totales de producción de tomate obtenida. Fuente. (Villaba, 2005).

7. SELECCIÓN DE PARÁMETROS

Para efectos de esta investigación, se eligieron los parámetros y las variables necesarias que garanticen un adecuado control del proceso, además de aquellos parámetros que permitan la evaluación del producto final. Según Barrena (2006) en un proceso de compostaje los responsables de la transformación son los microorganismos, todos aquellos factores que pueden limitar su desarrollo serán limitantes también del propio proceso. Para conseguir que esta transformación se realice en condiciones controladas, hace falta una serie de requisitos, que no son otros que los que necesitan los microorganismos para desarrollarse. Por esta razón durante el desarrollo del proceso y en algunas etapas de éste, se llevará registro de parámetros que reflejan la actividad de la población biológica involucrada, como temperatura, pH, conductividad eléctrica, porcentaje de humedad, porcentaje de materia orgánica, relación C/N y características físicas como olor y color.

Como se mencionó anteriormente, los criterios para evaluar la calidad y la maduración, se basan en la medición de las características físicas-químicas del producto. Debido a la variable composición química de los materiales de partida, métodos de análisis, no ha sido posible uniformizar ni precisar por normas de calidad en compost a nivel internacional (Carolla, 2006). Para este trabajo se seleccionarán parámetros ampliamente aceptados, algunos mencionados previamente como el porcentaje de humedad, pH, conductividad eléctrica, porcentaje de materia orgánica, relación C/N, a los cuales le sumamos la densidad aparente y otros de importancia por indicar el aporte de nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas como son macronutrientes Nitrógeno, Fósforo y Potasio. Esta selección se basa, en la importación mostrada en otras investigaciones que refieren a estos parámetros como los mínimos o los indispensables para llevar el control del proceso y determinar la calidad del producto, además de su relativa facilidad de medición (Raspoor, 2009) (Adhikari y otros, 2009).

8. ORGANIZACIÓN COMUNITARIA PARA LA VIVIENDA JOSÉ FÉLIX RIBAS

La Organización Comunitaria para la Vivienda José Félix Ribas, es un proyecto habitacional integral, que involucra a sus habitantes desde el inicio del proyecto y que tiene como objetivo desarrollar un complejo habitacional modelo. Para ello se están planificando proyectos como empleo de energías renovables para el alumbrado público, desarrollo de un proyecto de gestión de agua y aprovechamiento de los desechos sólidos; es en este último proyecto donde se enmarca este trabajo especial de grado. El proyecto habitacional se llevará a cabo en el sector Pan de Azúcar, Municipio Guaicaipuro, ubicado al oeste del Estado Miranda, como se puede observar en la Figura N° 25 y tendrá una extensión de 275.215 m² y un área de construcción de 100000 m² y el restante para áreas sociales y áreas verdes.



Figura N° 25. Mapa del Estado Miranda. Fuente. (Mapa del estado, s.f.)

Las condiciones climatológicas promedio anuales que presenta el Municipio Guacaipuro se reportan en la Tabla N° 8.

Tabla N° 8. Condiciones climatológicas del Municipio Guacaipuro del Estado Miranda

Condiciones Climatológicas	
Altitud (msnm)	1000
Temperatura promedio (°C)	19,3
Presión (mmHg)	758
Humedad (%)	91,5
Precipitación media (mm)	900-1300

*metros sobre el nivel del mar (msnm)

Fuente: (INAMEH, 2009)

Uno de los factores que debe tener presente el proyecto habitacional integral es la alta tasa de generación de desechos que tiene el Estado Miranda, en efecto investigaciones recientes reportan resultados que lo colocan como unas de las zonas de mayor alto impacto ambiental coincidiendo con las zonas de mayor generación de desechos (Navas, 2008), lo cual podemos observar en la figura N°26.

Guacaipuro, es el tercer Municipio con mayor población y mayor generación de desechos en Miranda, con una tasa de generación de desechos de 0,9 kg/hab·día (Navas 2008), en la Figura N°27, se representa la producción de desechos sólidos y la cantidad de habitantes por Municipio en el Estado Miranda.

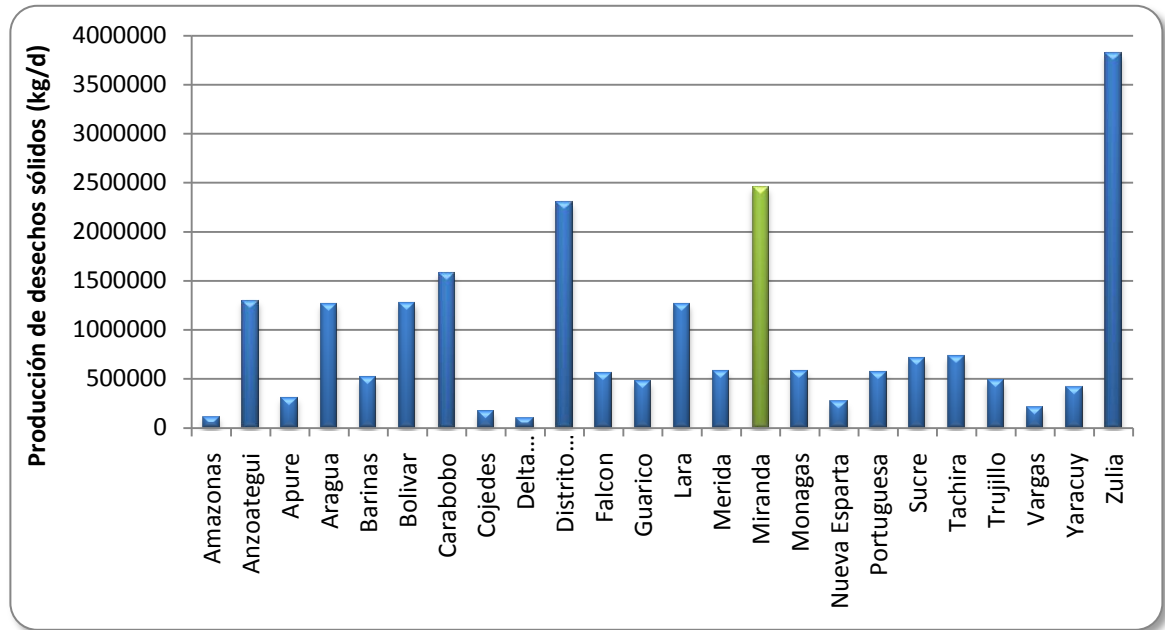


Figura N° 26. Producción de desechos sólidos en Venezuela por Estado. Fuente. (Navas, 2008)

En la Tabla N° 9 se presenta la composición promedio de los desechos sólidos del Municipio Guacaipuro, en esta se puede observar que el mayor porcentaje lo ocupan los restos de alimentos.

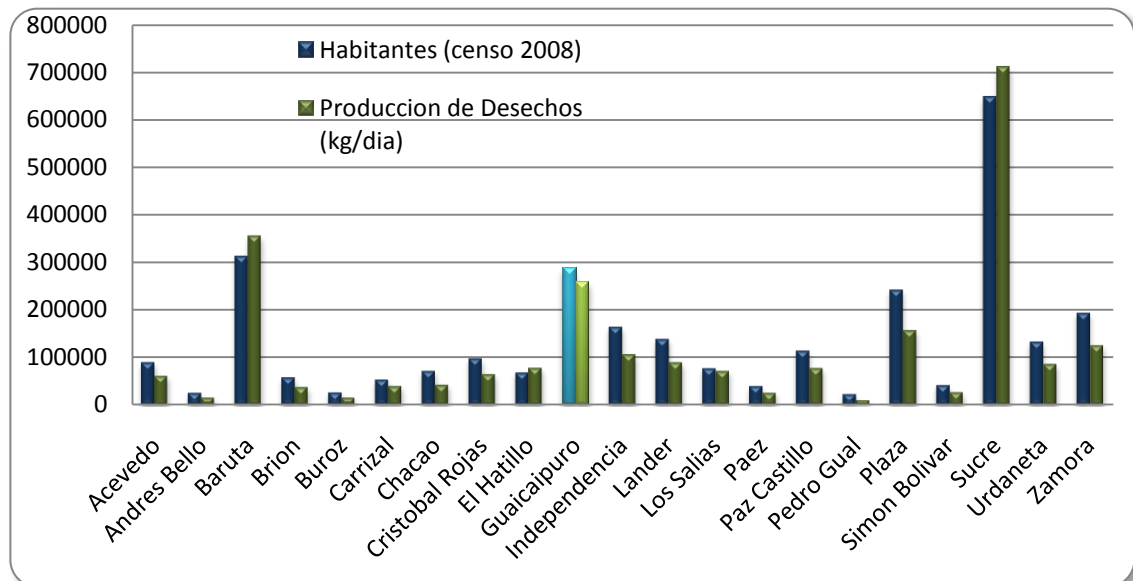


Figura N° 27. Producción de desechos y cantidad de habitantes por Municipio en el Estado Miranda. Fuente. (Navas, 2008)

El importante contenido de materia orgánica presente en los desechos sólidos del Municipio Guaicaipuro hace que el aprovechamiento de los residuos a través de la elaboración de compost sea una técnica apropiada para la comunidad José Félix Ribas.

Tabla N° 9. Composición promedio de los desechos sólidos del Municipio Guaicaipuro del Estado Miranda

Composición Promedio		
	Min. %	Máx. %
Restos de Alimentos	15,9	37
Papel y Cartón	11,5	22,4
Plástico	5,9	19,6
Vidrio	4,5	19,7
Metal Ferroso	1,5	4,6
Textiles	3	10
Desechos de Jardín	4,3	20
Otros	9	23,9

Fuente: Navas, 2008

CAPITULO III

METODOLOGÍA

A continuación se presenta el método que se desarrollo para el estudio de producción de compost a partir de la materia orgánica presente en los residuos sólidos del futuro complejo habitacional OCV José Félix Ribas, el cual será desarrollado en cuatro fases.

En la primera fase se estimó la generación de desechos orgánicos, en la segunda fase se delimitó los criterios para la selección del material orgánico, la tercera etapa comprende el seguimiento de diversos parámetros para distintas variables estudiadas en el proceso de biodegradación del compost y la última fase que a partir de la obtención de los resultados y su análisis se obtuvo como producto la elaboración de un esquema para la producción de abono o compost para el futuro complejo habitacional. Estas fases son explicadas a continuación:

FASE I. ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE DESECHOS A PROCESAR

La OCV José Félix Ribas, es un proyecto habitacional integral en vías de construcción, donde serán construídas 400 viviendas y está comunidad estará ubicada en el Municipio Guaicaipuro del Estado Miranda; por ende, para definir las características de la comunidad, tales como, producción de desechos, composición de los desechos y número de habitantes de la futura comunidad, se hizo una revisión de publicaciones y trabajos de grado, donde se obtuvo una tasa de generación de 0,9 kg/hab-d y 38,6% de material orgánico (Navas,2008), con una ocupación por casa de 4 personas (Instituto Nacional de Estadística, 2010).

Con los datos antes mencionados se realizó una estimación de la población del proyecto habitacional (ecuación 11), de la producción de desechos (ecuación 12) y de la producción de materia orgánica (ecuación 13).

Población del proyecto habitacional

$$P = n.c \cdot n.o \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde: P es la población (hab)

n.c numero de casas

n.o numero de ocupantes

$$P = 400 \cdot 4 = 1600 \text{ hab}$$

Producción de desechos

$$PD = P \cdot t_g \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde: PD es producción diaria (kg/hab)

t_g tasa de generación de desechos (kg/hab·día)

$$PD = 1600 \cdot 0,9 = 1440 \text{ kg/d}$$

Producción de materia orgánica

$$Mo = PD \cdot 0,386 \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde: Mo es materia orgánica producida (kg/d)

0,386 porcentaje de la materia orgánica contenida en los desechos de la zona

$$Mo = 1440 \cdot 0,38 = 556 \text{ kg/d}$$

Cantidad de materia orgánica que llega a la planta

$$Mop = Mo \cdot 0,6 \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde: Mop es materia orgánica que llegaría a la planta (kg/d)

0,6 porcentaje de la materia orgánica que llega a la planta luego de la selección y recolección

$$Mop = 555,84 \cdot 0.6 = 334 \text{ kg/d}$$

FASE II. DEFINIR LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS DESECHOS ORGÁNICOS

Mediante la revisión de publicaciones se obtiene que para determinar los criterios adecuados al estudio planteado y que permitan una selección del tipo de material orgánico, a utilizar en el proceso de compostaje, se debe tomar en cuenta ciertos factores, como la disponibilidad del material, su efecto en el proceso de biodegradación y el efecto en la comunidad.

El material orgánico está conformado por los desechos orgánicos seleccionados, provenientes de las actividades de la cocina y por el agente estructurante, igualmente de naturaleza orgánica, donde su selección está influenciada en parte, por su utilización en investigaciones anteriores (Adhikari y colaboradores, 2009).

FASE III. MONTAJE Y SEGUIMIENTO DEL SISTEMA DE ELOBORACION DE COMPOST

Anterior al montaje de la pilas se realizó la recolección de los desechos empleados en las pruebas de biodegradación, éstos se obtuvieron de hogares ubicados en el Municipio Guaicapuro, Estado Miranda, el mismo municipio donde será construida la OCV José Félix Ribas y debido a que el material recolectado en los hogares no fue suficiente, se decidió completar con desechos de la cocina del comedor universitario (UCV).

Para los desechos recolectados en los hogares del Municipio Guaicapuro, se les indicó a los distintos grupos familiares la separación del material orgánico del resto de los desechos generados en el hogar, almacenando solo los restos de vegetales, frutas y restos de podas (en caso de poseer áreas verdes) y excluyendo restos orgánicos procesados o cocinados, al igual que restos

cárnicos. Los desechos del comedor universitario fueron buscados en el área de la cocina, los cuales están previamente separados.

Adicionalmente, se recolectó aserrín de un taller de carpintería de la UCV con un tamaño de partícula entre 1 y 5 centímetros, como también fueron recolectados algunos restos de podas de las áreas verdes del recinto universitario.

Para todas las experiencias que serán detalladas posteriormente, se utilizó el mismo procedimiento en la preparación de los desechos orgánicos y agente estructurante, los diferentes residuos orgánicos fueron picados con cuchillo y picatodo, llevándolos a un tamaño de partícula entre 1 y 3 centímetros (ver apéndice A). En el caso de estructurante combinado de hojas y grama se picó a mano con guantes de carnaza para llevarlos a un tamaño de partícula entre 1 y 5 centímetros, la mezcla de los diferentes materiales entre sí se realizó manualmente empleando una pala, consiguiendo de esta forma una mezcla homogénea. Esta mezcla se preparó para un total de 12 composteros.

Experiencias

Previas: Con la finalidad de adquirir pericia en la elaboración de compost, se montaron dos composteros de 0,006 m³ (15cm de alto *15cm ancho *25cm de largo), se utilizó como agente estructurante aserrín en un relación volumétrica 1:1 con los desechos orgánicos, éste estructurante y su relación fueron seleccionadas por dar buenos resultados en otras experiencias (Adhikari y colaboradores, 2009), la relación volumétrica se definió con ayuda de un envase plástico de igual dimensión a los composteros, en donde los componentes fueron mezclados y se les verificó el contenido de humedad a través del test de la mano o test del puño, en donde la mezcla inicial fue apretada con la mano, si escurría líquido la mezcla está muy húmeda por lo que sería necesario agregar estructurante, en el caso que de no escurrir y al abrir la mano la mezcla se

desmorona, se considera la mezcla está muy seca, siendo necesario agregar agua. Al no observarse ninguno de estos casos se considero la mezcla inicial con una humedad adecuada (Barrena, 2006) (ADAN, 1999).

Los composteros fueron sometidos a un tiempo de biodegradación de 15 días, basándose en el método breve o método de los catorce días, donde la mezcla inicial es dejada en reposo durante los primeros dos días para luego airearla diariamente por agitación hasta cumplir los quince días (Suárez, 1981). Durante el proceso de biodegradación se hizo el seguimiento de la temperatura con el procedimiento que se explica más adelante en la parte de monitoreo de los parámetros del proceso.

Variación del tamaño de la pila: Se montaron dos pilas de tamaños 0,006 m³ (15 cm de alto *15 cm ancho *25 cm de largo) y 0,045 m³ (30 cm de alto *30 cm ancho *50 cm de largo). Para la pila de menor tamaño se realizó el mismo procedimiento que en la experiencia previa y la pila de mayor tamaño se utilizó un guacal de madera, los cuales son utilizados en los mercados para transportar alimentos. Las paredes del guacal fueron tapadas con láminas de cartón y a su vez estas fueron forradas con bolsas plásticas de manera de evitar su daño con la humedad (ver apéndice B). Para este compostero al igual que el de menor tamaño se siguió el mismo procedimiento de la experiencia previa con la única diferencia que se utilizó un tobo plástico de 10 l para establecer la relación volumétrica estructurante-materia orgánica.

Variación de la frecuencia de aireación: Se montaron dos composteros con el tamaño que mejor resultados haya dado en el perfil de temperatura de la experiencia anterior. En ambos casos se realizó el mismo procedimiento a la experiencia anterior, partiendo de la misma mezcla de materia orgánica y aserrín como agente estructurante con relación 1:1. A los composteros se les hizo el seguimiento de diversos parametros que son explicados posteriormente. Un compostero fue aireado diariamente y el otro interdiariamente. Para esta

experiencia fueron evaluados los productos a través de los procedimientos que se explican posteriormente en la parte de evaluación de la calidad del compost.

Tipo de agente estructurante y relación desechos orgánicos-agente estructurante: Se montaron cuatro composteros con iguales dimensiones a los de la experiencia anterior, se realizó una variación en el tipo de estructurante y en la relación volumétrica de la mezcla inicial, en dos de los composteros se utilizó como estructurante aserrín (A) en relaciones 1:1 y 2:1. En los otros dos composteros se utilizó el estructurante de grama-hojas secas (GH), a los cuales también se les varió la relación agente estructurante-materia orgánica (MO) en 1:2 y 1:1. La frecuencia de aireación utilizada fue la de mejores resultados arrojó en el perfil de temperatura en la experiencia anterior e igualmente a las experiencia anteriores, durante el proceso se hizo seguimiento de los parámetros y evaluación de la calidad del producto.

Tiempo de biodegradación: Los mismos cuatro composteros elaborados en la experiencia anterior, fueron evaluados las propiedades del producto final al haber transcurrido quince y treinta días. Utilizando la misma frecuencia de aireación de la experiencia anterior.

Tipo de pila: Se montaron dos composteros, una pila de pared cerrada y otra de pared de malla, en ambos composteros las dimensiones que se utilizó fueron las mismas de la experiencia anterior. Para el caso de pared abierta se utilizó tela de saco como pared, que permitió la circulación de aire sin dejar que el contenido del compostero se saliera. Para los composteros se empleó el estructurante y la relación volumétrica que arrojó mejores resultados en el perfil de temperatura de la experiencia anterior, aplicando la misma frecuencia de aireación, además del mismo procedimiento en el seguimiento de los parámetros y en la evaluación de la calidad del compost.

Determinación de parámetros físico-químicos en la mezcla inicial

A todos los montajes anteriores se le determinó el porcentaje de humedad mediante el procedimiento descrito por Barrena (2006). El análisis se hizo por duplicado en materiales homogéneas según el procedimiento detallado a continuación:

- Pesar en un crisol de porcelana previamente tarado (T) en una balanza de urna digital Ohaus modelo pionner de precisión ($\pm 0,0001$ g) la muestra húmeda (Po).
- Secar la muestra en la estufa marca Fisher modelo Isotemp 500 series a 105°C al menos 18 horas. Sacar la muestra de la estufa, dejar enfriar en el desecador y pesar (Pf).
- Determinar el porcentaje en humedad (% H) según la ecuación siguiente:

$$\% H = \frac{(Po-Pf)}{(Po-T)} \cdot 100 \quad \text{Ecuación (14)}$$

El porcentaje de la materia orgánica total (% MO) se determinó por gravimetría indirecta en la que se mide la pérdida de peso a causa de la combustión de la materia orgánica (Barrena, 2006), a través del siguiente procedimiento:

- Pesar en una balanza analítica de urna digital Ohaus modelo pionner con precisión de $\pm 0,0001$ g, aproximadamente 1,5 g de la muestra seca y molida dentro de capsulas de porcelana (previamente pesadas (T) obteniendo Po).
- Se introduce la muestra en una mufla marca Ney Vulcan modelo 3-550 y se realiza una rampa de temperatura hasta 550°C . Permitiendo la combustión de la muestra a 550°C durante dos horas y luego lentamente disminuir la temperatura a 200°C .

- Se retiran las muestras de cenizas de la mufla, dejándolas enfriar y pesándolas con precisión de $\pm 0,0001$ g, obteniendo un Pf. Determinando el % MO de la muestra según la ecuación:

$$\% MO = \frac{(Po-Pf)}{(Po-T)} \cdot 100 \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde: % MO es el porcentaje másico de materia orgánica (%)

Po es el peso de la muestra húmeda (g)

Pf es el peso de la muestra después de calcinación (g)

T peso del recipiente contenedor de muestra vacío (g)

El contenido de carbono se estima según Haug (1993) con base al contenido de materia orgánica, considerando que para la mayoría de materiales el contenido en carbono se encuentra entre el 45% y 60% de la fracción orgánica, determinándolo a partir de la siguiente ecuación:

$$\% C = \frac{\%MO}{1,8} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Donde: % MO es el porcentaje másico de materia orgánica (%)

Se obtiene el porcentaje de nitrógeno contenido en la mezcla inicial mediante el método Kjeldahl, el cual se explica posteriormente. Todo esto con la finalidad de hallar la relación C/N en la mezcla inicial.

Monitoreo de los parámetros del proceso

Durante el proceso se midieron los indicadores que permiten ensayar la evolución de los desechos orgánicos y llevar un control del proceso. Estos son propuestos por Barrena (2006) y además de ser los mínimos o los indispensables para llevar el control del proceso y determinar la calidad del producto, estos se mencionan a continuación:

- Variación de la temperatura, el control se llevó a cabo previa a la operación de aireación. Introduciendo una termocupla tipo K del sensor

de temperatura marca Dwyer modelo TC20 en tres puntos de la pila, centro de la pila y en ambos puntas. Con el mismo sensor también se hizo un registro de la temperatura ambiente para cada día de aireación.

Se midió el pH, pesando 2 g de la muestra en una balanza de urna digital Ohaus modelo pionner con precisión de $\pm 0,0001$ g y se introducen en un beaker de 250 ml junto con 50 ml de agua destilada. La solución se agitó durante 30 minutos con una pastilla magnética sobre planchas marca Corning. Se centrifugo el sobrenadante durante 15 minutos a 3000 rpm en la centrífuga marca Christ ubicada en el laboratorio de fisicoquímica, para luego ser filtrada. Realizando luego la lectura de pH mediante el pHmetro previamente calibrado marca Oakton ubicado en el laboratorio de fisicoquímica.

- La conductividad eléctrica se midió del mismo extracto que se obtiene para la medición del pH, realizando la lectura de la conductividad con el conductímetro marca Oakton, también ubicado en el Laboratorio de físicoquímica.
- A medida que el proceso de descomposición se desarrolla, se tomó nota del cambio de las características físicas (color y olor) de la mezcla en el proceso de degradación, además de un seguimiento visual de las partículas desde el inicio al final del proceso, siendo importante observar los cambios en su tamaño y apariencia.

Evaluación de calidad de compost

La determinación de la calidad del abono obtenido se realizó midiendo distintos parámetros físico-químicos, detallados a continuación:

- Se determinó el porcentaje de humedad, pH y conductividad eléctrica siguiendo el procedimiento anteriormente planteado.
- Se obtuvo porcentaje de materia orgánica y porcentaje de carbono a través del procedimiento anteriormente planteado.

- Se determinó la densidad aparente (D_a), utilizando recipientes de volumen conocido, previamente pesados, llenados con muestra de abono y pesados posteriormente (Villalba, 2005), calculando la densidad por la siguiente fórmula:

$$D_a = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad \text{Ecuación (17)}$$

Donde: masa es el peso de la muestra analizada (g)

volumen es el volumen ocupado por la masa analizada (ml)

- La determinación de macronutrientes (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) se realizó en laboratorio de la Planta Experimental de Tratamientos de Aguas (PETA), con los procedimientos a continuación descritos:

Nitrógeno

La medición de la concentración de nitrógeno se realizó con el método Kjeldahl, el cual determina la suma del nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal y su procedimiento fue el siguiente (American Public Health Association, 1998):

- 1.-Se pesó exactamente 0,2 g de muestra, se llevó en un matraz de Kjeldahl cuidando que la muestra no se adhiriera a las paredes o al cuello del matraz.
- 2.-Se añadió 50 ml del reactivo de digestión (H_2SO_4 y aproximadamente 1,0 g de mezcla catalizadora) junto a seis perlas de ebullición.
- 3.-Se sometió a digestión la muestra en el aparato de Kjeldahl bajo una campana de extracción, hasta obtener un residuo trasparente (ver apéndice C).

- 4.-Se dejó enfriar el matraz y se añade 400 ml de agua destilada y 50 ml de hidróxido de tiosulfato, para obtener una solución azul, que luego fue llevada a destilación (ver apéndice C).
- 6.-Se abrió la llave del agua para tenerla circulando por el refrigerante todo el tiempo.
- 7.- Se colocó un Erlenmeyer con 50 ml de la solución indicadora de ácido bórico.
- 8.-Se colectaron aproximadamente 250 ml del destilado, la cual posee un color verde (ver apéndice C).
- 9.- Se retiró el matraz de Erlenmeyer y se limpia las paredes con agua destilada.
- 10.-Se tituló la muestra con H_2SO_4 a 0,02N, solución la cual tomó un color violeta indicando el punto final de la titulación (ver apéndice C).
- 11.-Con el volumen de ácido utilizado para titular se calculó el porcentaje de nitrógeno, con la siguiente fórmula:

$$\% N = \frac{V_{H_2SO_4} \cdot N_{H_2SO_4} \cdot 0,014}{m} \cdot 100 \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde: % N concentración de nitrógeno en la muestra (%)

$V_{H_2SO_4}$ es el volumen de ácido usado para titular (ml)

$N_{H_2SO_4}$ normalidad del ácido sulfúrico (N)

m masa de la muestra (g)

0,014 peso del meq de nitrógeno (g)

Fósforo y Potasio

Para la medición de estos macronutrientes en la muestra, se realizó a través del método Olsen (FONAIAP, 1990), donde se realiza una extracción a la muestra como se expone a continuación:

1.-Se pesó 1 g de la muestra de producto final y se le agregó a una solución de NaHCO_3 a 0,5M.

2.-Esta solución fue agitada por 30 minutos y luego filtrada en papel de Whatman N°1.

Esta extracción se utilizó para determinar las concentraciones de fósforo y potasio como se describe a continuación.

En el caso del fósforo:

1.-Se tomaron 2 ml de la solución filtrada y se le agregó 20 ml de una solución de ácido ascórbico y molibdato de amonio (Solución de Trabajo), con el fin de generar el color para la lectura en el fotómetro.

2.-La solución anterior fue agitada con aireación y dejada en reposo por treinta minutos.

3.-La solución se llevó al espectrofotómetro marca Spectronic modelo 20+ ubicado en el laboratorio de PETA para determinar por colorimétricamente el ion fosfato a $\lambda=882\text{nm}$.

En el caso de potasio:

1.-La solución filtrada se llevó para ser analizada en el espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer modelo 3110 ubicado en el laboratorio de PETA.

Los procedimientos anteriormente expuestos pueden ser resumidos en la figura N°28.

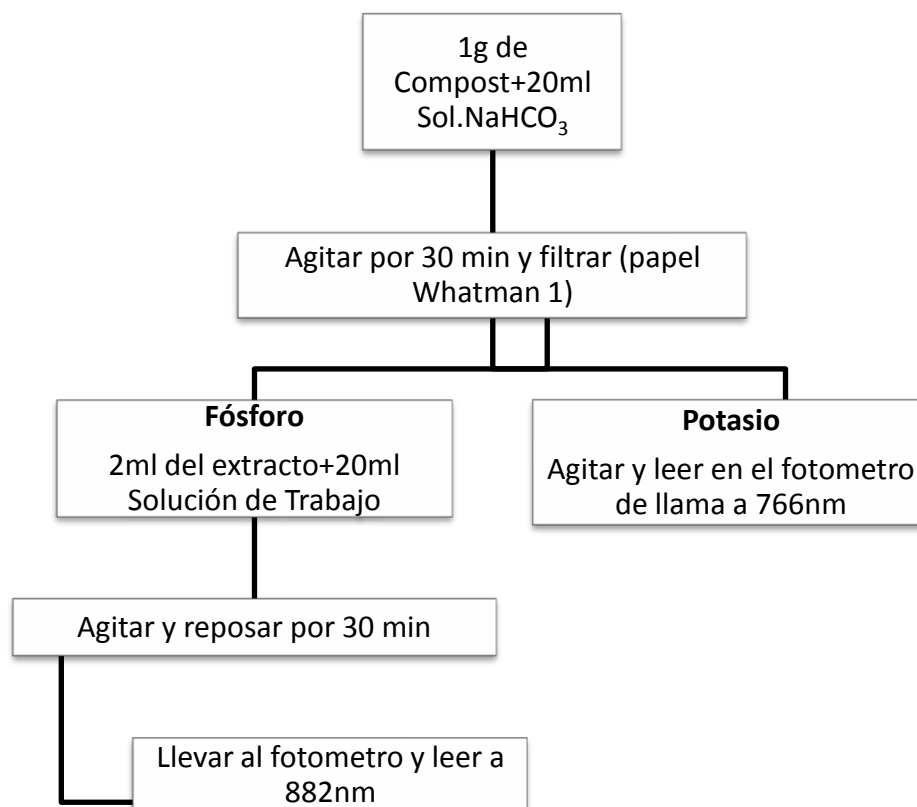


Figura N° 28. Esquema del análisis de fósforo y potasio.

- Para descartar el contenido de elementos que inhiban el crecimiento de las plantas se realizó la germinación de unas semillas de caraota. Esta prueba de fitotoxicidad se hace con base al método de Zuconni y col. (1981).

1.-Se pesó 5 g del producto final de los composteros y se les agregó 25 ml de agua destilada.

2.- La mezcla anterior fue sometida a agitación durante 2 horas con un agitador magnético sobre planchas de agitación marca Corning. Se centrifugó el sobrenadante durante 10 minutos a 3000 rpm en la centrífuga marca Christ ubicada en el laboratorio de fisicoquímica, para luego ser filtrada.

3.-En frascos de compota se colocaron 13 semillas de caraotas con un papel de servilleta, humedeciéndolo con 2 ml del extracto.

4.-Los germinadores son observados en el transcurrir de los días para ver la evolución de las semillas de caraota.

- Por último, para tener una idea de la cantidad de abono que se pueda producir en la comunidad, se calculó el rendimiento de cada una de las experiencias mediante la ecuación 19.

$$R = \frac{m_f}{m_i} \cdot 100 \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde: R es el rendimiento de la experiencia (%)

m_f es la masa de compost que se obtiene al final del proceso (kg)

m_i masa de la mezcla inicial (kg)

FASE IV. DEFINICIÓN DEL ESQUEMA DE PROCESO DE ELABORACIÓN DE ABONO ORGÁNICO.

En función de los resultados obtenidos en las otras fases se planteó un esquema de proceso de biodegradación que pueda ser desarrollado en la futura comunidad OCV José Félix Rivas, para ello se realizó un diagrama de flujo y se dimensionó el proceso, de igual manera se explicaron cada una de los bloques que componen el esquema planteado.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del procedimiento experimental, con sus respectivos análisis. Los resultados se muestran de acuerdo al cumplimiento de los objetivos específicos planteados para este Trabajo Especial de Grado.

FASE I. ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD Y EL TIPO DE DESECHOS A PROCESAR

En la tabla N° 10 se presentan los datos estimados para la Comunidad José Félix Ribas. Que partiendo del desarrollo que se muestra en la metodología, en donde se supone una eficiencia de separación y recolección de los desechos orgánicos en el origen de 60%, resultando que la cantidad de desechos orgánicos disponibles para una planta de compostaje se estime en 334 kg/d, una carga de desechos que podría ser aprovechada como materia prima sin valor de donde se obtendría un producto de valor que tal vez generaría ingresos propios a la comunidad.

Tabla N° 10. Datos estimados de la Comunidad José Félix Ribas.

Comunidad José Félix Ribas	
Población (hab)	1600
Generación de desechos sólidos (kg/d)	1440
Generación de desechos orgánicos (kg /d)	556
Desechos orgánicos disponibles para planta (kg /d)	334

FASE II. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS DESECHOS ORGÁNICOS

Para esta investigación, se define como criterios para la selección, el eliminar la generación de malos olores, utilizar solo el material disponible en la comunidad y en

el caso del estructurante seleccionar aquel que muestre mejores efectos en el proceso de biodegradación.

Debido a que en esta investigación se pretende desarrollar un proceso de obtención de compost para aplicarlo en una comunidad, destacando entre las restricciones que el lugar donde se realizaría el proceso debe estar ubicado dentro de los límites del terreno disponible para la construcción del desarrollo habitacional. Esta restricción hace necesario eliminar o disminuir la producción de gases que generen malos olores o favorezcan el crecimiento de plagas que puedan deteriorar la calidad de vida de los habitantes. Por ello los desechos orgánicos seleccionados para esta investigación son los conformados por restos vegetales de alimentos no procesados, eliminando la presencia de residuos cárnicos y alimentos procesados de la producción de compost, ya que su descomposición genera malos olores por la generación de gases como sulfuro de hidrógeno, mercaptanos, indol, escatol, amoníaco, aminas, entre otros, estos olores favorecen la proliferación de moscas y otros insectos, que lo utilizan como alimento y como lugar para la reproducción.

Además en esta investigación fueron seleccionados como agentes estructurantes el aserrín, por ser un elemento ampliamente utilizado en otras investigaciones y un combinado de grama y hojas (desechos de jardín), considerado por ser unos de los mayores producidos en el municipio (ver Tabla N° 9), además de que la comunidad contara con alrededor de 100000m² de áreas verdes como fuente de generación de estos desechos.

FASE III. MONTAJE Y SEGUIMIENTO DE COMPOSTEROS A FIN DE DETERMINAR LAS MEJORES CONDICIONES DE BIODEGRADACIÓN.

En esta fase se realizaron pruebas preliminares a fin de adquirir pericia en la elaboración del compost y diversas experiencias variando el tamaño de la pila, la frecuencia de aireación, el tipo de agente estructurante, la relación materia orgánica agente estructurante, el tipo de pila y el tiempo de biodegradación. Todo esto se muestra a continuación.

Previas

En la figura N° 29 se puede observar que para ambos composteros en el primer día existe un aumento de la temperatura; este comportamiento es característico de un proceso de biodegradación en vista de que el mismo es exotérmico; sin embargo, se aprecia que ambos composteros no alcanza temperaturas mayores a los 36 °C y al día siguiente ya baja la temperatura hasta 28 °C y se mantiene cercano a ese valor hasta el final de la evaluación. Este perfil de temperaturas se atribuye principalmente a las pérdidas de calor al ambiente, es posible que por ser una pequeña cantidad de mezcla, el calor generado sea bajo y al ser una superficie expuesta al medio ambiente por convección se retira una cantidad de calor que no permite que el compostero alcance mayores temperaturas. Esto lleva a plantear la utilización de un compostero de mayor tamaño, el cual permita reproducir el proceso de biodegradación en todas sus etapas.

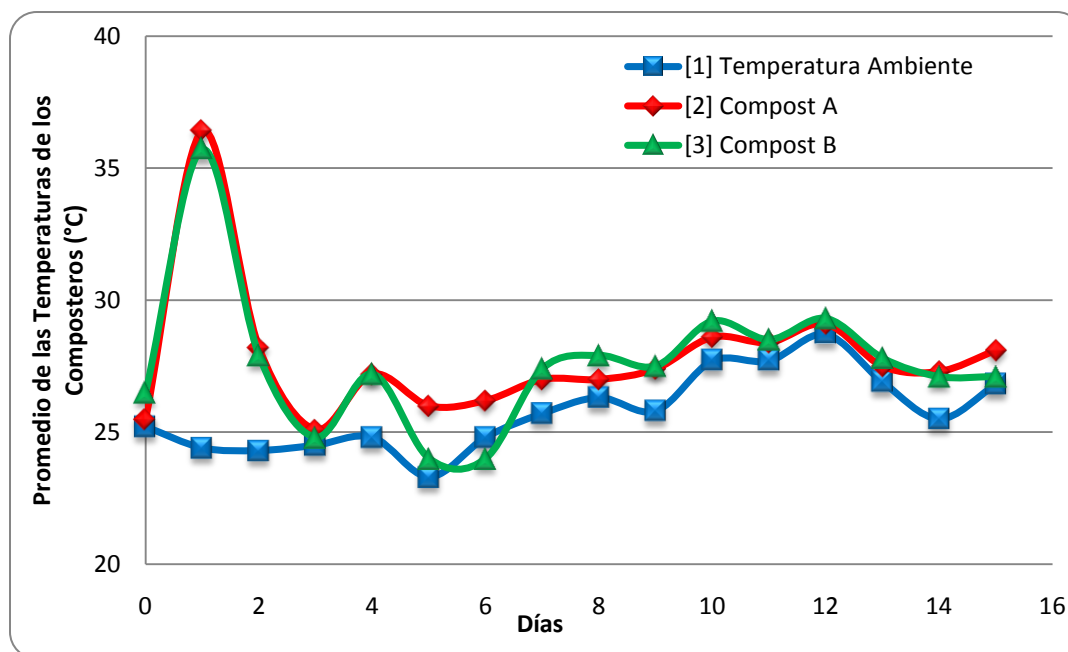


Figura N° 29. Variación de la Temperatura del compost en el tiempo evaluada en composteros de 0,006 m³.

Variación del tamaño de la pila:

A continuación en la Figura N° 29 se presenta la variación de la temperatura de los composteros en función del tiempo de biodegradación.

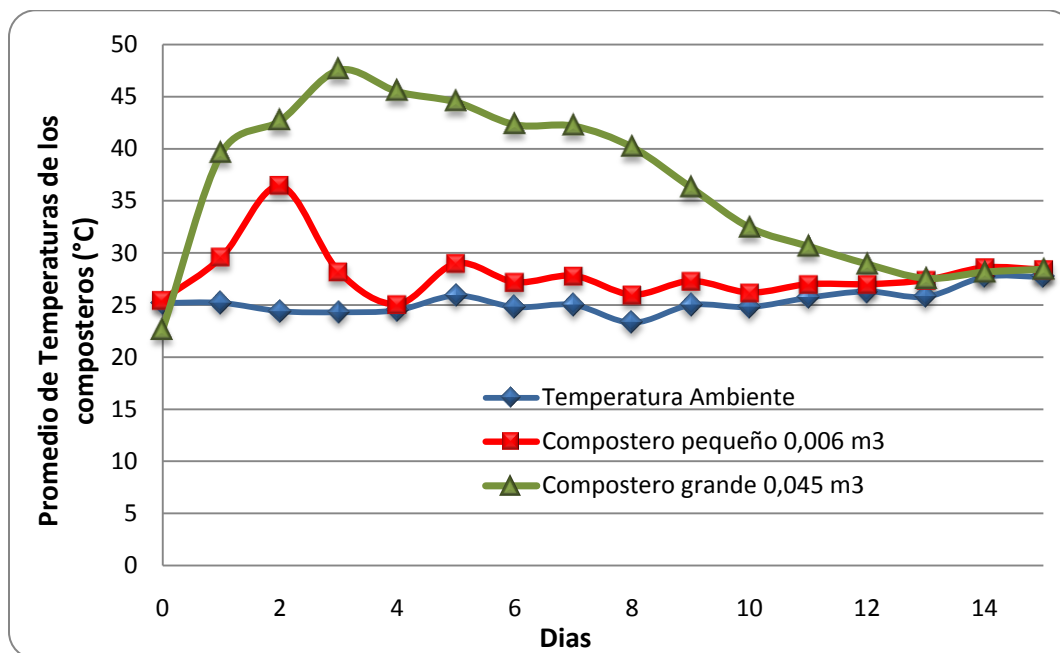


Figura N° 30. Variación de la Temperatura del compost en el tiempo evaluada en composteros de dos tamaños.

En la figura N° 30 se puede observar que para ambos composteros en los primeros días existe un aumento de la temperatura; este comportamiento es característico de un proceso de biodegradación en vista de que el mismo es exotérmico; sin embargo, se aprecia que el compostero de menor tamaño alcanza temperaturas de 36°C y al día siguiente ya baja la temperatura hasta 28°C y se mantiene cercano a ese valor hasta el final de la evaluación; mientras que el compostero de mayor tamaño alcanza temperaturas superiores a 47°C, llegando a la fase termófila manteniendo temperaturas por encima de los 40°C hasta el noveno día de evaluación y finalmente baja a una temperatura similar a la temperatura del ambiente. La diferencia de las temperaturas se le atribuye principalmente a las pérdidas de calor al ambiente, el compostero de menor tamaño presenta mayores pérdidas, ya que al ser una menor cantidad de compost, la cantidad de calor generado es menor y al ser una menor superficie expuesta al medio ambiente por convección se

retira una cantidad de calor que no permite que el compostero alcance mayores temperaturas.

El efecto que genera la disminución temprana de la temperatura se puede apreciar en la figura 31.

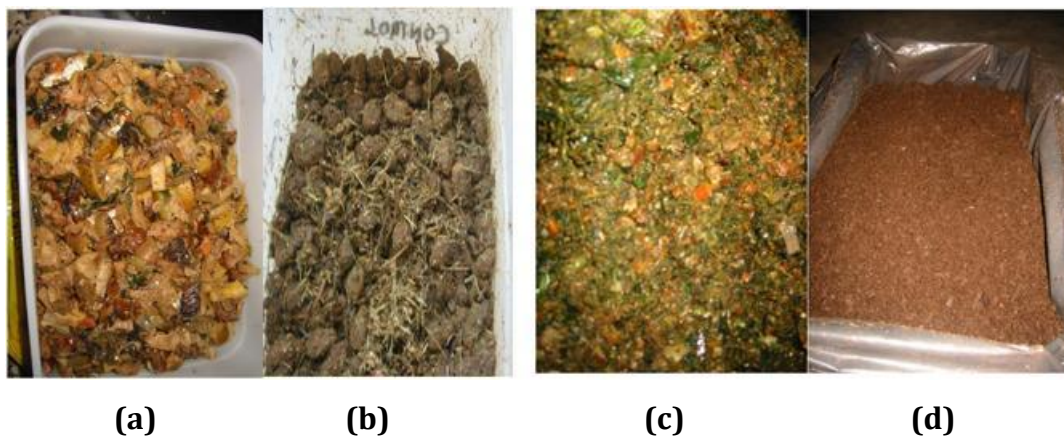


Figura N° 31. Imágenes de los composteros (a) Mezcla inicial compostero pequeño, (b) Compost luego de 15 días compostero pequeño, (c) Mezcla inicial compostero grande y (d) Compost luego de 15 días compostero grande.

En la figura N° 31 se observa que la apariencia del compost de menor tamaño luego de 15 días de biodegradación (Figura N° 31 b) se presenta poco homogénea con apelmazamiento del compost y por ende una baja integración de los componentes, aun se pueden identificar algunos de los compuestos originales de los residuos, lo que indica una baja tasa de biodegradación. A diferencia del la figura N° 31 d, en donde se observa la apariencia del compost de mayor tamaño evaluado en el mismo tiempo de biodegradación, el cual se aprecia homogéneo con una buena integración de los componentes de la mezcla y con forma y textura similar a la tierra. La diferencia entre el grado de biodegradación que presentaron los compost se debe principalmente a que este proceso está conformado por reacciones que cinéticamente se favorece con el aumento de la temperatura, por ende si las pérdidas de calor al ambiente son apreciables, la reacción se desactiva y se detiene o se vuelve muy lento el proceso de biodegradación.

El producto obtenido en esta fase, para el compost de mayor volumen, es de color marrón oscuro, con un olor agradable, parecido a tierra mojada y de apariencia homogénea, suelta, donde hay una degradación completa de los desechos orgánicos pero aun se observa pequeños pedazos de aserrín en el compost (ver figura N° 30-d). Por el contrario, el compost de menor volumen, su producto final tiene una apariencia compacta, donde se observa con mayor facilidad el aserrín no degradado, además de una forma esférica de gran tamaño, similares a la bosta de ganado, de color marrón claro y de olor a tierra húmeda (ver figura N° 30-b).

Por lo antes expuesto, se eligió el compostero de tamaño 0,045 m³ (30cm de alto *30cm ancho *50cm de largo), como el de mejor evolución del proceso de biodegradación.

Variación de la frecuencia de aireación:

A continuación, se presenta la figura N° 32 donde se observa la variación de la temperatura en función del tiempo de biodegradación para las dos frecuencias evaluadas.

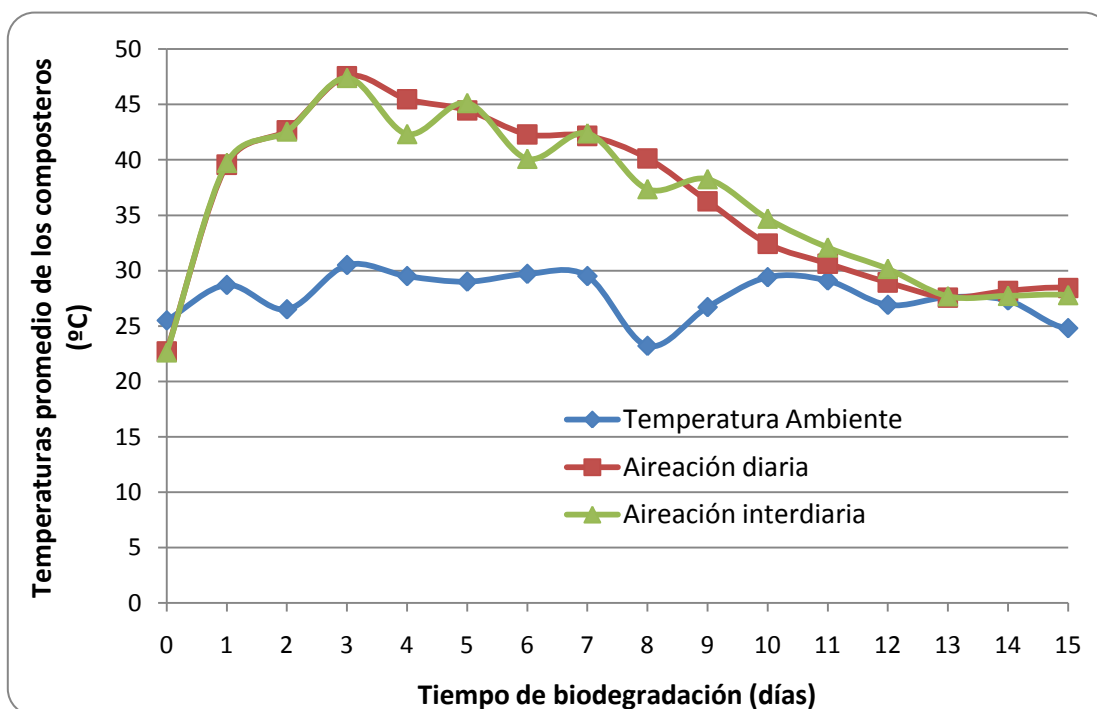


Figura N° 32. Variación de la Temperatura promedio de los composteros en función del tiempo con diferentes frecuencias de aireación.

Al observar la figura N° 32 se aprecia que el compostero de aireación diaria (□) muestra a partir del tercer día un perfil de temperatura con una disminución gradual, mientras el compostero de aireación interdiaria (Δ) presenta una tendencia con saltos de temperatura. Esta diferencia se atribuye a una disminución de la actividad de los microorganismos por falta de oxígeno para el proceso de degradación, en el caso de la aireación interdiaria.

Barrena y col. (2006) reportan que la mayor degradación de la materia orgánica se da en la fase termófila durante la etapa de descomposición, esto se lleva a cabo a temperaturas mayores a los 45°C, por lo que una temperatura más estable en el tiempo resulta favorable para el proceso de biodegradación, por lo que la aireación diaria debería reportar los mejores resultados.

En la figura N° 33 se observa la variación del pH y la conductividad eléctrica en función del tiempo de biodegradación para las dos frecuencias evaluadas.

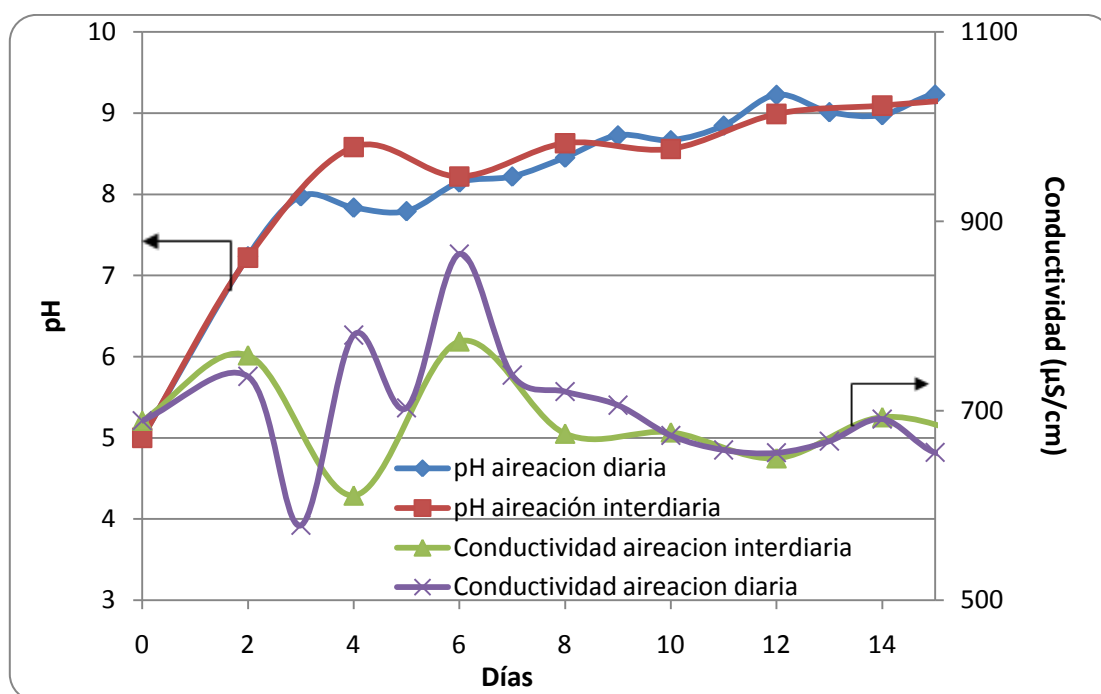


Figura N° 33. Variación del pH y la conductividad de los composteros en función del tiempo con diferentes frecuencias de aireación.

Las curvas de pH de la Figura N° 33, presentan tendencia similares para las dos frecuencias de aireación evaluadas, se observa que a medida que aumenta el tiempo de biodegradación aumenta el pH, este comportamiento se debe a la alcalinización que ocurre durante la fase termófila, la cual está asociada a la producción de amoníaco por la degradación de compuestos nitrogenados de la mezcla inicial (Menoyo, 1995). De igual manera la conductividad eléctrica, no se ve significativamente afectada por la variación en la frecuencia de la aireación y los valores de conductividad se encuentran dentro de un mismo intervalo en función del tiempo. Este comportamiento es contrario al esperado, ya que debido a la liberación de iones por el proceso de degradación este valor debería aumentar a medida que aumenta el tiempo de biodegradación (García, 1990). Este resultado se puede justificar a los componentes de partida en la mezcla inicial, debido a que una ausencia o baja concentración de los elementos promotores de sales en la mezcla inicial se traduce a una pequeña generación de sales durante el proceso (Rasapoor y colaboradores, 2009).

Seguidamente, se presenta la figura N° 34 donde se observa la variación del parámetro porcentaje de materia orgánica (% MO) y la variable porcentaje de humedad (% H) en función del tiempo de biodegradación para las dos frecuencias evaluadas. Esta figura muestra una tendencia decreciente para el porcentaje de materia orgánica (% MO) y el porcentaje de humedad (% H), coincidente con el comportamiento reportado en investigaciones anteriores (ADAN, 1999). La disminución de la materia orgánica durante la degradación se debe a la descomposición de elementos complejos, los cuales son degradados por los microorganismos. La humedad afecta física y biológicamente las propiedades del compost, Ahn y col. (2008) reportan que el intervalo óptimo debe estar entre 60% y 80%, este parámetro se debe regular al momento de construir la pila, agregando agua para aumentar la humedad o agregando material estructurante para disminuirla, no es recomendable la adición de agua durante el proceso, porque su absorción no es instantánea ni homogénea y contribuye a la lixiviación, lo cual facilita el transporte de patógenos (Anh y otros, 2008).

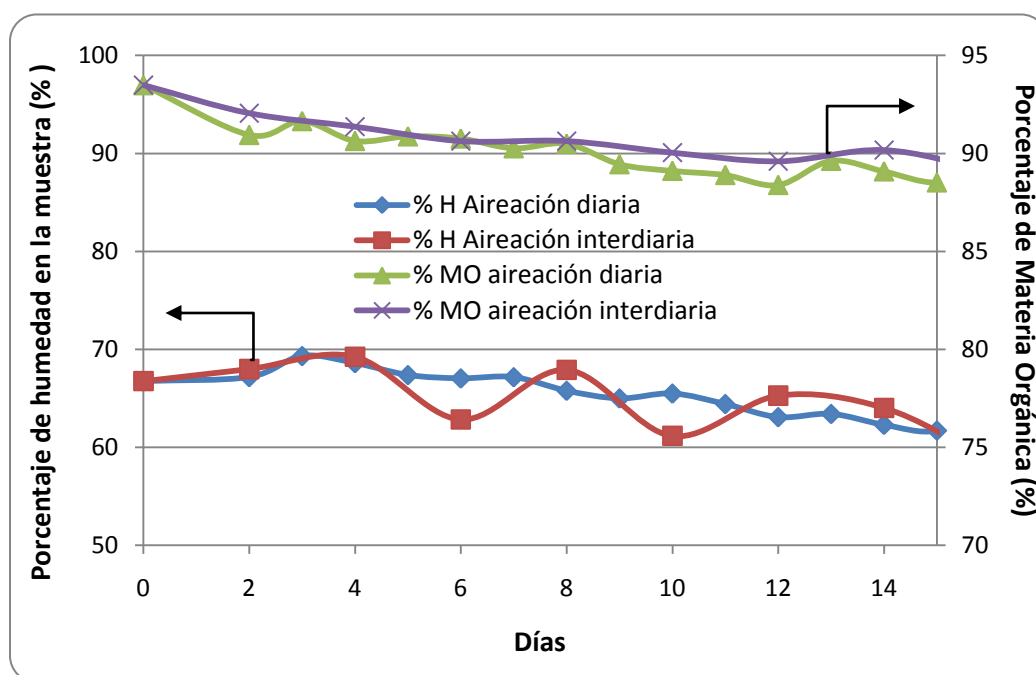


Figura N° 34. Variación del porcentaje de humedad y porcentaje de materia orgánica de los composteros en función del tiempo con diferentes frecuencias de aireación.

En la tabla N° 11 se presentan las relaciones de C/N al inicio y al final del proceso de compostaje.

Tabla N° 11. Relaciones de contenido de carbono y nitrógeno en los composteros al variar la frecuencia de aireación.

Muestra	Relaciones másicas de contenido de carbono y nitrógeno en la muestra	
	Inicial	Final (día 15)
Aireación diaria	36	29
Aireación interdiaria	36	34

Para ambas frecuencia de aireación se observa, que las mezclas iniciales tenían un valor adecuado de relación carbono nitrógeno (C/N), según lo reportado por Soliva (2001), lo cual es clave para la conservación del nitrógeno durante el proceso (ver tabla N° 5); era de esperarse que ambas muestras presentaran un mismo valor ya que la variable que incide principalmente en la relación inicial C/N es el agente estructurante. La relación final C/N para la muestra que tenía la aireación diaria es

menor que la de aireación interdiaria, esto ocurre ya que la cantidad de nitrógeno producido por el compost de aireación diaria es mayor y esto es consecuencia de un proceso de biodegradación más eficiente.

A continuación, en la tabla N° 12 se presentan las propiedades finales del producto en el proceso de compostaje para ambas frecuencias de aireación.

Tabla N° 12. Propiedades finales de los composteros al variar la frecuencia de aireación.

Muestra	Aireación diaria	Aireación interdiaria
Porcentaje de Fósforo (%)	0,06	0,07
Porcentaje de Potasio (%)	1,4	1,3
Porcentaje de Nitrógeno (%)	1,7	1,5
Porcentaje de materia orgánica (%)	89	89
Porcentaje de Humedad (%)	62	64
Densidad aparente (g/cm³)	1,1956	0,8186
Color	Marrón-negro oscuro	Marrón-negro oscuro
Olor	Sin olores desagradable	Sin olores desagradable
pH	9,2	9,1
Conductividad eléctrica (μS/cm)	657	670

En tabla N° 12 se observa que para ambas frecuencias de aireación, el fósforo posee un valor bajo respecto a lo esperado, es probable que esto se debe al bajo contenido de fósforo presente en la mezcla inicial. Se considera que durante el proceso de compostaje el 96 % de este compuesto será asimilado por las células de los microorganismos en crecimiento, incorporándolo a sus estructuras orgánicas y lo transforman en fósforo orgánico insoluble (García, 1990) (Villalba, 2006). Los valores

de los macronutrientes potasio y nitrógeno cumplen con lo esperado, con valores entre 1% y 2% Trejo (1996).

Con respecto al % MO y % H, los valores finales para ambas frecuencia de aireación se consideran altos, el agotamiento de la materia orgánica indica un cese en la actividad biológica, lo cual se observa con una disminución de la temperatura en el proceso (ver figura N° 32), pero según Barrena (2006) el estructurante utilizado de naturaleza vegetal, presenta un contenido en materia orgánica de más del 90%, incrementado de modo significativo el porcentaje de materia orgánica de la mezcla. El estructurante no es biodegradable o se degrada muy lentamente en las condiciones del proceso, pues en su mayor parte está constituida por celulosas, hemicelulosas y ligninas, por lo cual la presencia del estructurante enmascara la evolución de la materia orgánica del residuo compostado, falseando los resultados obtenidos, además aumenta el % H debido a la retención de agua y evitando su evaporación.

Para una aireación diaria, se observa en la tabla N° 12 que la densidad aparente es mayor a la aireación interdiaria, indicando un producto de menor porosidad y mayor compactación, aunque en ambos casos su valor es mayor a lo esperado como producto final (ver tabla N° 7).

Según Sztern y Pravia (1999) el producto debe ser alcalino, lo cual concuerda con lo observado en la tabla N° 12, aunque estos valores están levemente por encima al rango señalado por García (1990) entre 7 y 8,5. La conductividad eléctrica, se encuentra por debajo de los parámetros citados por DGA (2001), que establece entre 1500 y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este puede deberse posiblemente a un pobre aporte del material estructurante, lo cual será explicado en la fase posterior.

El producto obtenido en esta fase, en ambos compost, es de color marrón oscuro, con un olor agradable, parecido a tierra mojada, de apariencia homogénea y suelta, donde no se observa la presencia de desechos orgánicos, siendo solo apreciable pequeños pedazos de aserrín (ver figura N° 35).

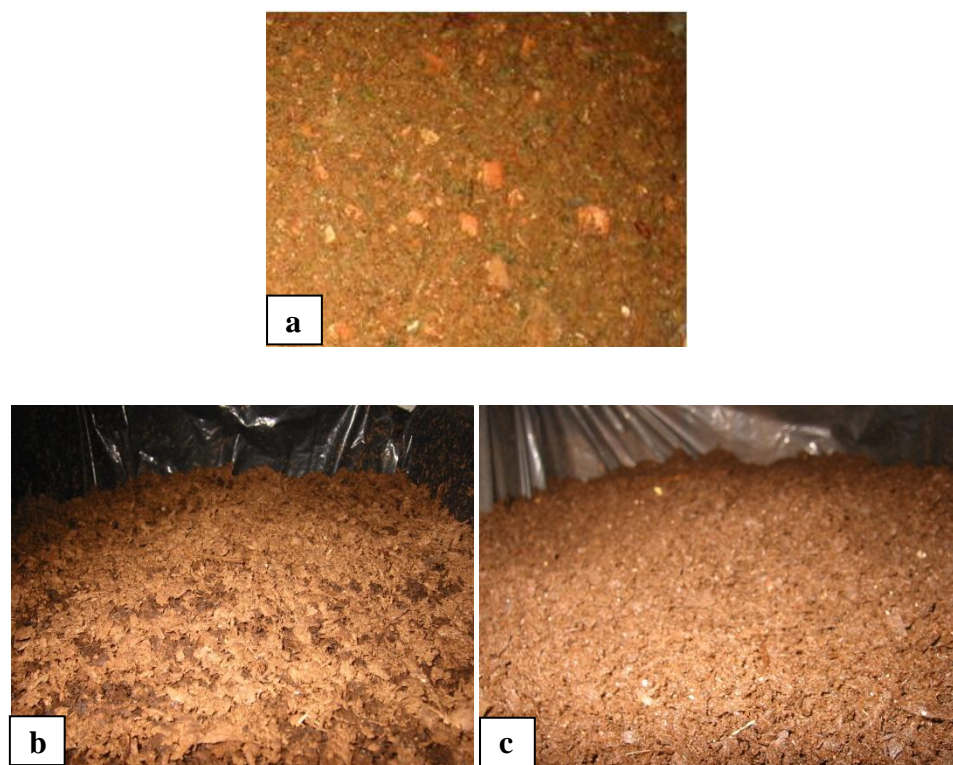


Figura N° 35. Imágenes de producto final (a) Mezcla inicial (b) Producto del compostero de aireación diaria y (c) Producto del compostero de aireación interdiaria.

Debido a lo antes planteado, los diferentes periodos aireación, no muestran diferencias significativas en las propiedades finales del producto (ver tabla N° 12), por lo cual es tomado como mejor frecuencia de aireación, el que muestra un perfil de temperatura más cercano a la tendencia esperada, correspondiente a la aireación diaria.

Tipo de agente estructurante y relación desechos orgánicos-agente estructurante:

En la figura N° 36 se observa que el perfil de temperatura que presenta el agente GH en relación 1:1, se mantiene en una fase termófila desde el día uno hasta el día seis, permaneciendo durante un mayor tiempo y a mayores temperaturas que las otras relaciones; este comportamiento indica que en este compost se presentó una

mayor actividad biológica, posiblemente por una mayor porosidad del agente que favorece la retención de aire y de agua.

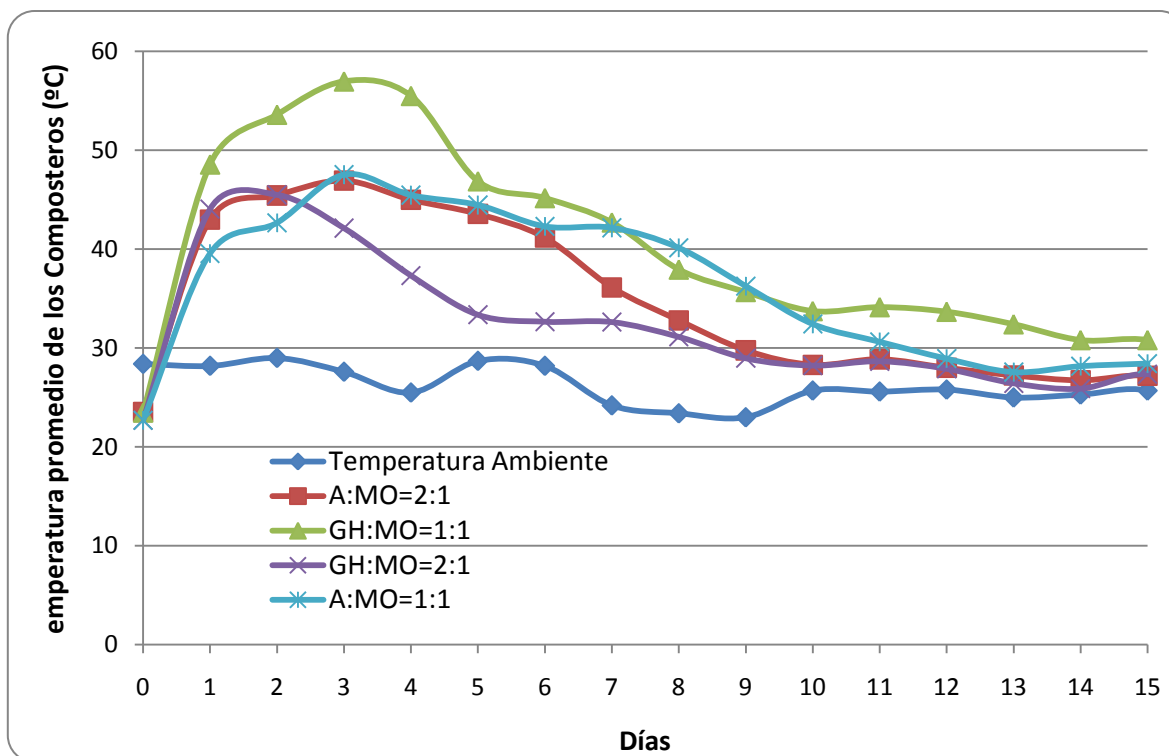


Figura N° 36. Variación de la Temperatura promedio del compostero en función del tiempo con diferentes tipos y relaciones de materia orgánica y agente estructurante.

Las demás relaciones evaluadas presentaron perfiles de temperaturas similares entre sí, esto se atribuye en el caso del agente GH en relación 2:1 a la poca cantidad de materia orgánica existente en la mezcla inicial, trayendo como consecuencia que exista menor cantidad de material que requiere menor tiempo para la biodegradación por lo que la generación de calor disminuye y no se alcanzan altas temperaturas. El aserrín tiene una mayor capacidad de absorber humedad, sin embargo al mezclarse con los restos de comida y el agua se compacta haciendo que el flujo de oxígeno en el seno del compost disminuya, impactando de forma negativa a la actividad biológica del compost, es por esto que presenta un perfil de temperatura que se encuentra por debajo del reportado por el agente GH en relación 1:1.

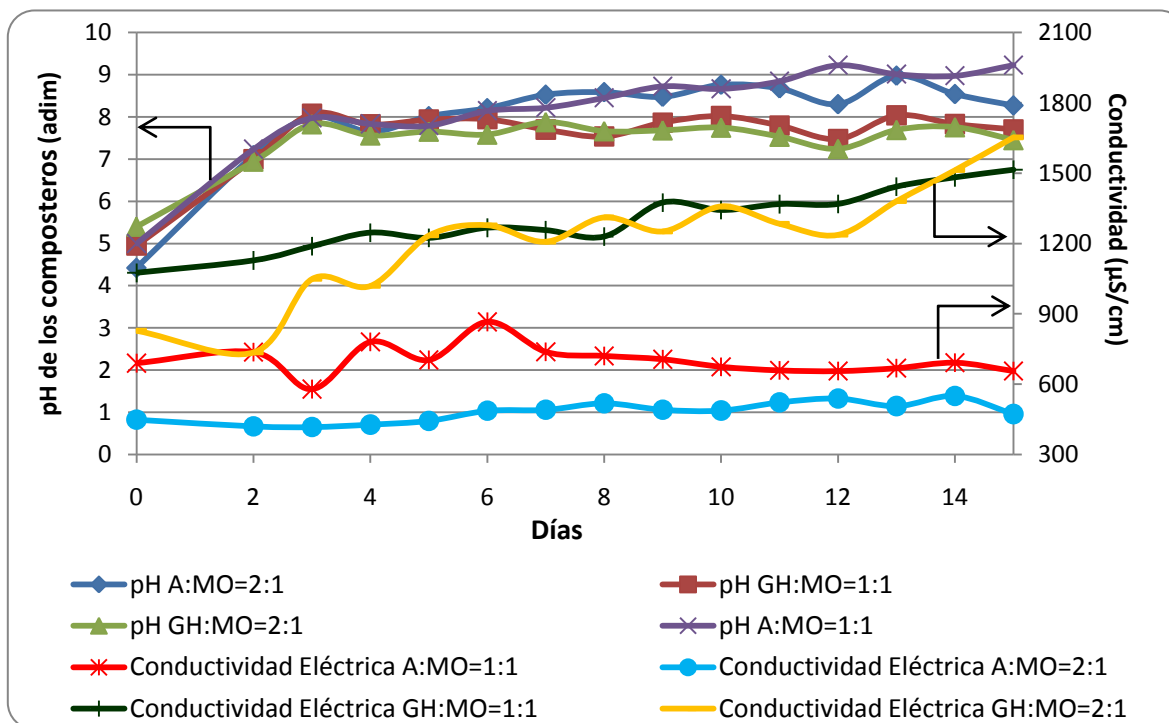


Figura N° 37. Variación del pH y la conductividad de los composteros en función del tiempo con diferentes tipos y relaciones de materia orgánica y agente estructurante.

En la Figura N° 37, para el pH, no se logró observar la etapa de acidificación (disminución de pH) producida a comienzo del proceso de biodegradación, pero si es visible la alcalinización durante la fase termófila para todas las relaciones evaluadas. Para el caso del estructurante GH en ambas relaciones, se observa luego del quinto día que el valor de pH permanece constante y dentro del intervalo reportado por la DGA (2001). Al evaluar las relaciones que contenían aserrín se observa que las curvas presentan un incremento en los valores de pH en todo el tiempo de evaluación finalizando con valores que se encuentran ligeramente por encima de los esperado; esto concuerda con lo discutido al analizar la variación de temperatura, ya que al tener una menor cantidad de oxígeno presente en el seno del compost se favorece la actividad de las bacterias anaeróbicas que aumentan la producción de amoníaco y esto hace que incrementen los valores de pH .

La variación de la conductividad eléctrica también se presenta en la figura N° 37, en esta se observa un comportamiento constante durante todo el intervalo de evaluación para el agente A. La curva correspondiente a la variación de la

conductividad del estructurante GH, muestra una tendencia creciente, debido a una mayor liberación de iones por el proceso de degradación. A fin de determinar la influencia de cada uno de los agentes estudiados en este parámetro se determinó el valor de la conductividad de un extracto de grama en $1903 \mu\text{S}/\text{cm}$ y del aserrín en $140 \mu\text{S}/\text{cm}$. Esto demuestra que la diferencia en el comportamiento de los composteros de diferentes agentes, se debe al aporte independiente de cada estructurante; este comportamiento fue reportado por Acosta y col. (2006) donde atribuye valores altos de conductividad en el producto, a la presencia de elementos de alta conductividad en la mezcla inicial (Acosta Y., Cayama J., Gómez E., Reyes N., Rojas D., García H., 2006).

A continuación se presenta la figura N° 38 donde se observa la variación del parámetro % MO y la variable % H en función del tiempo de biodegradación para los dos estructurantes y diferentes relaciones evaluadas.

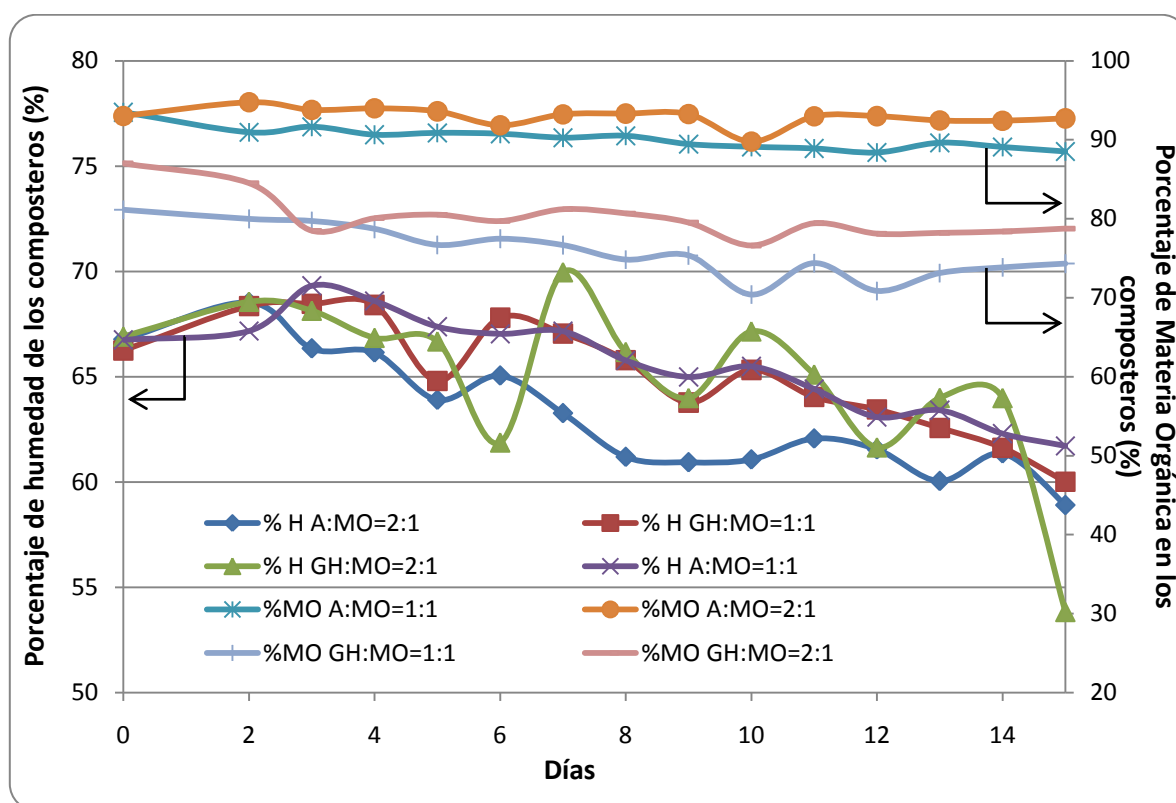


Figura N° 38. Variación del porcentaje de humedad y de materia orgánica de los composteros en función del tiempo con diferentes tipos y relaciones de materia orgánica y agente estructurante.

Se observa en la figura N° 38, que la variación del % MO para el agente GH muestra una leve disminución en función del tiempo, mientras que el estructurante A presenta una tendencia constante, ambos estructurantes son de origen vegetal, compuesto de elementos como celulosa, que son difíciles de degradar y enmascaran la evolución de la materia orgánica del residuo compostado. Igualmente ambos estructurantes, por sus cualidades como absorbentes, disminuyen la pérdida de humedad por evaporación, esto se puede apreciar en la figura N° 38, en donde para todas las relaciones estudiadas y los diferentes tipos de agentes, se observa una leve disminución del % H en el tiempo. Cabe señalar que aunque los valores de %H son mayores de 50, en el producto final no se observó formación de líquidos por lixiviación, esto se debe a que ambos estructurantes además de evitar la evaporación, son capaces de absorber altos volúmenes de líquido. Según Haug (1993) el agente A puede absorber en humedad hasta el 40% de su volumen.

Las relaciones de C/N al inicio y al final del proceso de compostaje, para ambos estructurantes y sus diferentes relaciones son presentadas en la tabla N° 13.

Tabla N° 13. Relaciones de contenido de carbono y nitrógeno en los composteros al variar el agente estructurante y la relación materia orgánica agente estructurante

Muestra	Relaciones másicas de contenido de carbono y nitrógeno en la muestra	
	Inicial	Final (día 15)
A:MO= 1:1	36	29
A:MO= 2:1	40	42
GH:MO= 1:1	25	27
GH:MO= 2:1	30	33

En la tabla N° 13 se observa que a excepción del agente A en relación 2:1, la relación C/N se encuentra dentro del intervalo entre 25-35, reportado como adecuado por Acosta y colaboradores (2006). Para el caso de las relaciones finales, solo el estructurante A en relación 1:1 cumple con una disminución de la relación C/N, acercándose a un valor de madurez, según Defrieri y col. (2005) quienes reportan que un compost se puede considerar maduro con una relación C/N de 25 o

menor (Defrieri, R. L.; M. P. Jimenez, D. Effron y M. Palma, 2005). Con respecto al estructurante GH en sus dos relaciones y al estructurante A en la relación 2:1, se observa en la tabla N° 13 que sus valores finales aumentaron comparados a los iniciales, debido probablemente a la combinación de dos efectos: uno es un escaso o ligero descenso del carbono orgánico total (ver apéndice D), debido a que su mayor concentración es de carbono difícilmente biodegradable como el contenido en la celulosa, que junto al efecto de pérdida de nitrógeno (ver apéndice E), lo cual disminuye su concentración final, posiblemente a un exceso de nitrógeno que se pierde en forma amoníaco (Acosta y col.,2006), esta pérdida puede ser causada por la volatilización del amoníaco, este fenómeno se favorece a altas temperaturas y valores de pH por encima de 7,5 (Sánchez-Monedero, 2001).

En resumen a fin de presentar una visión general de los efectos del agente estructurante en el compost, en la tabla N° 14 se presentan las propiedades finales del producto en el proceso de compostaje para ambos agentes estructurantes y sus diferentes relaciones.

En tabla N° 14 se observa que para las experiencias evaluadas, el fósforo posee un valor bajo a lo esperado (ver tabla N° 13), esto se debe al bajo contenido de fósforo que se encontraba en la muestra inicial. El porcentaje de nitrógeno para ambos estructurantes y sus relaciones, están en el intervalo esperado al igual que el porcentaje de potasio con valores entre 1% y 2% estos valores fueron reportados como adecuados por Trejo (1996).

Para el agente GH en relación 1:1, se observa en la tabla N° 14 la menor densidad aparente y es el único que entra en el intervalo indicado en la tabla N° 7, lo que indica un producto de mayor porosidad y menor compactación. En acuerdo con los resultados reportados en las gráficas de seguimiento de los parámetros de proceso. Según DGA (2001) el producto debe ser alcalino, lo cual concuerda con lo observado en la tabla N° 14, pero el estructurante que se encuentra dentro del intervalo reportado por García (1990) con valores de pH entre 7 y 8,5, es el estructurante GH en su dos relaciones. Además para este estructurante también se

obtuvieron valores de conductividad eléctrica dentro de los parámetros establecidos por DGA (2001), que establece entre 1500 y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tabla N° 14. Propiedades finales de los composteros al variar el agente estructurante y la relación materia orgánica agente estructurante

(*)

Muestra	A:MO 1:1	A:MO 2:1	GH:MO 1:1	GH:MO 2:1	Tabla N°7
Porcentaje de Fósforo (%)	0,05	0,06	0,07	0,08	
Porcentaje de Potasio (%)	1,4	1,7	3,6	2,5	1-2
Porcentaje de Nitrógeno (%)	1,7	1,2	1,5	1,3	
Porcentaje de materia orgánica (%)	89	93	74	79	25
Porcentaje de Humedad (%)	62	59	60	54	40
Densidad aparente (g/ml)	1,2	0,7	0,6	0,8	0,5-0,6
Color	Marrón oscuro	Marrón oscuro	Negro	Marrón	-
Olor	Sin olores desagradable	Sin olores desagradable	Sin olores desagradable	Sin olores desagradable	-
pH	9,2	8,3	7,8	7,5	Alcalino
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	656	473	1515	1653	1500-2000 (*)

Departamento de Agricultura de DGA, 2001

El producto obtenido para los composteros de estructurante A, en sus dos relaciones, es de color tierra negra con un olor agradable parecido a tierra mojada y de apariencia homogénea donde todavía se puede apreciar la presencia de aserrín (ver figura N° 39). El compost de agente GH en su relación 1:1, posee un color negro olor a tierra mojada y apariencia es más compacta, debido a un tamaño de partícula mayor, aunque no se observan desechos orgánicos, si es apreciable la presencia de pedazos pequeños de hojas, que no fueron degradados y se compactaron formando

pequeñas esferas (ver figura N° 39). En el caso de agente GH en su relación 2:1, el compost posee un color marrón claro, con apariencia poco homogénea, donde los desechos orgánicos fueron degradados por completo pero se observan gran cantidad de filamentos, los cuales son restos de grama y hojas no degradados, lo cual generan un olor a grama cortada (ver figura N°39).



Figura N° 39. Imágenes de producto final (a) Producto del compostero de estructurante A relación 1:1, (b) Producto del compostero de estructurante A relación 2:1, (c) Producto del compostero de estructurante GH relación 1:1 y (d) Producto del compostero de estructurante GH relación 2:1.

Lo antes expuesto, lleva a la selección del agente GH en su relación 1:1 como el estructurante que presenta un perfil de temperatura con una mayor permanencia en una fase termófila, además de reflejar los mejores valores de propiedades finales en el producto (ver tabla N° 14).

Tiempo de biodegradación:

Se observa en la figura N° 40, que para todos los casos evaluados, luego de llegar a un máximo de temperatura, la temperatura de los composteros decrece y a partir del día quince se mantienen constante, llegando a valores iguales a la temperatura ambiente y en ocasión menores. La disminución de la temperatura y su tendencia constante luego del día quince, es un indicativo de la disminución o un cese de la actividad de los microorganismos, lo que se traduce en un fin del proceso de biodegradación.

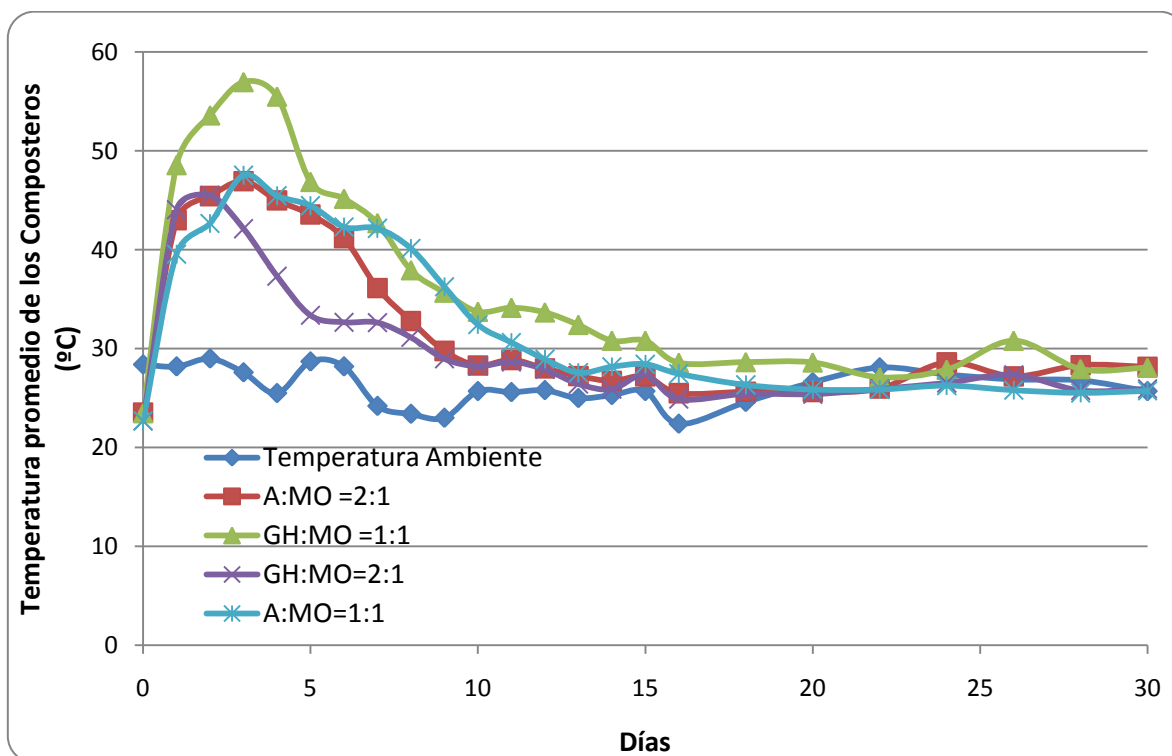


Figura N° 40. Variación de las Temperaturas promedios en función de tiempo para un tiempo de biodegradación de 30 días.

En la tabla N° 15, se que observa el compost con agente A en relación 1:1, presenta un leve aumento de la relación C/N de quince a treinta días, esto se debe a una disminución de la concentración del nitrógeno (ver apéndice E) por volatilización de amoniaco, resultando un aumento en la relación C/N final, esto coincide con los resultados reportados en experiencias anteriores, en donde se manifestaba que el

aserrín tendía a absorber más agua que la grama y a compactarse más por lo que la circulación de oxígeno en el seno del compost es menor y esto favorece al proceso anaerobio lo que favorece la producción de amoníaco.

Tabla N° 15. Relaciones de contenido carbono nitrógeno para diferentes tiempos de biodegradación

Muestra	Relaciones másicas de contenido de carbono y nitrógeno en la muestra		
	Inicial	Final (15 días)	Final (30 días)
A:MO= 1:1	36	29	30
A:MO= 2:1	40	40	25
GH:MO= 1:1	25	25	15
GH:MO= 2:1	30	30	17

Para los casos de los de composteros con agente A (relación 2:1) y los de agente GH (relaciones 1:1 y 2:1, se observa en a la tabla N° 15, una disminución de la relación C/N de quince a treinta días, esto se debe a un aumento de la concentración del nitrógeno (ver apéndice E), que junto al efecto del carbono orgánico, que disminuye muy poco su concentración, debido a su difícil degradación, trae como resultado una relación C/N menor. Es posible que el aumento de concentración de nitrógeno se deba, a que durante este periodo de tiempo, los microorganismos transformaran formas de nitrógeno inorgánico, que aun se encontraban en las mezclas, en amonios y nitratos, aumentando la concentración del nitrógeno medido a los quince días.

Se observa en la tabla N° 16, que la concentración de nitrógeno disminuye de quince a treinta días, solo para el estructurante A (relación 1:1), lo que indica una posible pérdida. Con respecto a los demás composteros, la concentración de nitrógeno aumenta de quince a treinta días, debido a la transformación de compuestos restantes de nitrógeno inorgánico, en compuestos como amonio y nitratos. Para los

macronutrientes fósforo y potasio, se obtuvo un aumento de la concentración de quince a treinta días, en los composteros con agente A (relación 1:1) y con agente GH (relación 1:1), ocasionado por los microorganismos, que tuvieron un mayor tiempo para asimilar los nutrientes en formas inorgánicas, para transformarlos a compuestos orgánicos. Solo en los composteros con agente A (relación 2:1) y con agente GH (relación 2:1), se observa una disminución de la concentración, aunque la pequeña diferencia de 0,1% se puede justificar por posibles errores del muestreo, ya que la pérdida de ambos nutrientes ocurre por el lixiviación y ésta no se observó.

El % MO, para todos los composteros (Tabla N° 16), presenta una disminución el valor de los treinta días con respecto al de quince días, y aunque todavía es alto para lo esperado (ver tabla en la N° 7), su disminución se debe al leve decrecimiento del carbono (ver apéndice D) que forma parte entre 45% y 60% de la materia orgánica (Haug, 1993) y es descompuesto por los microorganismos en un mayor tiempo de acción.

En los valores del % H, que se observan en la tabla N° 16, el compostero de estructurante A (relación 1:1), disminuyó su valor en mayor período de tiempo, esto debido a que la aireación seguía favoreciendo su evaporación, en los otros casos el % H, incrementó su valor de quince a treinta días, ya que es posible que al encontrarse los composteros a bajas temperaturas junto a un material estructurante no saturado de humedad ocurra una absorción de la humedad del medio.

Para el caso del compostero de agente A (relación 1:1), la densidad aparente, mejora en este periodo de tiempo, como se observa en la tabla N° 16, obteniendo un producto menos compactado. En los composteros restantes, no se observó un cambio significativo entre los valores de quince y treinta días.

Se observa en la tabla N° 16, que el pH para el compostero de agente A (relación 1:1), disminuye su valor. Aunque el pH está influenciado por los componentes en la mezcla de partida, su decrecimiento se puede producir por la fuga de amonio volatilizado durante la pérdida de humedad. En los otros composteros el cambio observado no es significativo.

Tabla N° 16. Propiedades finales de los composteros para diferentes tiempos de biodegradación

Muestra	Porcentaje de Nitrógeno (%)	Porcentaje de Fósforo (%)	Porcentaje de Potasio (%)	Porcentaje de materia orgánica (%)	Porcentaje de Humedad (%)	Densidad aparente (g/ml)	Color	Olor	pH	Conductividad eléctrica (µs/cm)
A:MO= 1:1 (15 días)	1,7	0,06	1,4	89	62	1,1956	Marrón oscuro	Tierra mojada	9,2	656
A:MO= 1:1 (30 días)	1,6	0,07	1,5	88	59	0,9892	Marrón oscuro	Tierra mojada	8,6	697
A:MO= 2:1 (15 días)	1,2	0,05	1,7	93	59	0,7160	Marrón oscuro	Tierra mojada	8,3	473
A:MO= 2:1 (30 días)	2,0	0,05	1,6	92	69	0,7942	Marrón oscuro	Tierra mojada	8,7	554
GH:MO= 1:1 (15 días)	1,5	0,07	3,3	74	60	0,5526	Marrón -negro oscuro	Tierra mojada	7,7	1514
GH:MO= 1:1 (30 días)	2,8	0,06	3,5	71	69	0,5264	Marrón -negro oscuro	Tierra mojada	8,2	1975
GH:MO= 2:1 (15 días)	1,3	0,08	2,5	79	54	0,8320	Marrón oscuro	Tierra mojada	7,5	1653
GH:MO= 2:1 (30 días)	2,5	0,07	2,4	72	66	0,8374	Marrón oscuro	Tierra mojada y hojas secas	7,8	1692

Los valores de conductividad eléctrica incrementan de quince a treinta días, para todos los composteros. Este aumento se relaciona con la disminución de la materia orgánica, debido al proceso de biodegradación, el cual libera sales al medio aumentando la concentración y dando como resultado una mayor conductividad.

Al igual que en la experiencia anterior, el producto obtenido para los compostero de estructurante A, en sus dos relaciones y de estructurante GH, en sus dos relaciones, no presentan cambios físicos, manteniendo el mismo color, olor y apariencia (ver figura N° 41).



Figura N° 41. Imágenes de producto final a los treinta días (a) Producto del compostero de estructurante A relación 1:1, (b) Producto del compostero de estructurante A relación 2:1, (c) Producto del compostero de estructurante GH relación 1:1 y (d) Producto del compostero de estructurante GH relación 2:1.

Los resultados anteriores muestran que el producto obtenido con el compostero, de mejor estructurante, agente GH en su relación 1:1, no evidencia una significativa diferencia, en los valores de las propiedades del producto final,

a los quince y treinta días. Estos valores a los treinta días siguen siendo mejores que los obtenidos en los otros productos finales.

Tipo de pila:

Con el fin de suministrar el oxígeno adicional al aportado por la aireación mecánica, se realizó un cambio en la estructura del compostero evaluando pilas de pared cerrada y de pared de malla, empleando como mezcla inicial la del esructurante GH en su relacion 1:1.

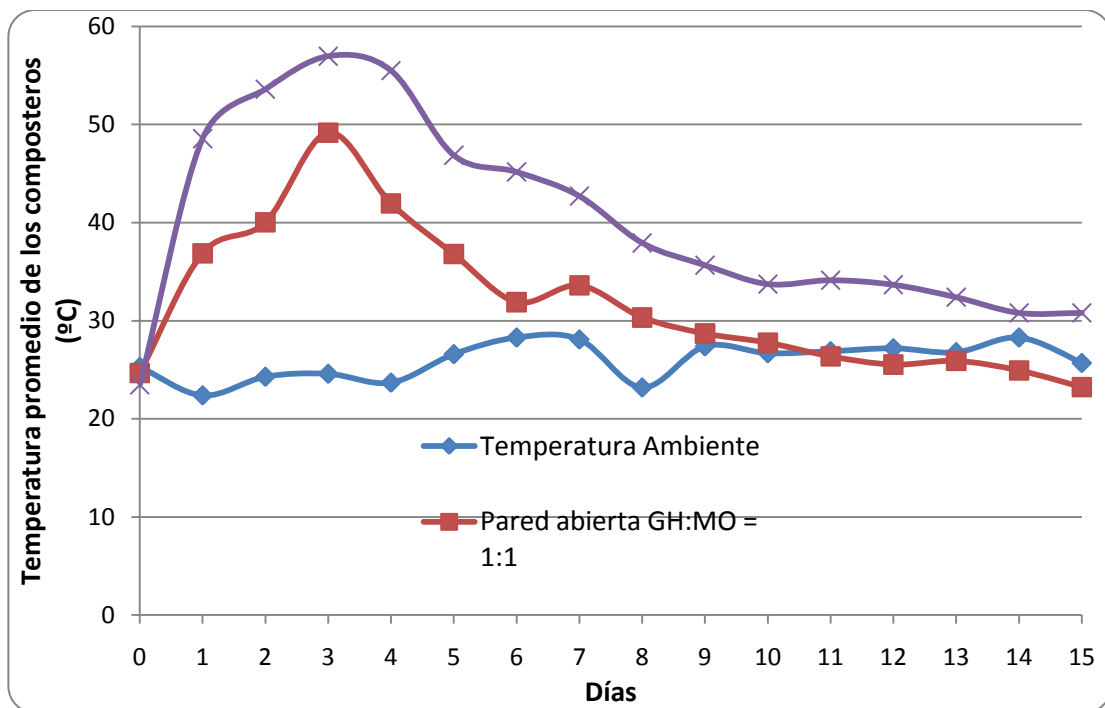


Figura N° 42. Variación de las Temperaturas promedios en función de tiempo para diferentes composteros con paredes de malla

En la Figura N° 42, se puede observar que la pila de pared cerrada permanece en la fase termófila durante un mayor tiempo y a mayores temperaturas que el compostero de pared de malla, es posible que para las dimensiones en que se trabajó, la pared de malla retire demasiado calor de la pila, lo que ocasiona la disminución de temperatura.

Seguidamente, se presenta la figura N° 43 donde se observa la variación del pH en función del tiempo de biodegradación para los dos tipos de pilas evaluados. Se observa en esta figura que para ambos tipos de pilas, no fue posible medir la etapa de acidificación producida al comienzo del proceso de biodegradación, sin embargo si es visible la alcalinización durante la fase termófila. Para ambos tipos de pila, se observa luego del tercer día, una tendencia constante que finaliza dentro del rango reportado por la DGA (2001), no se observan diferencias significativas entre la curva de pH para la pared abierta y la pared cerrada.

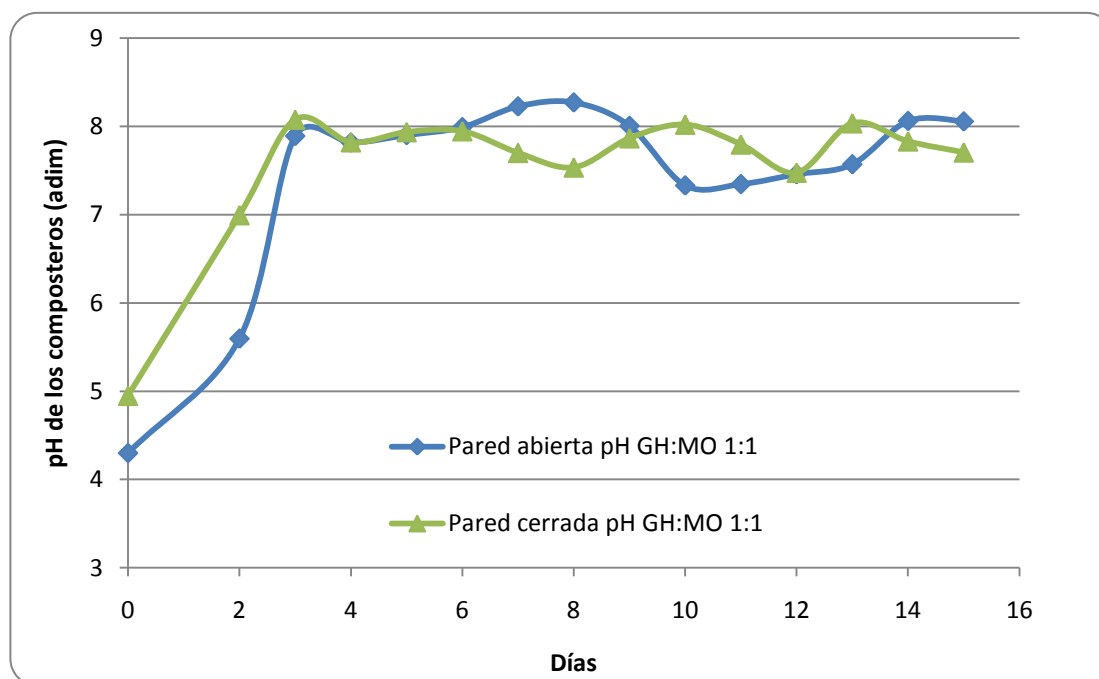


Figura N° 43. Variación de pH en función de tiempo para diferentes composteros con paredes de malla.

A continuación se presenta la figura N° 44, donde se observa la variación de la conductividad eléctrica en función del tiempo de biodegradación para los dos tipos de pila evaluada. Se obtuvo en los casos una tendencia creciente, con un mayor aumento para la pila de pared abierta, es posible que esta mayor

variabilidad no sea debido a la diferencia física de los composteros, sino más bien una diferencia en el aporte de elementos generadores de sales por el estructurante o por los desechos orgánicos.

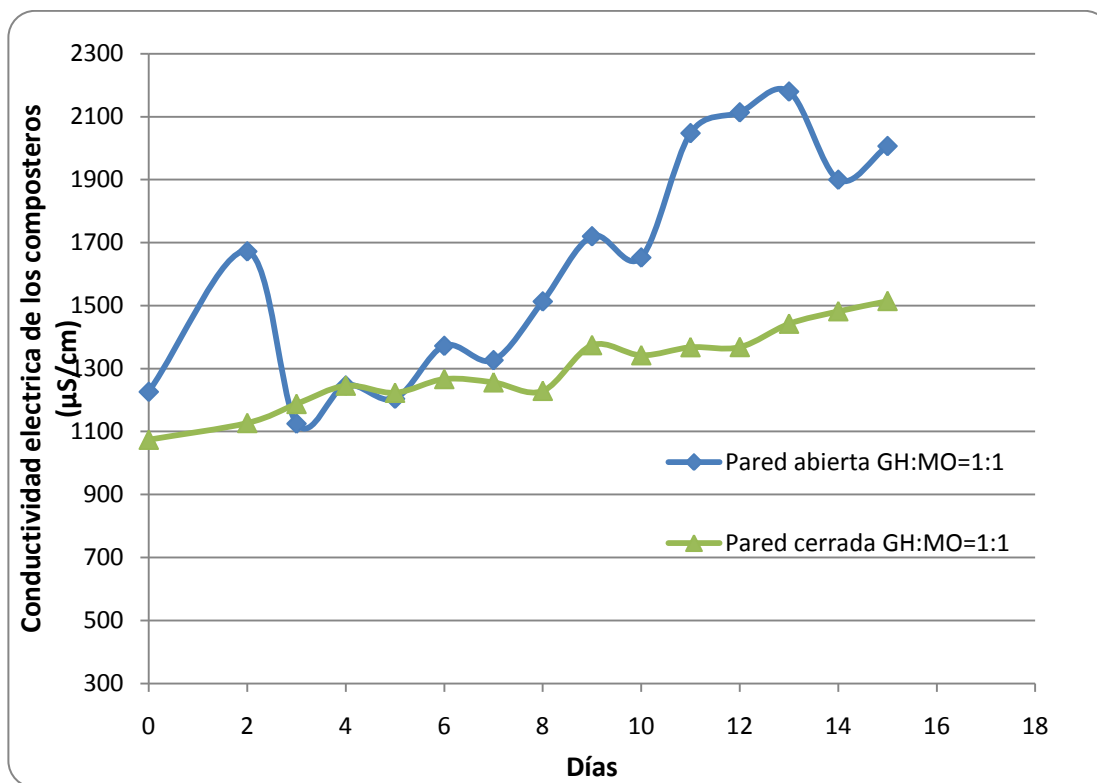


Figura N° 44. Variación de la conductividad eléctrica en función de tiempo para diferentes composteros con paredes de malla

Raspoor (2009) presenta en su investigación que existe una relación entre la conductividad eléctrica y diferentes flujos de aireación, esta relación se debe, a que cuando se proporciona una aireación adecuada a la pila, la degradación de la materia orgánica es mayor e incrementa con ello la concentración de sales. Aunque esto puede ser una causa, no debe ser tomada como definitiva, debido a que el perfil de temperatura de pared abierta, muestra una menor actividad de los microorganismos y es posible que el aumento de la conductividad se debe a los elementos que componen la mezcla inicial.

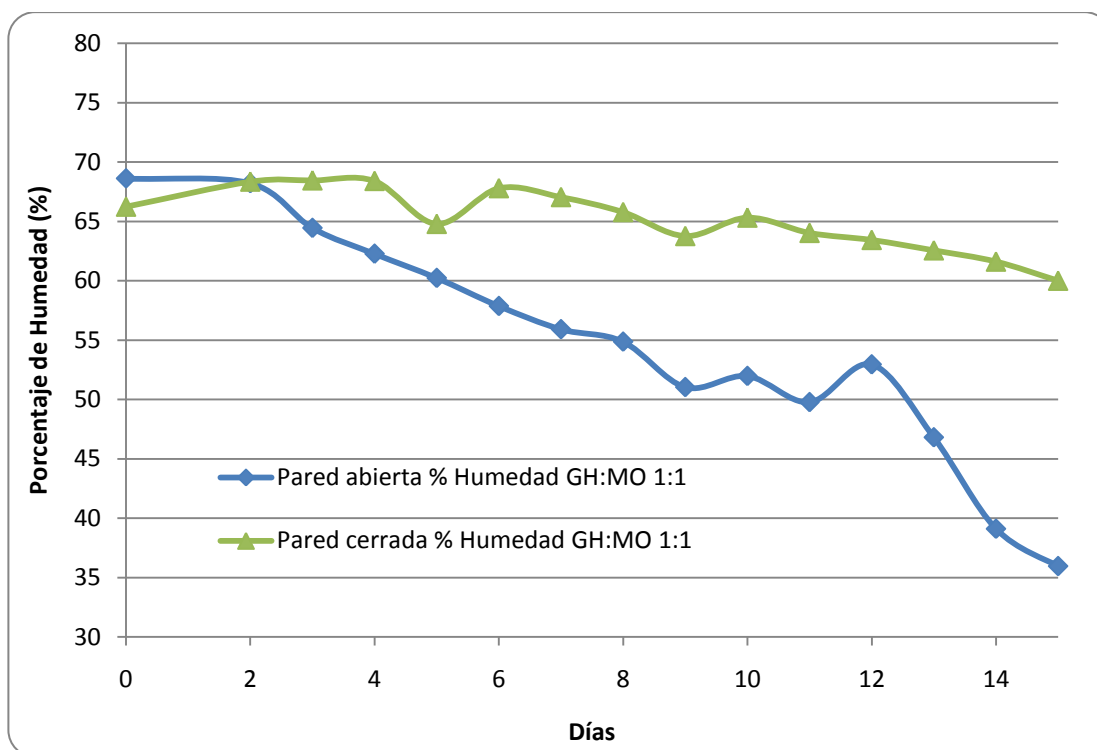


Figura N° 45. Variación del porcentaje de humedad en función de tiempo para diferentes composteros con paredes de malla

En la Figura N° 45, se observa que la pila de pared abierta, presenta una mayor pérdida de la humedad, debido a que la pared de malla facilita la ventilación pasiva de forma natural, donde el aire en el interior de la pila se calienta y se satura en agua, desplazándose hacia arriba por efecto de su menor densidad y provocando un ligero vacío que produce la entrada de aire fresco del exterior, este proceso se conoce como efecto chimenea (Haug, 1993).

A continuación se presenta la figura N° 46, donde se observa la variación del parámetro % MO en función del tiempo de biodegradación para los dos tipos de pilas evaluadas. En esta figura se observa nuevamente el efecto de enmascaramiento, en la evolución de la materia orgánica del residuo compostado, causado por la presencia de compuestos difíciles de degradar en el estructurante, esto hace que la variación del porcentaje de materia orgánica se haga poco evidente en el tiempo.

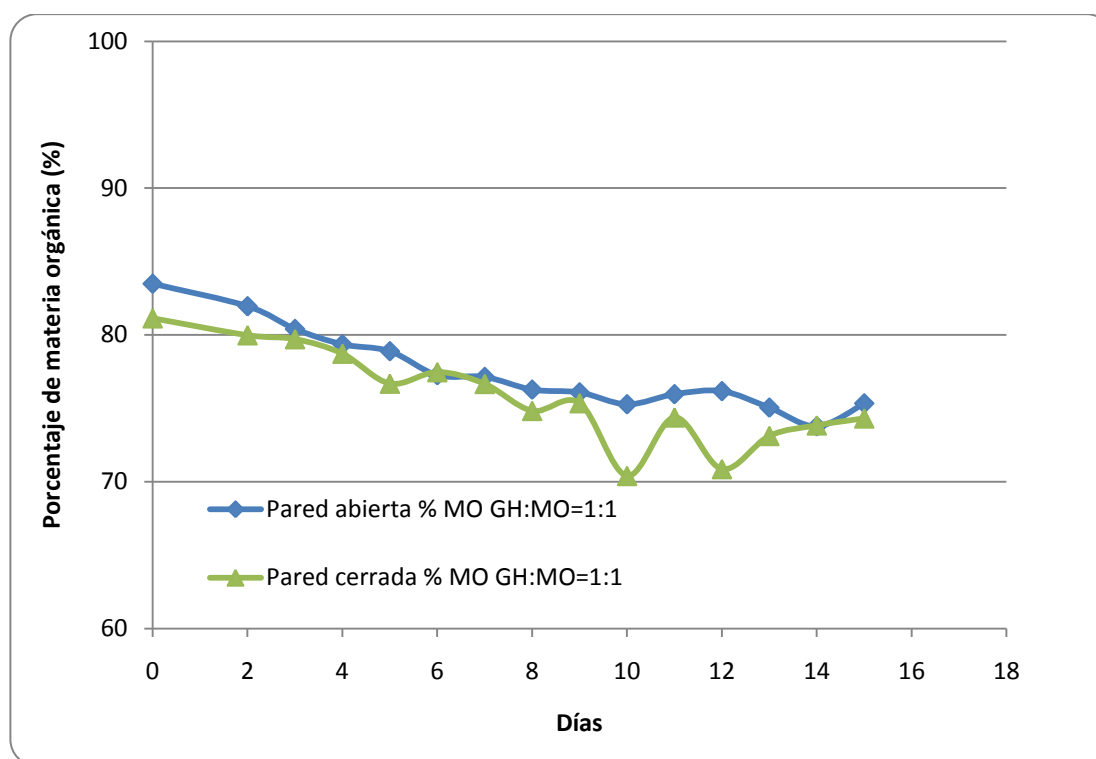


Figura N° 46. Variación del porcentaje de materia orgánica en función de tiempo para diferentes composteros con paredes de malla

A continuación, en la tabla N° 17 se observa las relaciones de C/N al inicio y al final del proceso de compostaje, para ambos tipos de pila. Se observa que la pila de pared abierta presenta una relación inicial C/N baja, lo que favorece la pérdida de nitrógeno a lo largo del proceso (ver tabla N° 5) y unido a la mayor aireación lograda por la pared abierta, traen como resultado una relación C/N final mayor a la inicial, debido a la disminución de la concentración de nitrógeno y a un escaso o ligero descenso del carbono orgánico total. Para la pila de pared cerrada, se inicia el proceso con una relación C/N mayor, pero esta relación también puede permitir una pérdida cercana al 10% (ver tabla N° 5). Además, la pila de pared abierta está conformada por el mismo estructurante de la pila de pared cerrada, agente con alto contenido de materia orgánica compuesta entre 45% y 60% de carbono orgánico (Haug, 1993), el cual es difícil de degradar, por estar presente en compuestos como celulosa y lignina, lo que da como resultado

un leve descenso en la concentración de carbono. Por la anterior ante expuesto la pila de pared cerrada también presenta un aumento en la relación C/N, pero en menor proporción a la pila de pared abierta.

Tabla N° 17. Propiedades relaciones de carbono nitrógeno de los composteros al el tipo de pared

Muestra	Relaciones másicas de contenido de carbono y nitrógeno en la muestra	
	Inicial	Final (día 15)
Pared abierta GH:MO= 1:1	16	21
Pared cerrada GH:MO= 1:1	25	27

Finalmente, en la tabla N° 18 se observa las propiedades finales del producto en el proceso de compostaje para la pila de pared abierta y la de pared cerrada. Se observa que los valores de fósforo y potasio en la pared cerrada son un poco mayores a los de la pared abierta, esta diferencia no se asocia a la aireación y por ende no es atribuible al tipo de pared, porque como menciona Raspoor (2009), no hay impacto significativo de la aireación en la concentración final de los macronutrientes, la diferencia de estos valores se asocia a los componentes que forman la mezcla inicial (Carolla, 2006). Los valores del nitrógeno en ambos tipos de pila, están en el rango esperado entre 1% y 2%, lo cual se observa en la tabla N° 7. Para el % MO, los valores finales para ambos tipos de pila se consideran altos, pero este resultado posiblemente se deba a lo explicado en la fase anterior. En el caso del % H, se observa en la tabla N° 17 que la pila de pared abierta, tiene un valor menor con respecto a la pila de pared cerrada y más cercano a los mínimos establecido como parámetro de calidad (ver tabla N° 7), este valor menor en la pila de pared abierta se favoreció debido a una mayor circulación de aire en la pila.

Tabla N° 18. Propiedades finales de los composteros al el tipo de pared

Muestra	Pared Cerrada	Pared Abierta
	GH:MO= 1:1	GH:MO= 1:1
Porcentaje de Fósforo (%)	0,07	0,05
Porcentaje de Potasio (%)	3,6	2,5
Porcentaje de Nitrógeno (%)	1,5	2,0
Porcentaje de materia orgánica (%)	74	91
Porcentaje de Humedad (%)	60	43
Densidad aparente (g/ml)	0,6	1,6
Color		
Olor		
pH	7,7	9,2
Conductividad eléctrica (µs/cm)	1515	2007

En la pila de pared abierta la densidad aparente es la mayor, esto lleva a pensar que se tiene un producto de menor porosidad y mayor compactación. Lo que indicaría que el perfil de menor temperatura en la pila de pared abierta, se debe a una falta de espacios libres que retengan aire y no al exceso de aire que retira una mayor cantidad de calor.

Según DGA (2001) el producto debe ser alcalino, lo cual concuerda con lo observado en la tabla N° 17 para ambas pilas, pero el compostero que entra en el rango señalado por García (1990) entre 7 y 8,5, es el de pared cerrada. Un valor más alto de pH en la pila de pared abierta, se puede justificar en los materiales de partida en la mezcla inicial, mencionado por Pierre (2009) que señala que el pH está fuertemente influenciado por el tipo de iones aportados por las propiedades de los materiales que se compostan, más que por su proporción. Los dos tipos de pila presentan valores de conductividad eléctrica que se encuentran dentro de los parámetros citados por DGA (2001), que establece

entre 1500 y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo el mayor valor obtenido para la pila de pared abierta (Pierre F., Rosell M., Quiroz M. y Granda Y., 2009).

Lo antes expuesto, lleva a la selección del compostero de pared cerrada, como el más eficiente, por mostrar un perfil de temperatura con una mayor permanencia en una fase termófila, además de reflejar los mejores valores de propiedades finales en el producto (ver tabla N° 18).

El producto obtenido para el compostero de pared cerrada, posee un color negro, de olor a tierra mojada y de una apariencia homogénea pero más compacta, debido a un tamaño de partícula mayor, aunque no se observan desechos orgánicos, si es apreciable la presencia de pedazos pequeños de hojas, que no fueron degradados y se compactaron, formando pequeñas esferas (ver figura N° 47). Y en el caso del compostero de pared abierta, el compost posee un color marrón claro, su apariencia poco homogénea, donde los desechos orgánicos fueron degradados por completo pero se observan gran cantidad de filamentos, los cuales son restos de grama y hojas, que en comparación con el compostero de pared cerrada, fueron menos degradados, su olor también es agradable, parecido a la tierra mojada pero menos intenso que el producto de la otra pila (ver figura N° 47).



Figura N° 47. Imágenes de producto final (a) Producto del compostero de pared cerrada y (b) Producto del compostero de pared abierta.

Rendimiento

Se observa en la tabla N° 19, que los valores de rendimiento más altos son para los composteros de pared abierta y el relación agente estructurante A-materia orgánicas 2:1, pero estos composteros no son tomados como los mejores, debido a que, como se observó en experiencias anteriores, el compostero de pared abierta y el relación agente estructurante A-materia orgánicas 2:1, no desarrollaron los mejores perfiles de temperatura, ni tampoco obtuvieron los mejores valores en las propiedades del producto final. No es el caso del compostero de pared cerrada y relación agente estructurante GH-materia orgánica 1:1, el cual muestra el mejor valor de rendimiento (excluyendo los composteros de pared abierta y el relación agente estructurante A-materia orgánicas 2:1) junto al mejor perfil de temperatura y los mejores valores para las propiedades del producto.

Tabla N° 19. Rendimiento del proceso con respecto a la masa inicial y la masa final

Compostero	Desechos Orgánico (kg)	Agente Estructurante (kg)	Mezcla Inicial (kg)	Producto (kg)	Rendimiento (%)
Grande	18.5	8.6	27.1	13.4	49
Pequeño	1.5	0.5	2	0.9	45
Aireación diaria	18.5	8.6	27.1	13.4	49
Aireación interdiaria	18.7	9	27.7	12.1	44
A:MO= 1:1	18.5	8.6	27.1	13.4	49
A:MO= 2:1	13.2	3.5	16.7	10.8	65
GH:MO= 1:1	17.9	2.8	20.7	7.8	38
GH:MO= 2:1	9.2	2.3	11.5	1.9	17
Pared cerrada	17.9	2.8	20.7	7.8	38
Pared abierta	10.9	3.5	14.4	3.4	24

Lo antes expuesto junto a lo observado en las experiencias anteriores, muestran que para la obtención del mejor abono orgánico se utilizó un compostero de pared cerrada, de volumen 0,045m³, con agente estructurante GH en una relación con la materia orgánica de 2:1, con una aireación diaria y en un periodo de 15 días.

Fitotoxicidad

Como se explicó en la metodología, fue montada una germinación de semillas de caraotas para todas las muestras de compost obtenidas, de las experiencias de variación de tamaño, variación de frecuencia de aireación, variación de estructurante y a las diferentes relaciones de agentes estructurantes, variación del tiempo de biodegradación y la variación del tipo de pila. Con el fin de determinar la existencia de compuestos tóxicos, que inhiban la germinación de las semillas. Esta prueba mostró como resultado para todas las muestras evaluadas los productos, que al segundo día del montaje de la germinación, ya se observaban brotes de raíces de las semillas. Al cuarto día, para todos los productos hay un desarrollo mayor de las raíces y la aparición de tallos. Para el quinto día, se observó la presencia de hojas. Resultado que puede indicar que no hay o que la presencia de elementos fitotóxicos es muy baja (ver apéndice F).

FASE IV. DEFINICIÓN DEL ESQUEMA DE PROCESO DE ELABORACIÓN DE ABONO ORGÁNICO.

A través de los resultados de las experiencias discutidas previamente, se pudo conformar una base experimental para proponer un esquema de proceso de elaboración del compost con condiciones de alimentación y de trabajo definidas, así como, las variables más importantes que se deben monitorear durante el proceso.

En la figura 48 se muestra el esquema de proceso propuesto para la elaboración de abono.

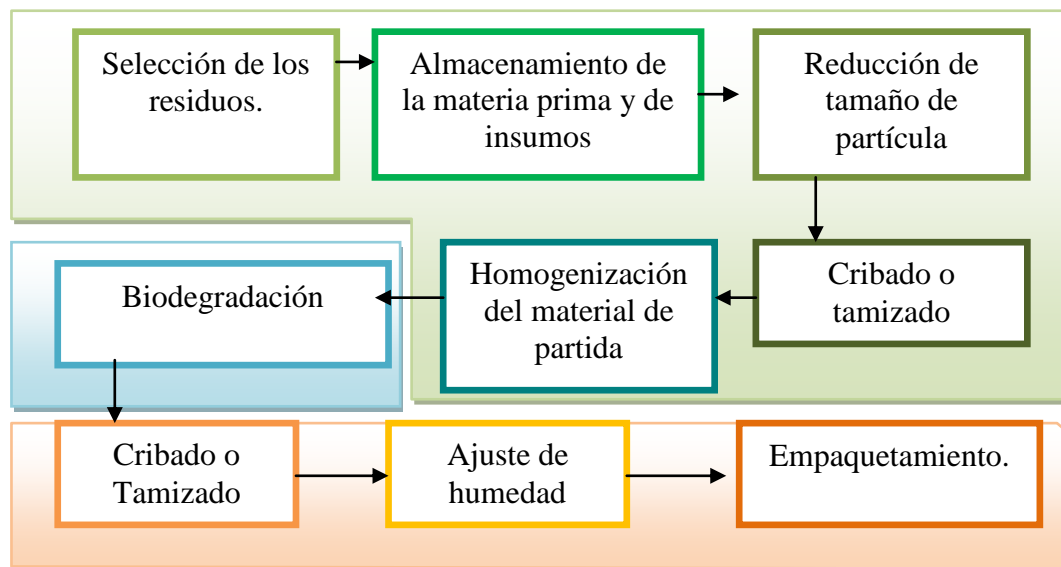


Figura N° 48. Esquema de proceso propuesto para la producción de abono.

Como se puede observar en la figura 48, el proceso se divide en tres secciones acondicionamiento de la materia prima y los insumos (bloque verde), reacción (bloque azul) y acondicionamiento del producto final (bloque naranja) a continuación se explicará detalladamente cada uno de los bloques propuestos en el esquema de proceso, basándose en la figura 49 en la cual se presenta un diagrama de flujo preliminar del proceso.

Acondicionamiento de la materia prima y los insumos:

Se parte con una selección del material biodegradable, desechos de alimentos, los cuales deben ser recolectados desde el origen, llevando a cabo una previa capacitación de la comunidad. Esta capacitación permitirá que los habitantes recolecten todos aquellos desechos que sirvan como materia prima, estos desechos son los restos previos a la preparación de alimentos (restos de fruta, vegetales, etc.), sin incluir restos de alimentos procesados ni alimentos

cárnicos. Esta selección incluirá también los desechos producidos en las áreas verdes de las casas, los cuales se utilizarán como agente estructurante.

La siguiente etapa es el almacenamiento de materia prima e insumos, se tiene la idea inicial que los habitantes almacenen en sus hogares los desechos de cuatro días de la semana (aproximadamente 4 kg de materia prima), para luego ser recolectados por algún tipo de unidad móvil y llevados al espacio físico que está destinado como depósito de la planta, la cantidad de materia prima recolectada sería de 1336 kg. Como insumo se tiene el agente estructurante, el cual se tiene pensado provenga de restos de las áreas verdes (grama, hojas, troncos, etc.), que será recolectado durante las limpiezas de áreas verdes de la comunidad, se estima que serán necesarios 445 kg para una carga de materia orgánica de 4 días.

Luego de que tanto la materia prima como agente estructurante están en la planta, usando para ello un elevador con canchales se lleva a una trituradora (TR-101 y TR-102) para la reducción de tamaño de partícula y posteriormente pasan a un sistema de tamizado mecánico (T-101 y T-102) llevándola a un tamaño entre 1 y 5 cm (tamaño fijado por esta experiencia).

A continuación, la materia prima y el estructurante deben ser mezclados, en una relación volumétrica 1:1, lo cual equivale a 3 veces la masa de la materia prima por cada unidad de agente estructurante, para ello se empleará un tractor pequeño (MS-101) que llevará el producto tamizado a ser mezclado. Este se llevará a cabo de manera mecánica en una mezcladora M-101 con capacidad para manejar 1781 kg. A la mezcla obtenida se le verificará la humedad por el test de la mano, el cual se detalla en la metodología, esto permitirá tomar la decisión de agregar o no agua. Luego se tomarán muestras a fin de hacer una verificación más rigurosa de la humedad, la determinación del pH y de la conductividad.

Posteriormente, al tener la mezcla inicial lista, se pasa al montaje de las pilas, las cuales serán contenedores de paredes cerradas y de una dimensión de 6 m³ cada uno y con dimensiones de 3,6 m de largo*1,7 m de ancho*1 m de alto. Estos podrían ser de pared de bloque o madera, sobre la superficie del suelo. El dimensionamiento de los recipientes se realizó tomando una densidad aparente de la mezcla inicial de 290 kg/m³ (Sánchez, s.f), una masa de mezcla inicial de 1781 kg y para las dimensiones se fijó la altura en 1 m y se fijó una relación ancho: largo de 1:2.

Reacción

Esta etapa tiene el fin de transformar los compuestos complejos presente en la mezcla inicial, en compuestos sencillos, que sirven como nutrientes para la aplicación en suelos, en otras palabras se obtendrá un producto con valor agregado partiendo de una materia prima sin valor comercial. Lo cual se logra por la biodegradación; este procedimiento es análogo a la operación de un reactor por carga, donde se tiene una etapa de carga, una de reacción y una de descarga.

En la etapa de carga, se realiza el llenado de la pila esto se hace empleando tractor pequeño (MS-101), luego ocurre la etapa de reacción, la cual es llevada a cabo por microorganismos anaeróbicos, a través de reacciones que necesitan oxígeno para efectuarse y que además son exotérmicas, es decir que liberan calor, lo cual aumenta la temperatura de la pila, este proceso se llevará a cabo en los bioreactores (BR-101/102/103/104/105), cada uno de estos equipos dispondrán de sensores para monitorear la temperatura y con ello verificar que se esté llevando a cabo el proceso de biodegradación. Se dispondrán de 5 bioreactores a fin de garantizar la continuidad del proceso, este cálculo se hizo tomando en cuenta que el proceso de maduración se lleva a cabo en 15 días y la carga de materia orgánica y agente estructurante llega a la planta cada 4 días. Para favorecer la aireación se realiza la agitación de la pila mediante

mezcla mecánica , luego la pila permanecerá inmóvil durante dos días luego del montaje, para que inicie la reacción, después de lo cual se efectúa la aireación diaria, con el fin de suministrar oxígeno y regular la temperatura. Concluyendo con la descarga de la pila, después de quince días de proceso, donde se obtendría con un rendimiento de 38% para un compostero de pared cerrada y estructurante GH en relación 1:1 (ver tabla 19), una producción de 200 kg de compost/d.

Acondicionamiento del producto:

Luego de desmontada la pila, se obtiene el producto final y se procede a determinar la calidad del producto, seleccionando una cantidad de muestras estadísticamente representativas, a fin de hacerle la caracterización necesaria a fin de estimar la calidad del producto. Los parámetros de pH, conductividad, % MO y % H, dado que son procedimientos sencillos pueden realizarse dentro de la planta. Sin embargo, para la determinación de nitrógeno, fósforo y potasio se debería suscribir algún tipo de convenio con instituciones que permita el análisis de macronutrientes, como parámetro mínimo para establecer la calidad del producto.

Finalmente, el producto es llevado a la trituradora (TR-103) y al sistema mecánico de tamizado (T-103) a fin de llevarlo a tamaños de partícula entre 1-0,5 cm y con esto cumplir las especificaciones para la venta del producto. Luego el producto pasa a través de una cinta transportadora en donde es depositado en cajas dosificadoras para colocarlo en sacos de 5 kg, los cuales se almacenaran para su distribución y venta.

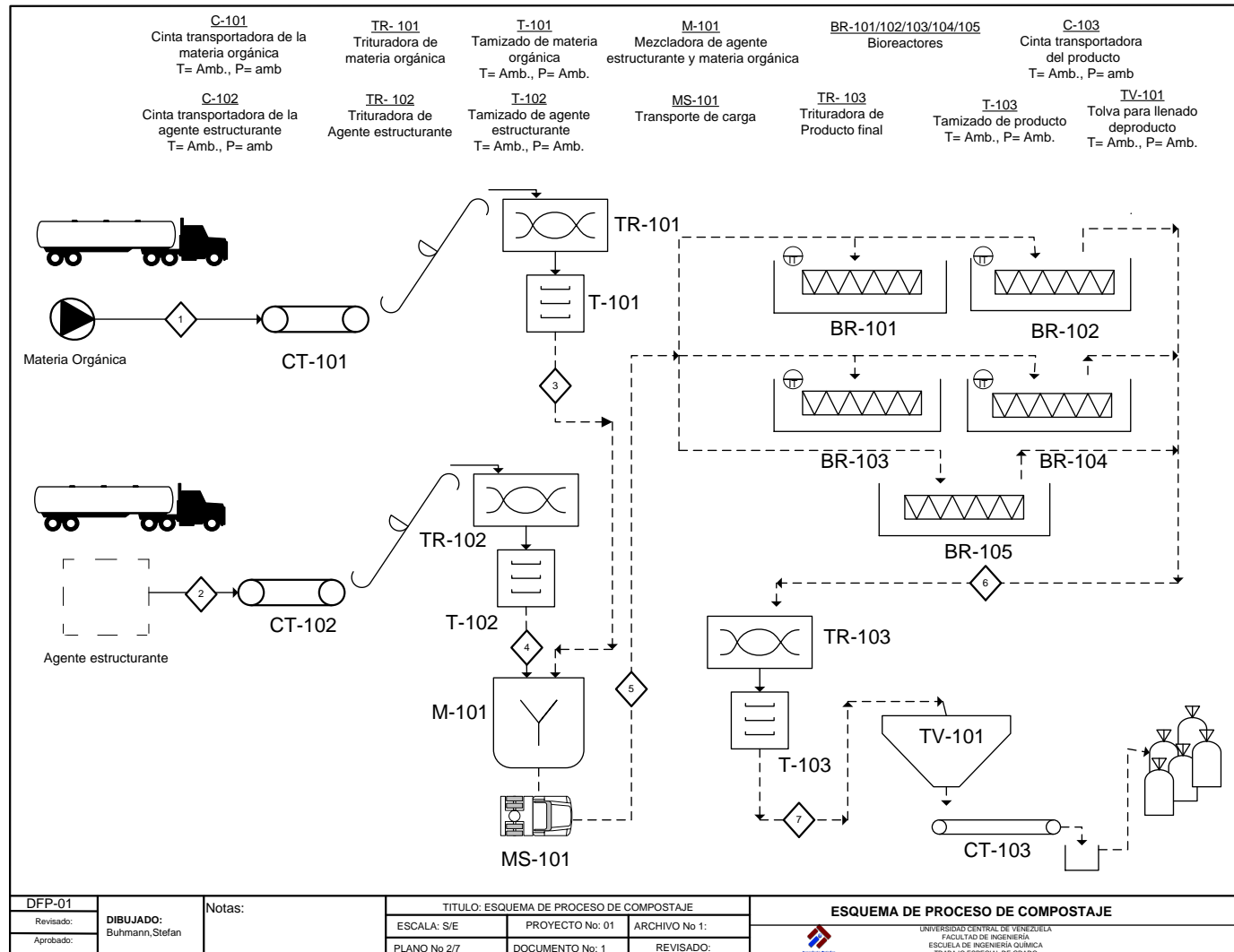


Figura N° 49. Diagrama de Flujo de proceso para la producción de abono.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentarán las conclusiones y recomendaciones generales de esta Trabajo Especial de Grado.

CONCLUSIONES:

La cantidad de desechos orgánicos estimada para ser utilizada en una planta de compostaje es de 334 kg/día.

Los desechos orgánicos que fueron seleccionados para la elaboración del compost fueron desechos vegetales no procesados. Los desechos que fueron seleccionados para su aplicación como agente estructurante fue aserrín y una mezcla de grama y hojas.

El tamaño de pila reportado como el más favorable fue de 0,045m², las medidas del compostero fueron 30cm de alto * 30 cm de ancho *50 cm de largo.

Se obtuvo que una aireación diaria del compost, mejora los parámetros finales del compost ya que proporciona una mayor cantidad de oxígeno lo que genera una mayor tasa de biodegradación.

La mezcla grama hojas resultó ser el agente estructurante que reportó los mejores resultados ya que le otorga a la materia orgánica una mayor porosidad promoviendo la actividad de las bacterias aerobias.

La relación agente estructurante materia orgánica que reportó los mejores resultados fue la de igual proporción volumétrica.

Se determinó como tiempo de biodegradación más favorable 15 días, ya que a los 30 días, no se observaron cambios significativos.

El compostero de pared cerrada presentó los mejores resultados ya que disminuye la pérdida de calor al ambiente, favoreciendo una temperatura de la fase termófila más alta y más estable.

Los valores de potasio y fósforo del producto dependen principalmente de las proporciones de estos macronutrientes en la mezcla inicial.

La prueba de fitotoxicidad para todos los casos determinó que la mezcla de compost elaborados no contenía compuestos tóxicos que inhiban el crecimiento de las plantas.

El esquema de proceso propuesto para la elaboración de compost en la comunidad José Félix Rivas, es un proceso que contempla tres bloques acondicionamiento de la materia prima, reacción y acondicionamiento del producto, y tendrá una producción de 200 kg de compost /día

RECOMENDACIONES:

Evaluar la influencia del origen de los desechos orgánicos en los parámetros de calidad del compost a fin de poder formular una mezcla inicial con un contenido de potasio y fósforo adecuado.

Evaluar la influencia de utilizar una mezcla entre los agentes estructurantes A y GH en las variables de proceso y los parámetros de calidad del compost.

Evaluar otras configuraciones de composteros, diferentes tamaños y diferentes tipos de pared a fin de determinar un diseño que permita obtener mejores o iguales resultados a un menor costo.

Realizar las pruebas de potencia de los compost obtenidos para determinar la capacidad de aportar nutrientes y el medio necesario para el desarrollo de diferentes tipos de plantas.

Realizar un estudio de factibilidad técnica y económica de una planta escala piloto que procese entre 50-150 kg de restos de alimentos a fin de determinar un parámetro para el escalamiento del proceso a la alimentación requerida de 334 kg/día.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta Y., Cayama J., Gómez E., Reyes N., Rojas D., García H. (2006). Respiración microbiana y prueba de toxicidad en el proceso de compostaje de una mezcla de residuos orgánicos. *Multiciencias*. 3(6) : 220-227.

Acuña, S., Valera, V. (s.f.) Indicadores de Generación de Residuos y Desechos Sólidos en Venezuela. Consultado el 5 de Abril de 2009, Universidad Metropolitana: http://ares.unimet.edu.ve/academic/investigaciones/informes-investigaciones/resumen_silvia_acuna_espana.doc.

ADAN, Asociación para la Defensa del Ambiente y de la Naturaleza. (1999). *Basura Municipal, Manual de Gestión Integrada*, Caracas: Edición ADAN. 245 pp.

Adhikari, B., Barrington S., Martínez J. y King S. , (2009). Effectiveness of three bulking agents for food waste composting. *Waste Management* (29):197-203.

Alan, W. (1989). *Condiciones del suelo y desarrollo de plantas según Russell*, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 1025 p.

American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington. 426 pp.

Anh, H, K., Richard, T.L. y Glanville, T.D. (2008). Optimum moisture levels for biodegradation of mortality composting envelope materials. *Waste Management*. (28): 1411-1416.

Asociación Colectiva para el Desarrollo Rural de Tierra de Campos. (s,f). Consultado el 20 de Agosto de 2009, <http://www.cdrtcampos.es/lanatural/images/compos4.jpg>

Barrena, R. (2006). *Compostaje de residuos sólidos orgánicos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Barcelona, España.

Blanco, M. J., Negro, M. J. y Almendros, G. (14 - 19 junio 1992. Madrid). Enfoque experimental del control de fitotoxicidad y evolución del nitrógeno en el compostaje de la paja. Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos "Iswa 92" (pp. 18). España: Asociación Técnica para la Gestión de residuos sólidos.

Campos, M., Lugo, S. y Gitscher, U. (1998). Evaluación de los Proyectos de Compostaje en el Ecuador. Consultado el 21 de Mayo de 2009, Fundación Natura-REPAMAR-CEPIS-GTZ:

<http://www.cepis.org.pe/eswww/repamar/gtzproye/compost/compost.html>

Carolla, C. (2006). Modelo de superficie de respuesta para estimar condiciones en la producción de abono orgánico. Tesis de maestría. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Casanova E (1991) Introducción a la ciencia de suelo. CDCH. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 393 pp.

Chanyasak, V. y Kubota, H. (1983). Source separation of garbage for composting. *BioCycle*, 24 (2):56-58

Chefetz, B., Adani, F., Genevini, P., Tambone, F., Hadar, Y. y Chen, Y. (1998a). Humic-acid transformation during composting of municipal solid waste. *Journal Environmental Quality*, 27 (4): 794-800.

Ciavatta, C., Govi, M., Pasotti, L. y Sequi, P. (1993). Changes in organic matter during stabilization of compost from municipal solid wastes. *Biosource Technology*. 43 (2): 141-145.

Ciavatta, C., Francioso, O., Montecchio, D., Cavani, L. y Grigatti, M. (2001). Use of organic wastes of agro-industrial and municipal origin for soil fertilisation: quality criteria for organic matter. I Encuentro Internacional Gestión de residuos orgánicos en el ámbito rural mediterráneo (pp.117-132). Cátedra Zurich Medio ambiente de la Universidad de Navarra.

Cooperband, L.R., Stone, A.G., Fryda, M.R. y Ravet, J.L. (2003). Relating compost measures of stability and maturity to plant growth. *Compost Science and Utilization*. 11(2): 113-124.

Costa, F., García, C., Hernández, T. y Polo, A. (1991). Residuos orgánicos urbanos. Manejo y utilización. MURCIA, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Centro de Edafología y Biología Aplicada. CEBAS – CAJA. 181 pp.

COVENIN 0140. (1963). Clasificación y especificaciones de los abonos orgánicos.

Defrieri, R. L.; M. P. Jimenez, D. Efron y M. Palma (2005). Utilización de parámetros químicos y microbiológicos como criterios de madurez durante el proceso de compostaje. XXII (1): 25-31.

Del Val, A. (1998). El libro del reciclaje. Manual para la recuperación y aprovechamiento de las basuras. 3re ed. Barcelona: Ediciones Integral. 271 pp.

- Departamento de Agricultura de la DGA (Diputación General de Aragón). (2001). Producción y gestión del compost. Segunda Edición. Zaragoza, España: Informaciones Técnicas N° 88. Dirección General de Tecnología Agraria. Servicio de Formación y Extensión Agraria. Centro de Técnicas Agrarias. Departamento de Agricultura. Gobierno de Aragón. 32 p.
- Déportes, I., Benoit-Guyod, J- L., Zmirou, D. y Bouvier, M. C. (1998). Microbial disinfection capacity of municipal solid waste (MSW) composting. *Journal of Applied Microbiology*. 85 (2): 238-246.
- Díaz, M. de los A. (1990). Compostaje de lodos residuales: aplicación agronómica y criterios de madurez. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias, España.
- Dobao, T., Benítez, M. y González, J. (1998). Calidad del compost de residuos sólidos urbanos. *Residuos*. 44:31-37.
- FONDO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS (FONAIAP). (1990). Manual de métodos y procedimientos de referencia. (Análisis de suelo para diagnóstico de fertilidad). Serie D.N°26. Escuela de Agronomía. Ministerio de la Agricultura y Cría. FONAIAP.UCLA, Maracay. 206p.
- Elango, D., Thinakaran, P., Panneerselvam, P. y Sivanesan, S. (2009). Thermophilic composting of municipal solid waste. *Applied Energy*, 86: 663-668.
- García, C. (1990). Estudio del compostaje de residuos orgánicos. Valoración agrícola. Murcia: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (C.E.B.A.S.) 471 pp.
- García, C. y Polo, A. (1999). Estudio de parámetros bioquímicos en procesos de estabilización de residuos orgánicos urbanos. *Residuos*. 51 (9): 76-81.
- Haug, T. (1993). *The practical Handbook of Compost Engineering*. Florida: Lewis Publishers. 717 pp.
- Herrmann, R. F. y Shann, J. R. (1993). Enzyme activities as indicators of municipal solid waste compost maturity. *Compost Science and Utilization*, 1 (4):54-63.
- Iglesias, E. y Pérez, V. (1991). Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation-exchange capacity. *Resources, Conservation and Recycling*. 6:45-60.
- Iglesias, E. y Pérez, V. (1992). Determination of maturity indices for city refuse compost. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 38 (4): 331-343.

Instituto de Manejo de Desechos Cornell. «Cornell Waste Management Institutel Food Scrap Composting Project.» 1998.
<http://compost.css.cornell.edu/CaseStudies.html> (último acceso: Mayo de 2010).

Instituto Nacional de Estadísticas. « Viviendas del área urbana, por condición de ocupación y número de ocupantes, según entidad federal.» 2001.
<http://www.ine.gov.ve/demografica/VivienAreaUrbCondOcupNumOcupEntiFederal.htm> (último acceso: Febrero de 2010).

Jorgensen, K., Puustinen, A. y Suortti, A. (2000). Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by composting in biopiles. *Environmental Pollution*, 107 (2): 245-254.

Laos, F., Mazzarino, M.J., Satti, P., Roselli, L., Moyano, S., Ruival, M. y Moller Poulsen, L. (2000). *Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 50: 86-89.

Lardinois, I. y Van der Klundert, A. (1994). Recycling urban organics in Asia and Africa. *BioCycle*, 35 (4):56-58.

Lee, I., Kim, P. y Chang, K. (2002). Evaluation of stability of composts prepared with Korean food wastes. *Soil Sci. Plant. Nutr.* 48(1):1-8.

Levi-Minzi, R., Saviozzi, A. y Riffaldi, R. (1992). Evaluating garbage compost. *BioCycle*. 33(3):75-77.

Ley de residuos y desechos sólidos. (2004, Noviembre 18). *Gaceta Oficial de la Republica Bolivariana de Venezuela*, 38.068.

Lima, J.S., de Queiroz, J.E.G. y Freitas, H.B. (2004). Effect of selected and non-selected urban waste compost on the initial growth of corn. *Resources, Conservation and Recycling*, 42 (4): 309-315.

Lippert, R. (s.f.). What is the use for the cation exchange capacity (CEC) and the percent base saturation on the soil test reports?. Consultado el 9 de Julio de 2009, Clemson University Extension Service:
<http://hubcap.clemson.edu/~blpprt/bobweb/BOBWEB23.HTM>

Luque, O. (1992, 22 y 23 de octubre). El uso de los abonos orgánicos en la agricultura venezolana. Trabajo especial. Curso de fertilización balanceada, (27 p). Valencia: Palmaven-Petróleos de Venezuela-Instituto del Potasio y el Fósforo de Latinoamérica.

Madigan, M., Martinko, J. y Parker, J. (1997). *Biología de los microorganismos*. 8va ed. España: Editorial Prentice Hall. 986 pp.

Madrid, C., Quevedo, V. y Andrade, E. (2000). Estudio de la biotransformación aeróbica de los desechos lignocelulósicos pergamino de café (*Coffea arabica* L.) y tallos de pasto guinea (*Panicum maximum*). Revista Facultad de Agronomía de La Universidad del Zulia. 17 (6): 505-517.

Mapa del Estado Miranda. (s.f.). Consultado el 14 de Agosto de 2009, <http://www.a-venezuela.com/mapas/map/html/estados/miranda.html>

McDougall, F.; White, P.; Franke, M. y Hindle, P. (2004). Gestión Integral de Residuos Sólidos. Caracas: Procter & Gamble. 623 pp.

Megel, D. (s.f.). Fundamentals of soil cation exchange capacity (CEC). Consultado el 9 de Julio de 2009, Purdue University Cooperative Extension Service: <http://www.ces.purdue.edu/extmedia/AY/AY-238.html>

Menoyo, A. (1995). Valorización agronómica de la gallinaza. Compostaje. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco. Facultad de Ciencias (Sección Químicas), Departamento de Química Analítica. Bilbao.

Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MINAMB). Despacho del Viceministro de Conservación Ambiental. (2008). Gestión del Manejo Integral de Residuos y Desechos Sólidos Urbanos. Caracas: Castillo, E.

Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MINAMB). Dirección de General de Calidad Ambiental. (2005). Problemática del Manejo y Disposición Final de los Desechos Sólidos en Venezuela. Caracas: Ing. Vladimir Valera.

Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MINAMB). Dirección de General de Calidad Ambiental. (s.f). Planta de reciclaje y compostaje de basura. Caracas: Corporación Fila C.A.

Musmeci, L. y Gucci, P. (1997). Aspetti igienico-sanitari per la produzione di compost di elevata qualità. Ann. Ist. Super. Sanità, XXXIII (4): 595-603.

Navarro, G. (2000). Química Agrícola. España. Ediciones Mundi-Prensa. 488 pp.

Navas, María Fernanda. (2008). Implicaciones ambientales derivados del manejo y disposición final de los desechos sólidos en Venezuela. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Pagga, U. (1999). Compostable packaging - test methods and limit values for biodegradation. Applied Microbiology and Biotechnology, 51 (2):125-133.

- Pascual, J. (1992). Aspectos químicos y bioquímicos del compostaje. Murcia: Universidad de Murcia, Facultad de Ciencias biológicas y Consejo Superior de Investigaciones Científicas (C.E.B.A.S.). 225 p.
- Pascual, J., Ayuso, M., García, C. y Hernández, T. (1997). Characterization of urban wastes according to fertility and phytotoxicity parameters. *Waste Management & Research*, 15 (1): 103-112.
- Pierre F., Rosell M., Quiroz M. y Granda Y. (2009). Evaluación química y biológica de compost de pulpa del café en caspito municipio Andrés Bello, estado Lara, Venezuela. 2 (21): 105-110.
- Polar, Cervecería de Oriente. (1990). El CEPAREL: gran proyecto para proteger el ambiente. *Maltincito*, 208: 26-30.
- Rasapoor, M., Nasrabadi, T., Kamali, M. y Hoveidi, H. (2009). The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. *Waste Management*, 29: 570-573.
- Rivero, C. (1999). Materia orgánica del suelo. *Rev. Fac. Agron. UCV (Maracay)* Alcance 57: 212.
- Rivero, C., Chirenje, T., Ma, L.Q. y Martínez, G. (2004). Influence of compost on soil organic matter quality under tropical conditions. *Geoderma*, 123: 355-361.
- Sánchez, J. C. (2004). Primera comunicación nacional sobre cambio climático. Taller: Opciones de mitigación de gases de efecto invernadero (pp. 30). Caracas: MARN-GEF-PNUD.
- Sánchez-Monedero, M.A., Roig, A., Paredes, C. y Bernal, M.P. (2001). Nitrogen transformations during organic waste composting by the Rutgers systems and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresources Technology*, 78 (3): 301-308.
- Sánchez, R., Villalba, L., Mora, W. y Hernández, R. (2000). Identificación de oportunidades de mejoras en el manejo de los desechos sólidos municipales producidos en Ciudad Guayana, Edo. Bolívar. Ponencia presentada en el XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria e Ambiental (4p.). Brasil.
- Sequi, P., M de Nobili, K. Leita, G. y Cercignani, G. (1986). A new index of humification. *Agrochimica*. 30 (1-2):174-179.
- Sidhu, J., Gibbs, R., Ho, G. y Unkovich, I. (1999). Selection of *Salmonella typhimurium* as an indicator for pathogen regrowth potential in composted biosolids. *Applied Microbiology*, 29 (5): 303-307.

- Soliva, M. (2001). Compostatge i Gestió de Residus Orgànics. Estudis i monografies. Barcelona: Diputació de Barcelona. Àrea de Medi Ambient. 111 pp.
- Solórzano, P. (1997). Fertilidad de suelos, su manejo en la producción agrícola. Rev. Fac. Agron. UCV (Maracay) Alcance 51: 201.
- Stoffella, P. y Kahn, B. (2004). Utilización de compost en los sistemas de cultivo hortícola, Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 379 p.
- Suárez, O. (1981). La basura es un tesoro. Caracas: Edición de la Dirección de Desarrollo Social de la Gobernación del Distrito Federal y de la Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez. 277 pp.
- Suarez, G. (2004). Reciclaje: Un Compromiso de Responsabilidad Social. Seminario Iberoamericano. Valencia: ADAN-Fundacion Ecologica.
- Suárez, G. «Siembra Lombrices y cosecha abonos.» *La Era Ecológica*, 2002: (0) 5.
- Sztern, D. y Pravia, M. (1999). Manual para la elaboración de compost. Bases conceptuales y procedimientos. Uruguay: Oficina de Planeamiento y Presupuesto, Unidad de Desarrollo Municipal, Organización Panamericana de la Salud. 67 p.
- Taylhardath, L. (1999). Procesos aerobios, anaerobios y físicoquímicos como alternativas tecnológicas para el saneamiento y aprovechamiento de los desechos sólidos orgánicos. Maracay: Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela. 30 p.
- Tchobanoglous, G. y Kreith, F. (2002). Handbook of Solid Waste Management. Nueva York: McGraw Hill. 950 pp.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vigil, S. (1994). Gestión Integral de Residuos Sólidos. España: McGraw Hill/Interamericana de España. 1107 pp.
- Trejo, R. (1996). " Procesamiento de la Basura Urbana". Ciudad de México: Trillas. 283 pp.
- Villaba, L. (2005). Caracterización físico-química y biológica de un compost elaborado con desechos generados en la USB. Tesis de maestría. Universidad Simón Bolívar, Caracas.
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. y Bertoldi, M. (1981a). Evaluating Toxicity of Immature Compost. *BioCycle*. 22 (2):54-57.

APENDICES

APENDICE A. Proceso de molienda de los alimentos.

A fin de lograr mayor homogeneidad y favorecer el proceso de biodegradación los restos de alimentos fueron picados con cuchillos y luego molidos en un pica todo, hasta tener un tamaño menor de 5 cm.

En la figura A. se presenta imágenes del los restos de alimentos molidos.

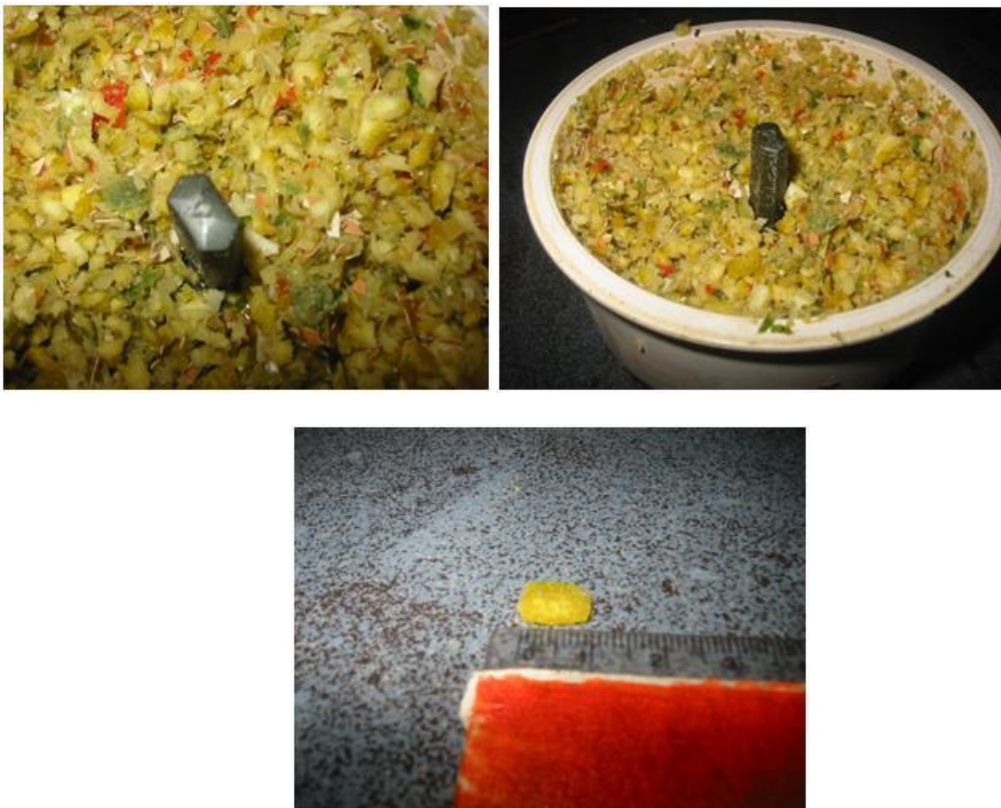


Figura A. Alimentos molidos

APENDICE B. Tamaños de los composteros evaluados

Para determinar el tamaño más favorable, se evaluaron dos tamaños, el compostero pequeño se realizo con potes plásticos el grande se construyo con guacales de madera reforzado con paredes de cartón forradas con bolsas negras, tal como se observa en la figura B.



$V= 0,045 \text{ m}^3$



$V= 0,006 \text{ m}^3$

Figura B. Tamaño de los composteros evaluados

APENDICE C. Digestión de Kjeldahl

A continuación se presentan imágenes de la aplicación del método kjeldahl.



Figura C. (a) Digestión Kjeldahl, (b) Destilación, (c) Destilado, (d) Producto de la titulación.

APENDICE D. Variación de la concentración del carbono orgánico total en el tiempo

A continuación se presentan la tabla N° 20 en donde se muestra la variación de la concentración carbono orgánico total durante el proceso para las diferentes experiencias.

Tabla N° 20. Variación de carbono orgánico total en el tiempo

Días	% de carbono orgánico total			
	A:MO= 1:1	A:MO= 2:1	GH:MO= 1:1	GH:MO= 2:1
0	52	52	45	48
1	-	-	-	-
2	51	53	44	47
3	51	52	44	44
4	50	52	44	44
5	50	52	43	45
6	50	51	43	44
7	50	52	43	45
8	50	52	42	45
9	50	52	42	44
10	50	50	39	43
11	49	52	41	44
12	49	52	39	43
13	50	51	41	43
14	49	51	41	44
15	49	52	41	44
30	49	51	39	40

APENDICE E. Concentración de nitrógeno total al inicio y al final del proceso de compostaje

A continuación se presentan la tabla N° 21 en donde se muestra la concentración de nitrógeno total al inicio y al final del proceso de compostaje.

Tabla N° 21. Concentración de nitrógeno total al inicio y al final del proceso de compostaje

Días	% de nitrógeno total			
	A:MO= 1:1	A:MO= 2:1	GH:MO= 1:1	GH:MO= 2:1
0	1,4	1,3	1,8	1,6
15	1,7	1,2	1,5	1,3
30	1,6	2,0	2,8	2,5

APENDICE F. Prueba de Fitotoxicidad

A continuación se presentan las imágenes de los germinadores el día del montaje

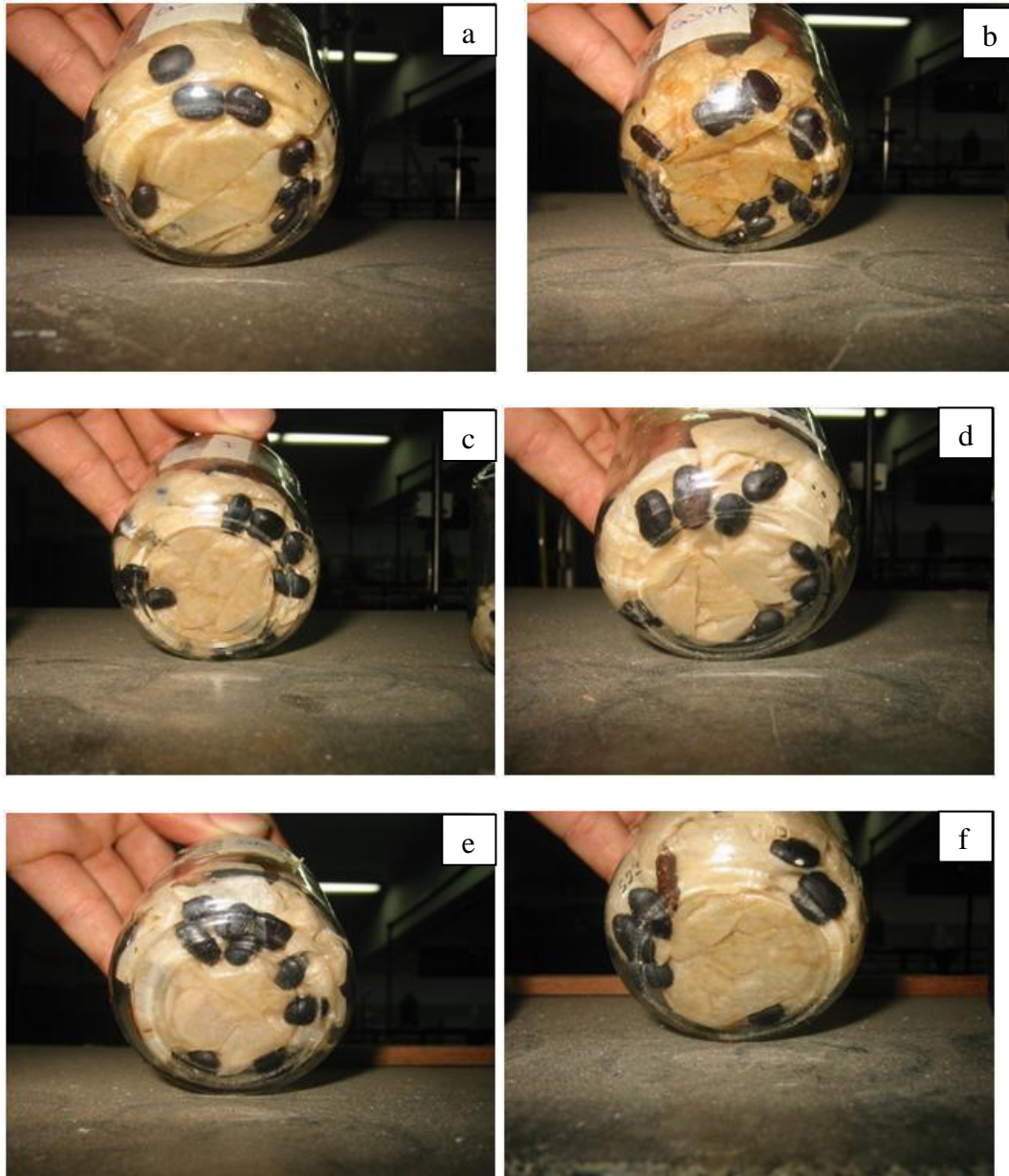


Figura I1. Germinadores con diferentes extractos (a) extracto del compost tamaño pequeño, (b) extracto del compost tamaño grande , (c) extracto del compost aireación diaria, (d) extracto del compost aireación interdiaria, (e) extracto del compost grama rel 1:1 y (f) extracto grama rel 2:1.

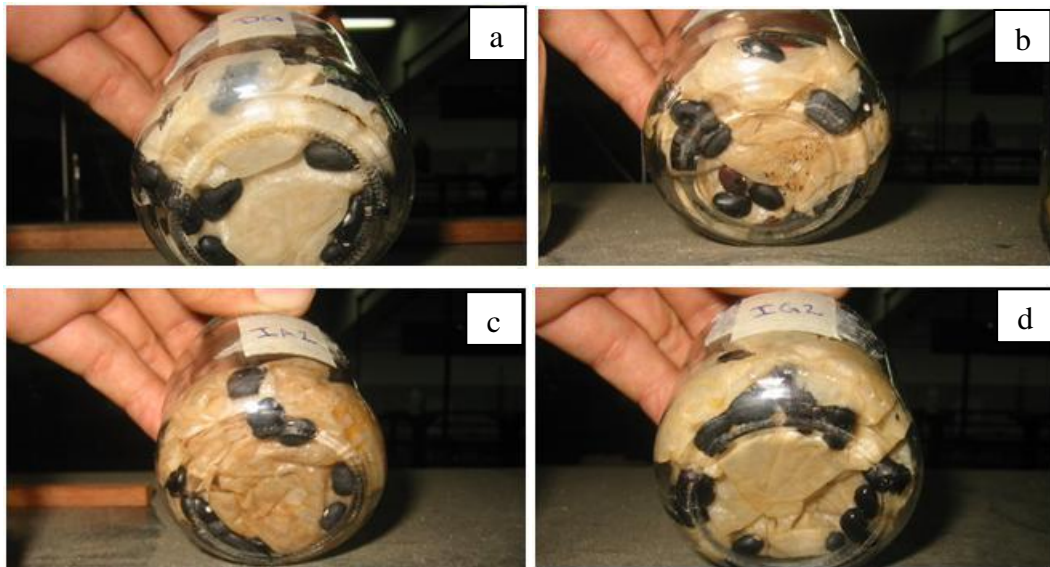


Figura I2. Germinadores con diferentes extractos (a) extracto del compost de aserrín relación 1:1, (b) extracto del compost de aserrín relación 2:1, (c) extracto del compost de grama relación 1:1 pila abierta, (d) extracto del compost aireación interdiaria.

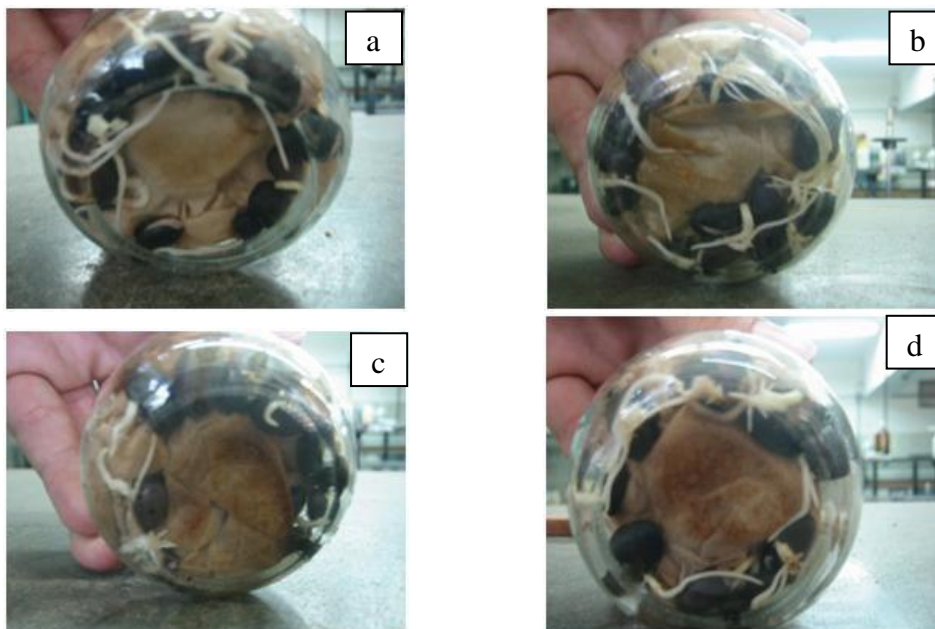


Figura I2. Germinadores con diferentes extractos día 1 (a) extracto del compost de aserrín relación 1:1, (b) extracto del compost de aserrín relación 2:1, (c) extracto del compost de grama relación 1:1 pila abierta, (d) extracto del compost aireación interdiaria.

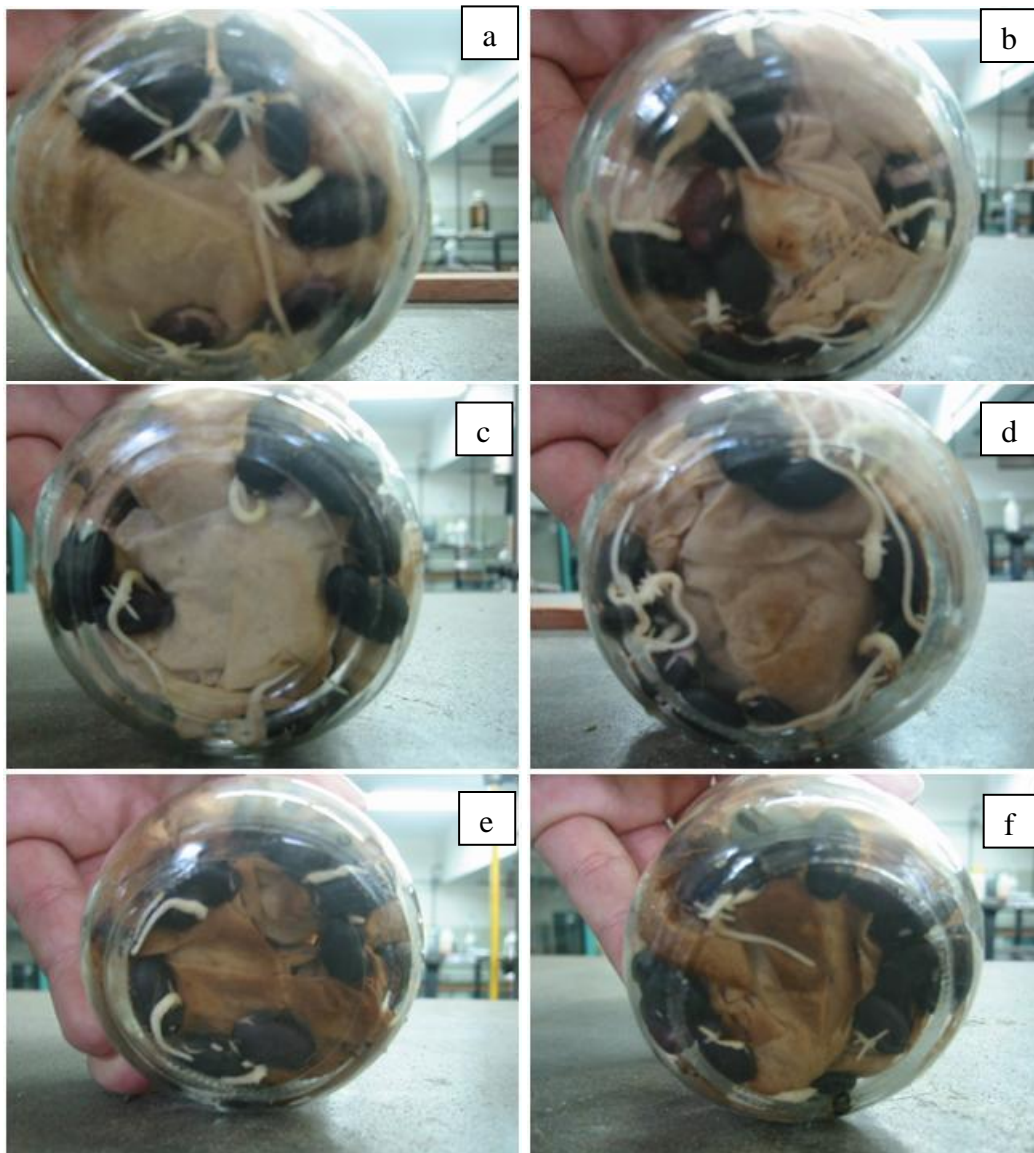


Figura I1. Germinadores con diferentes extractos día 1 (a) extracto del compost tamaño pequeño, (b) extracto del compost tamaño grande , (c) extracto del compost aireación diaria, (d) extracto del compost aireación interdiaria, (e) extracto del compost grama rel 1:1 y (f) extracto grama rel 2:1.



Figura I1. Germinadores con diferentes extractos día 4 (a) extracto del compost tamaño pequeño, (b) extracto del compost tamaño grande , (c) extracto del compost aireación diaria, (d) extracto del compost aireación interdiaria, (e) extracto del compost grama rel 1:1 y (f) extracto del compost grama rel 2:1.



Figura I2. Germinadores con diferentes extractos día 4 (a) extracto del compost de aserrín relación 1:1, (b) extracto del compost de aserrín relación 2:1, (c) extracto del compost de grama relación 1:1 pila abierta, (d) extracto del compost aireación interdiaria.