

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL



**“Evaluación de los efectos de la aireación en pilas
de compostaje de biosólidos”**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título
de Ingeniero Civil

CLAUDIA PÉREZ GODOY

Prof. Guía: Pedro Cisterna Osorio

Concepción, Septiembre 2008

Esta tesis esta dedicada a mi familia, en especial a:

Mi madre, Gladys, por su fortaleza

Mi padre, Claudio, por su compromiso

Mi hermana, Isabel, por su pasión

Mi hijo, Benjamín, por su alegría.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas involucradas en el desarrollo de esta tesis, en especial la Sra. Beatriz Ruf encargada de laboratorio de Absorción Atómica de la Facultad de Ciencias de la Universidad del BíoBío y al Ingeniero Pedro Cisterna profesor de la carrera.

Agradezco muy especialmente al Sr. Claudio Pérez, mi padre, por su ayuda prestada y por su ingenio para concretar mis ideas.

D O L O R

Ese dolor que inunda todo mi ser.
Ese dolor que me recorre por completo.
Ese dolor que no tiene fin.
Ese dolor que esta presente toda mi eternidad.
Ese dolor que busca razón y lógica.
Ese dolor que me hace débil.
Ese dolor que quisiera no haber vivido nunca.
Ese dolor que quisieras olvidar.
Ese dolor que revivo cada segundo de mi vida.
Ese dolor que me sume en lo más profundo.
Ese dolor que termina con todas mis esperanzas.
Ese dolor que te hace desear no vivir más.

Este dolor es el inicio de mí renacer.
Este dolor cambio mi vida.
Este dolor me da la razón de vivir.
Este dolor me hace fuerte.
Este dolor me trajo esperanza.
Este dolor me trajo la alegría de vivir.
Este dolor trae consigo lo mejor de esta vida,
el amor.
El amor de tu familia.
El amor de tus amigos.
El amor propio.

El amor propio porque salí adelante,
No se como, pero lo hice.
Y ahora soy capaz de
ver la vida distinta
y con la frente en alto
por que sobreviví.
Sobreviví a ese dolor
que casi ...
casi me destruye.

Clodhet (2005)

SUMARIO

Debido a la acumulación de residuos orgánicos, se hace necesaria la existencia de alternativas de tratamiento para éstos. Es por esto que es importante la investigación y el perfeccionamiento de alternativas como es el proceso de compostaje, donde la materia orgánica es biodegradada por microorganismos, obteniéndose un producto más estable y con grandes ventajas. Por consiguiente, el objetivo de esta tesis es la investigación empírica de la influencia de la aireación en el proceso de compostaje.

La idea principal de la investigación, consistió en evaluar los efectos de la aireación en pilas de compostaje, sometidas a diferentes condiciones de oxigenación, controlando los factores físicos y bioquímicos desarrollados durante el proceso en las diferentes pilas.

Se construyeron tres pilas: una mediante compostaje por volteo y las otras dos mediante compostaje estático con aireación pasiva, con una cantidad diferente de difusores de aire. Las que consistieron en la mezcla de lodos generados en la planta de tratamiento BíoBío en Hualpén con material de soporte (viruta de madera).

De los resultados obtenidos se verificó la influencia de la aireación en el proceso, demostrándose que las pilas sometidas a una buena oxigenación alcanzan altos porcentajes de biodegradación de la materia orgánica, al contrario de la pila expuesta a deficiente oxigenación que al final del proceso presentó claros signos de pudrición.

INDICE

Sumario	I
Índice	II
Capítulo I. Introducción	1
1.1. Justificación de la tesis	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Descripción del Proyecto	3
1.4. Antecedentes Generales	4
1.4.1. Compostaje	4
1.4.2. Origen de Lodos	5
Capítulo II. Marco teórico	7
2.1. Compostaje	7
2.1.1. Principios básicos	7
2.1.2. Etapas del proceso de Compostaje	9
2.1.3. Técnicas de compostaje aeróbico	10
2.1.4. Reacción química del proceso de compostaje aeróbico	14
2.1.5. Microbiología del proceso de compostaje	15
2.1.6. Factores que afectan el proceso de compostaje	16
2.1.6.1. Aireación	16
2.1.6.2. Humedad	18
2.1.6.3. Temperatura	19

2.1.6.4. Relación carbono-nitrógeno (C / N)	20
2.1.6.5. pH	21
2.1.7. Operación de un proceso de compostaje aeróbico	22
2.1.7.1. Parámetros de diseño y control del proceso	23
2.1.8. Modelación matemática del proceso de compostaje	23
2.1.8.1. Balance de sólidos volátiles biodegradables en el proceso de biodegradación	25
Capítulo III. Metodología de la investigación	28
3.1. Emplazamiento de la investigación	28
3.2. Caracterización de los residuos sólidos a comportar	29
3.2.1. Lodos	29
3.2.2. Material estructurante	30
3.3. Diseño de las pilas a comportar	31
3.3.1. Cálculo de la humedad teórica de la mezcla	31
3.3.2. Cálculo de la razón carbono-nitrógeno (C/N) de la mezcla	32
3.3.3. Proporción de cada material presente en las pilas de compostaje	32
3.3.4. Características geométricas de las pilas al inicio del proceso de compostaje	34
3.4. Construcción del sistema de aireación	34
3.5. Parámetros evaluados durante el proceso de compostaje	36
3.5.1. Temperatura interna de la pila	36
3.6. Procedimientos operacionales efectuados a las pilas de compostaje	37
3.6.1. Volteo	37

3.7. Medición de parámetros	38
Capítulo IV. Análisis de resultados	39
4.1. Compostaje mediante volteo (Pila N° 1)	39
4.1.1. Variación de la temperatura interna de la pila	39
4.1.2. Variación de la humedad interna de la pila	41
4.1.3. Variación del pH en la pila	41
4.1.4. Variación de sólidos suspendidos volátiles en la pila	42
4.1.5. Variación de sólidos suspendidos minerales en la pila	43
4.2. Compostaje con aireación pasiva con difusores cada 10 cm. (Pila N° 2)	44
4.2.1. Variación de la temperatura interna de la pila	44
4.2.2. Variación de la humedad interna de la pila	45
4.2.3. Variación del pH en la pila	46
4.2.4. Variación de sólidos suspendidos volátiles en la pila	47
4.2.5. Variación de sólidos suspendidos minerales en la pila	48
4.3. Compostaje con aireación pasiva con difusores cada 20 cm (Pila N° 3).	49
4.3.1. Variación de la temperatura interna de la pila	49
4.3.2. Variación de la humedad interna de la pila	50
4.3.3. Variación del pH en la pila	51
4.3.4. Variación de sólidos suspendidos volátiles en la pila	52
4.3.5. Variación de sólidos suspendidos minerales en la pila	53
4.4. Comparación entre experiencias	54
4.4.1. Comparación de la temperatura interna registradas en las pilas	54

4.4.2. Comparación de la humedad interna registradas en las pilas	57
4.4.3. Comparación del pH registrado en las pilas	58
4.4.4. Comparación de los sólidos suspendidos volátiles registrados en las pilas	59
4.4.5. Comparación visual de muestras tomadas en las pilas	60
4.4.6. Comparación de las constantes endógenas de las pilas	61
Capítulo V. Conclusiones	63
Bibliografía	65
Anexos	III

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El constante incremento en la generación de residuos sólidos urbanos que experimenta la sociedad hace necesaria la correcta gestión de los mismos. El reciclado es un aspecto muy importante para minimizar el impacto ambiental ocasionado por los residuos y su destino final.

El tratamiento de las aguas residuales, como alternativa de solución para mitigar la contaminación de las fuentes receptoras, ha traído consigo impactos positivos para la recuperación de dichas fuentes: Sin embargo, el tratamiento de estos residuos líquidos, independiente de la tecnología empleada, genera subproductos como biosólidos los cuales pueden convertirse en otra fuente de contaminación ambiental. Por tal motivo, surge la necesidad de buscar sistemas de transformación y reutilización simples y eficientes que aprovechen el contenido nutricional de estos subproductos, permitiendo su retorno al suelo y por lo tanto su reinserción en los grandes ciclos ecológicos vitales del planeta.

El compostaje es un proceso biológico aerobio en el que la materia orgánica sufre una degradación bioquímica hasta dar lugar a un producto final estable. El compost obtenido como producto final del proceso de compostaje se caracteriza por ser un producto estabilizado, inocuo, libre de sustancias fitotóxicas y con un alto valor fertilizante (Costa, 1994. Citado por Torres y otros (2005)).

El compostaje como alternativa de tratamiento de biosólidos es un proceso que permite el aprovechamiento de la materia orgánica y los nutrientes presentes en él. El biosólido es un material con unas características físicas muy particulares que, para ser eficientemente compostados, requiere el uso de un material que mejore su estructura. Este material es denominado material de soporte. Materiales como astillas de madera, residuos de poda y jardinería, forrajes, cáscaras de cereales, son comúnmente utilizados como materiales de soporte debido a sus características fisicoquímicas y a su difícil degradación.

El material de soporte evita la formación de grumos, mejora la homogenización de los materiales, facilita la formación de canales por donde circule el aire, mejora la porosidad de la mezcla para facilitar la circulación del aire y disminuye el porcentaje de humedad de los materiales.

1.1. JUSTIFICACION DEL TEMA

Hoy en día, debido a la acumulación de residuos orgánicos, se hace necesaria la existencia de alternativas de tratamiento para estos. Una de estas alternativas es el proceso de compostaje, donde la materia orgánica es biodegradada por microorganismos, obteniéndose un producto más estable y con grandes ventajas. Puesto que en el compostaje, los responsables de las transformaciones son los microorganismos, la velocidad del proceso dependerá de todos aquellos factores que puedan limitar su crecimiento. Dentro de estos factores, los más importantes son la aireación, la humedad, la temperatura, el pH y el balance de nutrientes.

Por lo anterior, este trabajo pretende optimizar la aplicación del compostaje, como alternativa de tratamiento de residuos sólidos orgánicos, realizando un estudio de la aireación sobre pilas de compostaje, ya que los microorganismos la utilizan en sus procesos metabólicos y controla que la temperatura no se eleve demasiado, lo que puede provocar la muerte por asfixia de los microorganismos. Utilizando para el proceso de compostaje lodos generados en la principal planta de tratamiento de aguas residuales de Concepción.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general:

- Se desea estudiar los efectos de la aireación en pilas de Compostaje de biosólidos.

1.2.2 Objetivos específicos:

- Estudiar el comportamiento térmico de tres pilas de compostaje bajo distintas condiciones de aireación.
- Determinar, a partir del desarrollo experimental, bajo qué condición de aireación resulta más recomendable efectuar un proceso de compostaje.
- Estudiar el nivel de biodegradación de la fracción orgánica bajo distintas condiciones de aireación.

1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El compostaje como alternativa de tratamiento de residuos sólidos orgánicos, depende de diferentes parámetros que afectan su óptimo funcionamiento. Este trabajo realizará un estudio de uno de los factores más importantes como lo es la aireación en el compostaje aeróbico.

En base a los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales de la planta de Concepción, se efectuara compostaje en diferentes condiciones de aireación, para así evaluar su influencia sobre el proceso.

Se dispondrán tres pilas en total. En una se realizará un compostaje por volteo o tradicional, y en las otras dos se efectuará compostaje estático con aireación

pasiva, donde se suministrará aireación por medio de tuberías a presión atmosférica, variando en cada una la cantidad de difusores.

Se realizarán las pilas de las mismas dimensiones y proporción de componente, para luego evaluar su proceso durante la investigación. Esta evaluación se llevará a cabo por medio de mediciones de factores influyentes en el proceso de compostaje.

1.4. ANTECEDENTES GENERALES

1.4.1. Compostaje

El compostaje es la transformación biológica de sustancias orgánicas para obtener un producto estable llamado compost, donde el proceso puede ser tanto aeróbico como anaeróbico. Se trata, en definitiva, de una transformación biológica de los residuos en condiciones controladas. El compostaje representa una gestión de residuos orgánicos respetuosa con el entorno.

La técnica del compostaje implica una regular evolución de los materiales controlando su composición, temperatura, humedad, oxigenación, etc., dependiendo del grado tecnológico y de los objetivos que se persigan.

El proceso de compostaje implica la aparición de procesos exotérmicos bio-oxidativos debidos a los cuales en un primer momento sube rápidamente la temperatura para después ir bajando a medida que se consumen los materiales más fácilmente degradables. Sin este período de altas temperaturas, se podría considerar que el compostaje no funciona adecuadamente. Esto provoca la obtención de materia orgánica estabilizada de gran valor para usos agrícolas, que se puede manejar y almacenar fácilmente y que se aplica directamente al suelo sin provocar efectos adversos.

Los residuos a utilizar de preferencia en un proceso de compostaje son aquellos que poseen materia fácilmente digerible, tales como estiércol, desperdicios

orgánicos, paja, hojas, basura municipal y lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Los lodos son cualquier sólido o semisólido de desecho, generado por una planta municipal, comercial o industrial de tratamiento de aguas residuales. Por tanto se tiene que la producción de lodos por parte de una instalación de depuración de aguas residuales es una consecuencia inherente al funcionamiento de la misma (Cisterna, 2008).

1.4.2. Origen de lodos

La empresa ESSBIO se preocupa de proveer soluciones y servicios de alta calidad en el ciclo integral del agua (agua potable, alcantarillado y descontaminación de aguas servidas) y en la gestión integral de residuos.

Es así, como en la planta de tratamiento de aguas residuales BIO BIO, ubicada en Hualpén, se entrega solución a las aguas residuales a las principales comunas del gran Concepción.

El sistema de tratamiento de esta planta está constituido por un tratamiento primario el cual incluye: cámara de gruesos, rejas finas y desarenador y un tratamiento secundario formado por: decantador primario y tratamiento biológico. Las otras etapas que forman parte del tratamiento son: espesador de lodos, digestor, filtro banda y cloración del efluente.

Los sólidos producidos en el tratamiento inicial son enviados directamente a disposición final, y los sólidos que se producen en el tratamiento secundario se conducen a un espesador de lodos y de ahí a un digestor donde finalmente son conducidos al filtro prensa para eliminar el exceso de agua que aún contienen, de manera tal de disponerlos con una humedad lo más baja posible. Al cabo de estas etapas los lodos son enviados a un galpón en el cual se acumulan, desde donde son enviados a un lugar autorizado para su disposición final.

En la figura N° 1.1 se muestra un diagrama del proceso de tratamiento que grafica lo mencionado anteriormente.

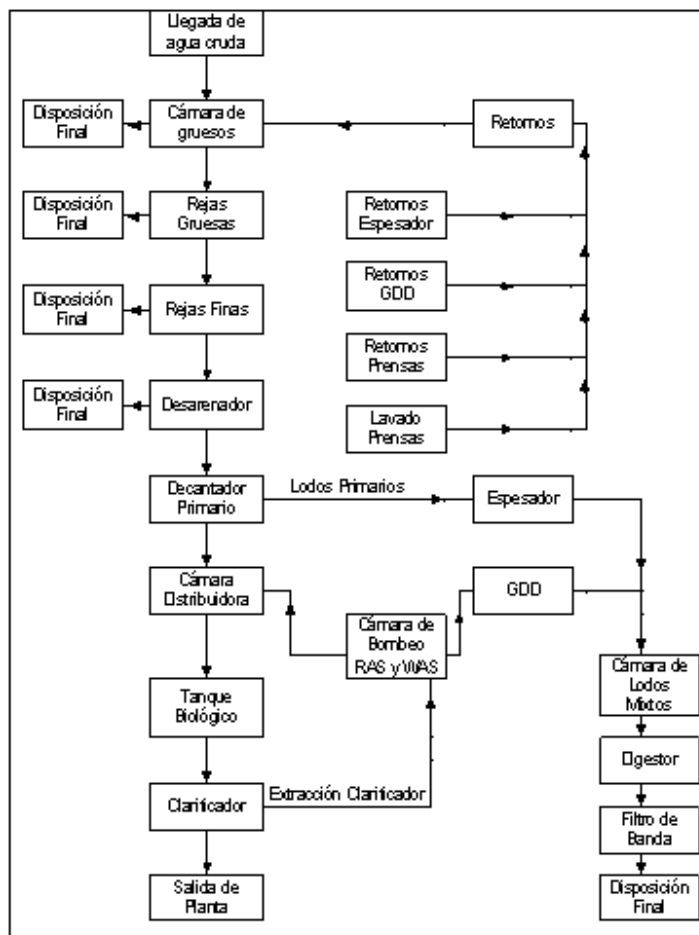


Fig. N° 1.1: Descripción de sistema de tratamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de ESSBIO en Hualpén.

Fuente: Consorcio Ondeo Degrémont (2001)

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

La materia orgánica presente en un residuo sólido no estabilizado puede originar problemas de olores y atraer vectores (moscas, mosquitos, y roedores) a los lugares de disposición. Los patógenos, bacterias, virus, protozoos y huevos de parásitos se concentran en los residuos y pueden propagar enfermedades en caso de que exista contacto con el hombre. Es por ello que desde el punto de vista sanitario resulta muy importante estabilizar la materia orgánica presente en éstos, existiendo para ello múltiples tecnologías disponibles, dentro de las cuales están: estabilización con cal, tratamiento térmico, digestión anaeróbica y aeróbica y compostaje.

2.1. COMPOSTAJE AERÓBICO.

2.1.1. Principios básicos.

En el compostaje aeróbico, la materia orgánica es descompuesta con la ayuda del aire y los microorganismos en dióxido de carbono y agua mientras se libera energía, como ilustra la figura N° 2.1. La materia orgánica se degrada de forma incompleta, quedando un residuo sólido llamado compost.

El compostaje es un tratamiento apropiado para residuos orgánicos tales como restos alimenticios, de áreas verdes, vegetales, de mataderos, agrícolas, granjas, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, etc.

Los microorganismos que hacen el trabajo tienen unos requerimientos básicos que deben ser atendidos. El aire, agua, la temperatura y la correcta relación de nutrientes se combinan para crear un buen ambiente de compostaje.

Si durante el proceso no existe suficiente concentración de oxígeno, el proceso se transforma en anaeróbico y se producen olores ofensivos. La muerte por asfixia de los microorganismos detiene el proceso e inicia la putrefacción de los residuos.

Las bacterias, hongos y otros microorganismos que llevan a cabo el proceso consiguen su energía de fuentes de carbón, tales como hojas secas, pajas, papeles, aserrín, astillas de madera, etc. El nitrógeno lo utilizan para el crecimiento de la población, pero el exceso de nitrógeno generará amoníaco y otros olores, y puede contaminar el agua de escurrimiento. Los materiales con contenidos altos de nitrógeno deben mezclarse completamente con una fuente de carbón. El grado de trituración es también importante en esta relación: el carbón en hojas es mucho más disponible que el carbón en una astilla grande de madera.

Al descomponer los residuos se genera calor. Cuando las temperaturas suben más de 70 °C, los organismos empiezan a morir. Ventilar la pila antes de que la temperatura alcance este punto impedirá el recalentamiento, que podría provocar una drástica reducción de la población y la generación de olores.

Los microorganismos agotarán la mayoría del residuo fácilmente descomponible, y el proceso de compostaje se hará lento. Las temperaturas bajan y el compost toma textura granulosa y oscura. Llegados a este punto, el compost debe ponerse en acumulaciones grandes para madurar.

Para llevar a cabo el compostaje se debe mezclar el residuo orgánico a tratar (basura, lodos, otros), con un material de soporte, que puede ser pasto, viruta, aserrín, poda de árboles, papel cartón, caucho, etc. (WEF, 1995. Citado por Ahumada (1995)).

La incorporación de un material de soporte resulta necesaria cuando los materiales a compostar presentan una relación carbono-nitrógeno (C/N) fuera del rango recomendado por la literatura (se recomienda entre 25:1-35:1) (Madrid y otros, 2001), y además cuando la porosidad de la mezcla es baja, de manera que el suministro de oxígeno a los microorganismos que se encuentran en el interior de la pila puede verse mermado, con lo cual disminuye la actividad microbiológica. Son muchos y muy complejos los factores que intervienen en el proceso biológico del compostaje, estando a su vez influenciados por las condiciones ambientales, tipo de residuo a tratar y el tipo de técnica de compostaje empleada.

Otro aspecto que resulta importante destacar es la considerable cantidad de calor que se genera en la fermentación aeróbica de los residuos sólidos, resultando una reacción biológica exotérmica la cual contribuye a un aumento apreciable de la temperatura interna del proceso de biodegradación (Unda, 1998).

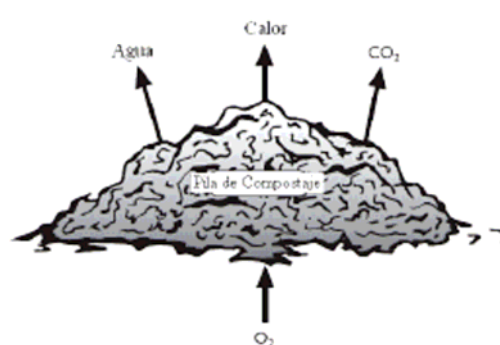


Fig. Nº 2.1: Representación del proceso de compostaje.

Fuente: Monteagudo (2008)

Cuando parte del calor producido queda atrapado en el mismo material en proceso de compostaje, se produce un efecto de retroalimentación de la generación de calor.

2.1.2. Etapas del proceso de Compostaje

El proceso de compostaje se divide en cuatro períodos, como se muestra en la figura Nº 2.2, atendiendo a la evolución de la temperatura:

Mesolítico: La masa vegetal está a temperatura ambiente y los microorganismos mesófilos se multiplican rápidamente. Como consecuencia de la actividad metabólica la temperatura se eleva y se producen ácidos orgánicos que hacen bajar el pH.

Termofílico: Cuando se alcanza una temperatura de 40 °C, los microorganismos termófilos actúan transformando el nitrógeno en amoníaco y el pH del medio se hace alcalino. A los 60 °C estos hongos termófilos desaparecen y aparecen las

bacterias esporígenas y actinomicetos. Estos microorganismos son los encargados de descomponer las ceras, proteínas y hemicelulosas.

Enfriamiento: Cuando la temperatura es menor de 60 °C, reaparecen los hongos termófilos que reinviden el mantillo y descomponen la celulosa. Al bajar de 40 °C los mesófilos también reinician su actividad y el pH del medio desciende ligeramente.

De maduración: Es un periodo que requiere meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización del humus.

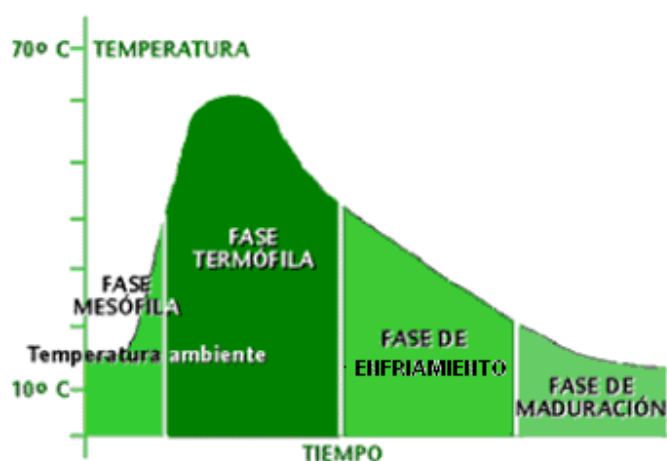


Fig. Nº 2.2: Etapas del proceso de compostaje

Fuente: Monteagudo (2008)

2.1.3. Técnicas de compostaje aeróbico.

Pilas estáticas.

La tecnología para el compostaje en pilas es relativamente simple, y es el sistema más económico y el más utilizado. Los materiales se amontonan sobre el suelo o

pavimento, sin comprimirlos en exceso, siendo muy importante la forma y medida de la pila.

- **Pilas estáticas con aireación pasiva.**

Se considera que este sistema es muy apropiado realizando un análisis coste/eficacia de dicho sistema comparado con otros como aireación forzada o pilas con volteo. Para favorecer la ventilación natural de la pila, se emplean estructuras como la que se puede observar en la figura N° 2.3, que permiten un mejor flujo de la masa de aire desde la parte inferior hacia la zona superior de la pila.

Las pilas son ventiladas por convección natural. El aire caliente que sube desde el centro de la pila crea un vacío parcial que aspira el aire de los lados. La forma y tamaño óptimo de la pila depende del tamaño de partícula, contenido de humedad, porosidad y nivel de descomposición, todo lo cual afecta el movimiento del aire hacia el centro de la pila.

El compostaje en pilas simples es un proceso muy versátil y con escasas complicaciones. Se ha usado con éxito para compostar estiércol, restos de poda, fangos y residuos sólidos urbanos. El proceso logra buenos resultados de una amplia variedad de residuos orgánicos y funciona satisfactoriamente mientras se mantienen las condiciones aerobias y el contenido de humedad. Las operaciones de compostaje pueden continuar durante el invierno, pero se ralentizan como resultado del frío.



Fig. N° 2.3: Detalle de pila estática con aireación pasiva.

Fuente: Junta de Andalucía (2008).

- **Pilas estáticas con aireación forzada**

Estos sistemas permiten tener un mayor control de la concentración de oxígeno y mantenerla en un intervalo apropiado (15-20 %) para favorecer la actividad metabólica de los microorganismos aerobios que desarrollan el proceso.

El aporte de oxígeno se realiza por varias vías, succión o insuflado así como las variantes que incluyen a los dos tipos, como muestra la figura N ° 2.4. El aporte de oxígeno puede realizarse de forma continua, a intervalos o ligados a un termostato que, llegada una determinada temperatura (aprox. 60°C) acciona el mecanismo de inyección de aire hasta que la temperatura desciende hasta el valor deseado.

Una vez que se constituye la pila, no se toca, en general, hasta que la etapa activa de compostaje sea completa.



Fig. Nº 2.4: Detalle de pila estática con aireación forzada.

Fuente: Junta de Andalucía (2008).

Pilas con volteo.

Es uno de los sistemas más sencillos y más económicos. Esta técnica de compostaje se caracteriza por el hecho de que la pila se remueve periódicamente para homogeneizar la mezcla y su temperatura, a fin de eliminar el excesivo calor, controlar la humedad y aumentar la porosidad de la pila para mejorar la ventilación, como muestra la figura Nº 2.5. Después de cada volteo, la temperatura desciende del orden de 5 o 10 °C, subiendo de nuevo en caso que el proceso no haya terminado.

La frecuencia del volteo depende del tipo de material, de la humedad y de la rapidez con que se desea realizar el proceso, siendo habitual realizar un volteo cada 2 - 10 días.

Normalmente se realizan controles automáticos de temperatura, humedad y oxígeno para determinar el momento óptimo para efectuar el volteo.

Es muy usual que los volteos se lleven a cabo con una simple pala cargadora, recogiendo y soltando del material para posteriormente reconstruir la pila. Sin embargo, para materializar esta técnica de compostaje, existe maquinaria específicamente diseñada para conseguir un mezclado del compost de máxima eficiencia.

En las pilas estáticas, ya sea con volteos o sin ellos cobra gran importancia el tamaño de las pilas, por un lado para permitir una correcta aireación y por otro para que no haya excesivas pérdidas de calor.

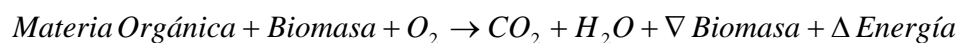


Fig. Nº 2.5: Pala mecánica volteando pilas de compostaje.

Fuente: Junta de Andalucía (2008).

2.1.4. Reacción química del proceso de compostaje aeróbico.

El proceso de compostaje aeróbico se puede representar mediante la siguiente ecuación:



Cuando una materia orgánica se oxida por microorganismos, una porción de la energía liberada es capturada y usada para la síntesis de nueva materia celular. Cuando los microorganismos mueren el material celular se convierte en alimento para otros microorganismos y tiene lugar una nueva transformación en dióxido de carbono, agua y nueva materia celular. Este proceso se va repitiendo hasta que la porción de materia orgánica remanente es muy resistente al ataque microbiano. A medida que avanza el proceso de compostaje, los compuestos orgánicos más fácilmente biodegradables van oxidándose y gradualmente van siendo reemplazados por materiales húmicos cada vez menos biodegradables. Los compuestos más estables que quedan después del compostaje son todavía degradables, pero a una velocidad mucho más pequeña comparada con la velocidad de degradación inicial.

2.1.5. Microbiología del proceso de compostaje.

Los microorganismos, utilizando el oxígeno en sus procesos metabólicos, obtienen de la materia orgánica los elementos esenciales que necesitan para su nutrición, desarrollo y reproducción.

Como se observa en la figura N° 2.6, el proceso de compostaje implica una compleja destrucción de la materia orgánica junto con la producción de ácido húmico para dar lugar a un producto final estable. Los microorganismos que participan en el proceso pertenecen a tres grandes categorías: bacterias, actinomicetos y hongos. Estas poblaciones microbianas son las responsables de la descomposición de proteínas, lípidos y grasas a temperaturas termofílicas, así como de gran parte de la energía calorífica producida. Los hongos y actinomicetos también están presentes, en poblaciones variables, durante las fases mesofílica y termofílica del compostaje, y parecen ser los responsables de la destrucción de la materia orgánica compleja y de la celulosa presente en el material de enmienda o soporte.

Si el material de partida está muy compactado o con mucha humedad, no se puede producir un intercambio efectivo de oxígeno y se desarrollan procesos

fermentativos de tipo anaeróbico que retrasan o impiden el aumento de temperatura.

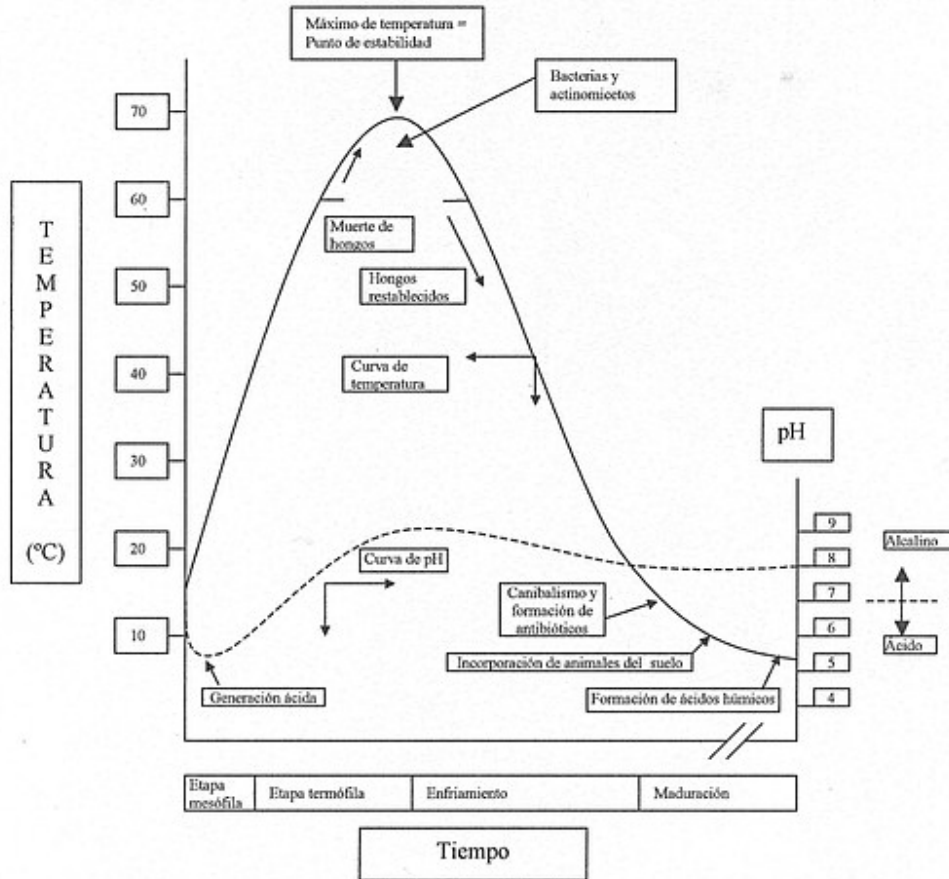


Fig. Nº 2.6: Evolución del proceso de compostaje.

Fuente: Abarra Taldea (2005)

2.1.6. Factores que afectan el proceso de compostaje.

Los factores que afectan el proceso de compostaje son: relación Carbono-Nitrógeno (C/N), temperatura interna de la pila, humedad, aireación y pH del material en proceso de biodegradación.

2.1.6.1. Aireación.

Es factor básico de una biodegradación aerobia, la ausencia de oxígeno origina condiciones de tipo anaerobias, las cuales no son adecuadas para las exigidas en un proceso de compostaje.

La concentración óptima de oxígeno en el interior de las pilas de fermentación está comprendida entre el 15 y el 20% en volumen, como se muestra en la figura N° 2.7.

La aireación es necesaria para la descomposición aerobia termofílica de los residuos sólidos, tendiente a una rápida transformación sin molestias ni malos olores. Se han desarrollado varias técnicas para airear los residuos en transformación, pero hasta ahora el método más eficaz que ha resultado es el de pilas con volteos intermitentes de los residuos.

La vuelta manual se emplea por volteo de las pilas, se efectúa satisfactoriamente con horquetas. En este caso, la pila se desplaza a un lugar inmediatamente adyacente.

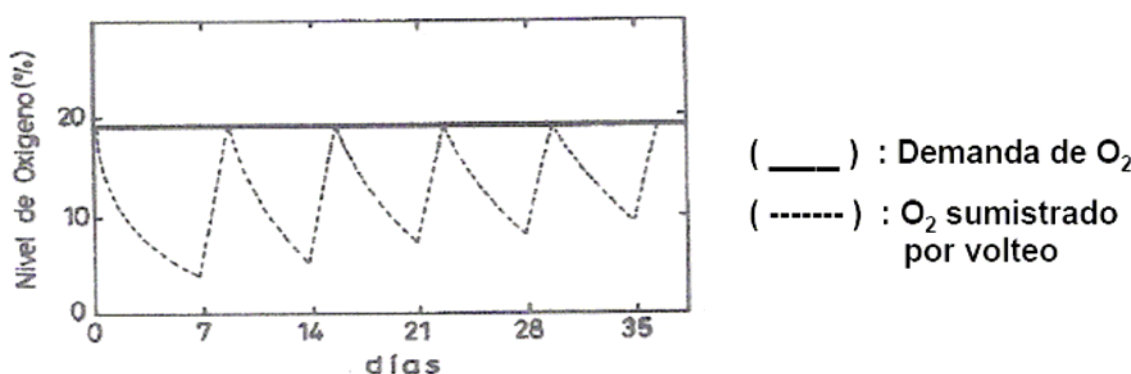


Fig. N° 2.7: Demanda de oxígeno en una pila de compostaje y el oxígeno suministrado con el volteo.

Fuente: Monteagudo (2008)

Existen una serie de equipos mecanizados, en los cuales el proceso de volteo debe realizarse con especial cuidado de que las capas exteriores pasen a ocupar el interior de la unidad siguiente.

La aireación genera calor, remueve vapor de agua y suministra oxígeno a los microorganismos (Cisterna, 2008).

Los drenes basales destinados para eliminar la humedad no logran un buen rendimiento en cuanto a aireación se refiere, debido a que la entrega de aire por el fondo de la pila es muy limitada, particularmente para basura triturada que no permite recirculación de aire. El sistema de inyección de aire a presión es costoso

de bajo rendimiento, ya que el aire no penetra efectivamente en la masa del material húmedo. Este tipo de aireación se ocupa con buen éxito en ciertos digestores, haciendo pasar una corriente de aire forzado a través de tubos perforados (Unda, 1998).

2.1.6.2. Humedad.

Junto con la aireación, son los dos factores operacionales de mayor importancia. Los microorganismos necesitan el agua como vehículo para transportar los alimentos y elementos energéticos, a través de la membrana celular. La descomposición de la materia orgánica depende del contenido de humedad. Los valores mínimos en los que tiene lugar la actividad biológica se sitúa entre 12 y 14%. Valores inferiores al 40% de humedad pueden limitar considerablemente el compostaje.

Es uno de los factores más importantes en el proceso de biodegradación, ya que si ésta es muy baja, los microorganismos no se desarrollan, por no tener agua suficiente para su metabolismo. Si es excesivamente alta, desplaza el aire al llenar los intersticios o huecos dejados por los residuos sólidos, presentándose circunstancias propicias para el desarrollo de condiciones anaerobias.

A lo largo del compostaje y, sobre todo, en las primeras fases, se producen grandes pérdidas de agua, que si son críticas, habrá que corregir con la incorporación de agua, en el momento del volteo.

Las investigaciones de la Universidad de California han concluido que el intervalo de humedad más favorable varía de 40 a 60% para lograr condiciones aerobias. En investigaciones realizadas se encontró que 50 a 60 era el porcentaje óptimo (Scott, 1998), de 45 a 50% (Acharya, 1998). Para digerir estiércol se plantea de 75 a 80% de humedad (Waksman, 1998). (Citado por Labbé (2003))

El máximo contenido de humedad para una condición aerobia satisfactoria depende de las materias primas a digerir. Si las materias contienen una cantidad importante de paja y materiales fibrosos resistentes, pueden ser mayores al contenido de humedad, sin destruir la cualidad estructural o cause una compactación que impida contener suficiente aire entre los intersticios. Pero si los

residuos cuentan con abundante material granular, como ceniza o polvo, o con una considerable cantidad de papel y basura orgánica proveniente de desperdicios domiciliarios, que contiene pequeña resistencia estructural cuando se mojan, existen dificultades para mantener condiciones aerobias con un contenido de humedad por sobre el 70%.

Cuando se espera una descomposición anaerobia, el contenido de humedad no tiene tanta importancia. Si el proceso requiere condiciones aerobias iniciales para producir alta temperatura por algunos días y lograr la destrucción de organismos patógenos, seguida de una descomposición anaerobia, el máximo contenido de humedad puede estar en el rango de 65 a 85%, dependiendo de las características del material a digerir. La acumulación de los residuos en montones o pilas al aire libre en sitios lluviosos debe incluir algún sistema para cubrirla de la lluvia.

La humedad excesiva se puede reducir mediante el volteo de los montones, lo que permite una evaporación mayor. El mismo sistema da buenos resultados cuando es demasiado seco, y debe aumentarse la humedad por riego, ya que mejora la uniformidad de la masa (Unda, 1998).

2.1.6.3. Temperatura.

Durante el compostaje y siempre que la humedad y la aireación sean adecuadas, la temperatura sufre la siguiente evolución. Inicialmente, los residuos fermentables se encuentran a temperatura ambiente. Enseguida, los microorganismos, que disponen de abundantes nutrientes, proliferan y la temperatura va incrementándose considerablemente. A los pocos días, se alcanzan los 40°C, finalizando la llamada “fase mesofílica” y posteriormente se alcanza la “fase termofílica”. La temperatura sigue subiendo y, la mayor parte de los microorganismos iniciales mueren y son reemplazados por otros resistentes a mayores temperaturas. Más tarde, la temperatura decrece gradualmente y se vuelve otra vez a temperaturas mesofílicas en un periodo denominado de

maduración caracterizado por una reducción paulatina de la actividad biológica y por una estabilización de los productos orgánicos obtenidos.

Una considerable cantidad de calor se genera en la fermentación aerobia de los residuos, como el material a digerir tiene una propiedad aislante relativamente buena, una pila o masa de un tamaño conveniente retiene el calor de la reacción biológica exotérmica y consecuentemente hay un aumento apreciable de la temperatura.

La temperatura óptima para la reducción de sólidos volátiles (oxidación de la biomasa existente en las pilas), es entre 40-50 °C y para la destrucción de patógenos por sobre los 55 °C (Cisterna, 2008).

Las temperaturas altas son necesarias para la destrucción de los organismos patógenos y semillas. La temperatura óptima para la digestión aerobia varía de 50 a 70 °C, siendo probablemente los 60 °C la temperatura más satisfactoria. Algunos autores piensan que entre 50 y 60 °C se encuentra la temperatura óptima para el proceso; en cambio, otros aseguran excelentes resultados con 60 a 70 °C.

Debido a que son escasos los organismos termofílicos que activamente actúan en el proceso de descomposición a más de 70 °C, no es conveniente sobrepasar esa temperatura por un periodo prolongado (Unda, 1998).

En la figura N° 2.6, se observa la variación de la temperatura en una pila de compostaje con respecto al tiempo.

2.1.6.4. Relación carbono-nitrógeno (C / N).

La relación carbono nitrógeno, C/N, tiene gran importancia en el proceso de la descomposición de la materia orgánica. En efecto, en la estabilización aerobia, los organismos vivos utilizan el oxígeno, se alimentan de la materia orgánica y desarrollan el protoplasma de la célula con base en el nitrógeno, fósforo, parte del carbono y otros alimentos. La mayor parte del carbono sirve de fuente de energía para los organismos, y como consecuencia para las reacciones metabólicas, el carbono se desprende en forma de anhídrido de carbono.

Durante la fermentación aerobia los organismos vivos consumen de 25 a 35 unidades de carbono por cada unidad de nitrógeno. Este es el rango de valores de

la relación C/N que se suele adoptar como óptimo en las plantas de compostaje a la hora de preparar las mezclas o lo que se ha denominado “materia orgánica biodegradable”. El nitrógeno se encuentra, casi en su totalidad, en forma orgánica de donde debe ser extraído y modificado por los microorganismos para poder ser utilizado por estos.

Generalmente, alrededor de dos terceras partes del carbono se desprende como anhídrido carbónico y el resto se combina con el nitrógeno en la célula. Si el exceso del carbono en relación con el nitrógeno de la materia orgánica que se va a biodegradar es muy alto, la actividad biológica disminuye, y se requieren varios ciclos de organismos para utilizar el carbono. Cuando alguno de los organismos muere, el nitrógeno y el carbono almacenado en ellos quedan disponibles para otros organismos. Este nitrógeno de las células muertas se utiliza para formar materia de las nuevas células con desprendimiento de carbono como CO₂.

Como consecuencia, la cantidad de carbono se reduce y la limitada cantidad de nitrógeno vuelve a ser empleada por otros organismos.

Básicamente, una relación de C/N elevada conducirá a tiempos de fermentación muy prolongados. Por el contrario, el compostaje de productos orgánicos con una relación C/N baja, aunque origina un rápido proceso de compostaje, lo hace con grandes pérdidas nitrogenadas (Unda, 1998).

2.1.6.5. pH.

Los estudios y experiencias indican que este factor no tiene gran influencia en el proceso del compost.

Para el crecimiento de la mayoría de las bacterias, el pH óptimo varía entre 6 y 7,5, mientras que en el caso de los hongos este rango se amplía entre valores de pH comprendidos entre 5,5 y 8. No obstante, durante el compostaje hay una sucesión de diversos microorganismos y circunstancias variantes que hacen que el pH varíe considerablemente.

El pH inicial de materias digeribles, basuras estiércol, etc., varía normalmente de 5 a 7, a menos que contengan sustancias alcalinas en exceso. Si el pH varía de 6

a 7, baja un tanto en el proceso de descomposición aerobio durante los dos o tres primeros días debido a la formación de ácidos. En cambio, si el pH inicial es de 5 a 5,5, hay muy poca variación durante este periodo. Después de dos a cuatro días de iniciado el proceso aerobio, el pH normalmente sube alcanzando finalmente el valor de 7,5 a 9 al término de este.

En la digestión aerobia se producen gran cantidad de ácidos, pero el pH no baja excesivamente debido a la capacidad de amortización de ciertos componentes de los residuos, como carbonatos u otras sustancias alcalinas (Unda, 1998).

En la figura N° 2.6 se muestra la variación del pH durante el proceso de compostaje de una pila en el tiempo.

2.1.7. Operación de un proceso de compostaje aeróbico.

Las etapas operacionales del proceso de compostaje, son:

- a) Mezclado:** Los lodos se mezclan con un material de soporte, el cual aumenta la porosidad y permite la aireación de la mezcla; además, aporta nutrientes para la actividad microbiana y disminuye el contenido de humedad.

- b) Compostaje:** Proceso biológico aerobio que degrada materia orgánica, generando dióxido de carbono, vapor de agua y calor. La temperatura de la mezcla puede exceder los 70 °C, pero su rango óptimo es entre 50 ° y 60 °C; luego decrece gradualmente por la disminución de nutrientes y actividad microbiana. Para controlar la temperatura, mantener la humedad o tasa de secado y el suministro de oxígeno, la pila debe ser periódicamente sometida a volteo. El pH se mantiene dentro del rango 5-8 unidades. Se entiende como término de la etapa de compostaje cuando la temperatura interna de la pila iguala a la temperatura ambiente, lo que generalmente ocurre después de 20 a 30 días.

- c) Curado o maduración:** Conversión del componente biodegradable a una sustancia similar al humus. El pH de un compost maduro está en el rango 6

a 8. Otro indicador de compost maduro es la relación C:N, cuyo valor es entre 10:1 y 15:1. El tiempo de maduración o curado es de 30 días o más.

2.1.7.1. Parámetros de diseño y control del proceso.

Los parámetros de diseño a considerar son los siguientes (Metcalf & Eddy, 1995)

a) Razón Carbono-Nitrógeno

Los microorganismos usan carbono y nitrógeno en proporciones fijas para sintetizar su biomasa. La razón ideal de carbono y nitrógeno (C:N) es del orden de 25: 1 a 35: 1. Si la relación es menor, el exceso de nitrógeno se transforma en amonio, produciéndose pérdida de su valor nutritivo y generación de mal olor. Si la razón es mayor, la materia orgánica se degrada más lentamente. Los lodos son deficitarios de carbono, la razón C:N se encuentra entre 5:1 y 20:1.

b) Aireación y Temperatura

La aireación remueve calor, vapor de agua y suministra oxígeno a los microorganismos. La temperatura interna de la pila puede exceder los 70°C, lo cual es perjudicial para los microorganismos que actúan en el proceso. La temperatura óptima para la destrucción de sólidos volátiles es 40° a 50°C, y para la destrucción de patógenos mayor a 55°C.

c) Control de la Humedad

La humedad de la mezcla debe estar en el rango de 45%- 65%. Si la humedad es menor al 45% se debe agregar agua; en caso contrario, hay que voltear o agregar material de soporte

2.1.8. Descripción matemática aproximada del proceso de compostaje.

El proceso de biodegradación, que se desarrolla en la pila de compostaje, se modela de forma aproximada a lo que sucede en un digestor discontinuo. En este tipo de sistemas se carga el digestor una sola vez con materia orgánica. Si se hace la analogía con el proceso de compostaje este instante corresponde a la etapa en la cual se construye la pila a compostar.

Durante el proceso de compostaje, la pérdida de materia orgánica puede alcanzar alrededor de un 30% medido como materia seca total. La gran mayoría de esta reducción corresponde a materia orgánica volátil. Dentro de la materia orgánica volátil existe un pequeño porcentaje que corresponde a materia orgánica no biodegradable.

Así la fracción de material sólido total de la pila en fermentación está formada por sólidos minerales y sólidos volátiles. Matemáticamente los sólidos totales presentes en la pila se representan en la ecuación (2.1):

$$ST = SM + SV$$

$$ST = SM + SV_{Bio} + SV_{No\ Bio} \quad \dots(2.1)$$

Donde:

ST : Sólidos totales presentes en la pila en proceso de compostaje.

SM : Sólidos minerales presentes en la pila en proceso de compostaje.

SV_{Bio} : Sólidos volátiles biodegradables en la pila en proceso de compostaje.

$SV_{No\ Bio}$: Sólidos volátiles no biodegradables en la pila en proceso de compostaje.

Por otro lado, a diferencia de lo que sucede con la materia orgánica volátil, la fracción mineral existente en la pila en proceso de fermentación, presenta un incremento relativo en su contenido a raíz de la biodegradación que está teniendo la fracción orgánica volátil. Lo anterior se deduce de la ecuación (2.1). En la figura N° 2.8 se aprecia la variación de los sólidos totales durante el proceso de compostaje.

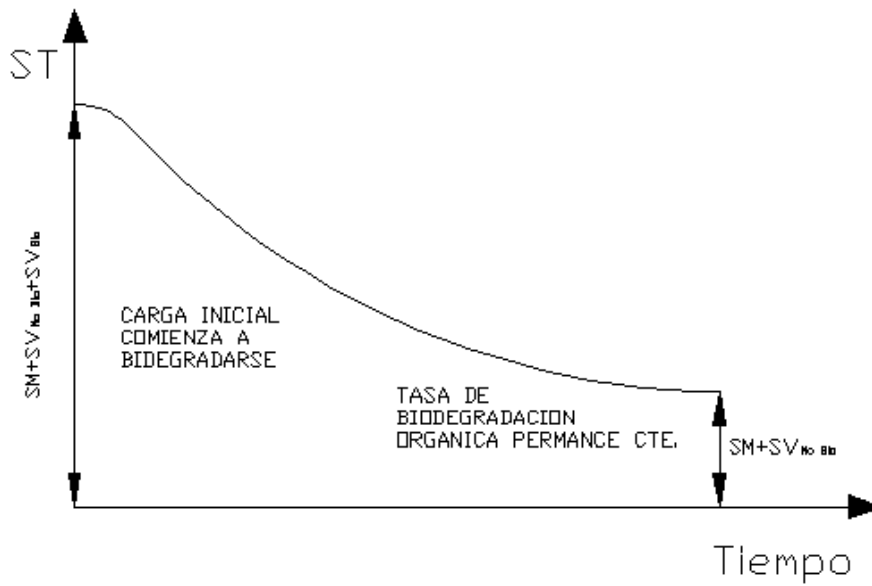


Fig. Nº 2.8: Variación de sólidos totales durante el proceso de compostaje.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.8.1. Balance de sólidos volátiles biodegradables en el proceso de biodegradación.

Luego de construirse la pila a compostar comienza el proceso de biodegradación de la fracción orgánica, la que es llevada a cabo por las distintas colonias de microorganismos presentes a lo largo del proceso, logrando así una disminución de ella después de un cierto tiempo. En la figura Nº 2.9, se muestra el modelo de digestión discontinua que describe aproximadamente el fenómeno antes citado.

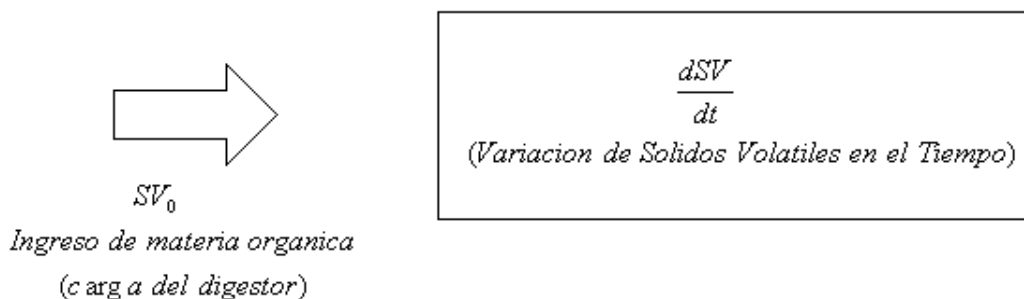


Figura Nº 2.9: Modelo de digestión discontinua que describe el proceso de compostaje.

Fuente: Ahumada (2005)

En un reactor discontinuo no existe un ingreso continuo de sólidos volátiles, si no que es de una sola vez, por lo que se produce una reducción de ellos durante un cierto tiempo.

Lo anterior se expresa mediante la ecuación diferencial (2.2), que es válida, sólo hasta cuando la tasa de biodegradación orgánica se hace constante, como indica la figura N° 2.8:

$$\frac{dSV_{Digestor}}{dt} = -K_d \cdot SV \quad \dots(2.2)$$

Donde:

$\frac{dSV_{Digestor}}{dt}$: Variación de sólidos volátiles biodegradables por unidad de tiempo.

K_d : Constante de reacción.

SV : Sólidos volátiles biodegradables remanentes en el tiempo t en el interior del reactor.

Integrando la ecuación (2.2) entre los límites $SV = SV_0$, y entre $t = 0$ y $t = t$ se tiene:

$$\int_{SV=SV_0}^{SV=SV} \frac{dSV}{SV} = -k_d \int_{t=0}^{t=t} dt$$

$$\ln\left(\frac{SV}{SV_0}\right) = -k_d \cdot t$$

Finalmente se tiene la ecuación (2.3) que rige a un digestor discontinuo:

$$SV = SV_0 \cdot e^{-k_d \cdot t} \quad (2.3)$$

El término k_d de la ecuación diferencial de primer orden representa la tasa de reducción de materia orgánica en el interior del digestor.

En un proceso de compostaje la temperatura no es constante, por tanto k_d es un valor aproximado. En la figura N° 2.10 se muestra como es obtenido el valor de k_d para un digestor discontinuo.

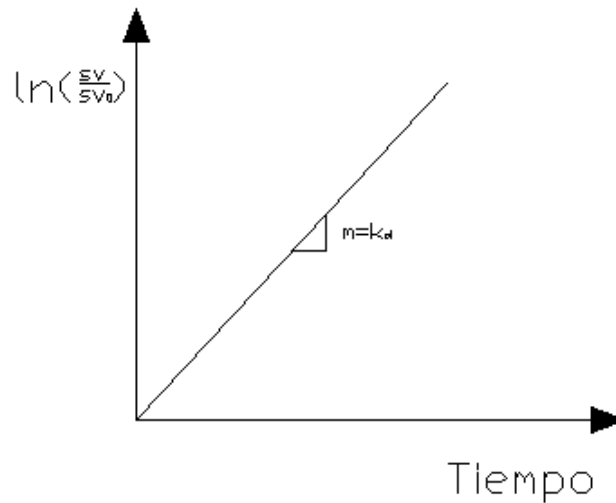


Fig. N° 2.10: Obtención de k_d en un digestor discontinuo.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.

La investigación persigue evaluar el efecto de la aireación en pilas de compostaje de lodos a través de experiencias. Para llevar a cabo este estudio se construyeron tres pilas de compostaje, una mediante volteo y las otras dos en pilas estáticas con aireación pasiva, variando en cada una la cantidad de difusores.

Para la construcción de las pilas se mezclaron los lodos, provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de Concepción, con material de soporte, en este caso viruta de madera, disponible en el CATEM ubicado en la universidad. Las tres pilas fueron cubiertas con un techo de polietileno para evitar que el agua de lluvia las afectara.

A continuación se describe las técnicas de compostaje llevadas a cabo para cada pila:

Pila N° 1: Compostaje mediante volteo.

Pila N° 2: Compostaje con aireación pasiva con difusores cada 10 cm.

Pila N° 3: Compostaje con aireación pasiva con difusores cada 20 cm.

3.1. EMPLAZAMIENTO DE INVESTIGACIÓN.

La experimentación se llevó a cabo en las dependencias de la Universidad del Bío-Bío. Hasta este lugar fueron trasladados los lodos utilizados, desde las instalaciones de la Planta de tratamiento de aguas residuales de ESSBIO ubicada en Hualpén. El transporte se realizó en un vehículo perteneciente a la universidad, en tambores de 200 litros.

En el terreno se realizó un escarpe, previo a la construcción de las pilas de compostaje, donde éstas fueron ubicadas.

Sobre el terreno se colocó un polietileno con el fin de impedir la percolación a las napas subterráneas de los lixiviados potencialmente generados como producto de la biodegradación de la materia orgánica.

En la figura N° 3.1 se muestra el terreno escarpado y en el lugar ya se encuentran los tambores con lodos y tanto los polietilenos que cubrirán las pilas de la lluvia y los que impedirán la filtración de potenciales lixiviados.



Fig. N° 3.1: Emplazamiento de la investigación.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS A COMPOSTAR.

3.2.1. Lodos.

La materia orgánica utilizada como sustrato en el proceso de compostaje aeróbico fue lodo, el que se obtuvo a la salida del filtro banda presente en la planta de tratamiento de aguas residuales de la planta de ESSBIO. En la tabla N° 3.1, se presenta la caracterización química y el contenido de humedad de los lodos previo al inicio del proceso de compostaje.

Materia Orgánica	Humedad (%)	Carbono	Nitrógeno	Relación C/N
Lodos	78	31,6	1,93	16,38

Tabla N° 3.1: Caracterización química de los lodos utilizados en el proceso de compostaje.

El porcentaje de humedad de la materia orgánica se determinó en el laboratorio de Química de la Universidad del Bío-Bío.

Debido a que la materia orgánica a compostar presenta una baja relación carbono-nitrógeno y una porosidad también pequeña, se procedió a mezclar los lodos con un material estructurante.

3.2.2. Material estructurante.

El material de soporte que se utilizó en ambas pilas fue viruta de madera de pino insigne, el cual fue obtenido de un aserradero. El tamaño de este material se escogió pensando en que éste lograra el mayor grado de porosidad posible.

En la tabla N° 3.2, se presenta la caracterización de este material.

Material Estructurante	Humedad (%)	Carbono	Nitrógeno	Relación C/N
Viruta de Madera	31,1	13,7	0,41	33,4

Tabla N° 3.2: Caracterización química del material estructurante utilizado en el proceso de compostaje.

El porcentaje de humedad del material de soporte fue obtenido en el laboratorio de química de la Universidad del Bío-Bío.

En lo que respecta a los porcentajes de carbono y nitrógeno éstos se obtuvieron de literatura (Tchobanoglous, 1998). En la figura N° 3.2, se observa el material de soporte utilizado.



Fig. Nº 3.2: Material de soporte utilizado en el proceso de compostaje.

3.3. Diseño de las pilas a compostar.

Para llevar a cabo el proceso de compostaje que se realizó, se mezcló el residuo sólido biodegradable (lodos) con el material de soporte, en este caso viruta de madera.

La proporción de cada material fue determinada utilizando las expresiones matemáticas recomendadas por Cornell State University (2004) y tratando de satisfacer los requerimientos iniciales de humedad y relación carbono-nitrógeno (C/N) sugeridas por la literatura (Tchobanoglous, 1998).

3.3.1. Cálculo de la humedad teórica de la mezcla.

Para el cálculo de la humedad teórica se utilizó la siguiente ecuación:

$$H_t = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot H_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad \dots(3.1)$$

Donde:

H_i : Porcentaje de humedad de la mezcla.

M_i : Masa húmeda del material i presente en la mezcla.

H_i : Porcentaje de humedad del material i presente en la mezcla.

3.3.2. Cálculo de la razón carbono-nitrógeno (C/N) de la mezcla:

Para el cálculo de la razón carbono-nitrógeno se utilizó la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot C_i \cdot (100 - H_i)}{\sum_{i=1}^n M_i \cdot N_i \cdot (100 - H_i)} \quad \dots(3.2)$$

Donde:

R : Razón carbono-nitrógeno de la mezcla.

M_i : Masa húmeda del material i presente en la mezcla.

H_i : Porcentaje de humedad del material i presente en la mezcla.

C_i : Porcentaje de carbono del material i presente en la mezcla.

N_i : Porcentaje de nitrógeno del material i presente en la mezcla.

Resulta importante destacar que para usar las ecuaciones (3.1) y (3.2) se deben probar valores de cantidades de masa de cada material a mezclar, de forma que se cumplan los parámetros de humedad y razón carbono-nitrógeno en cada pila de acuerdo a lo preestablecido por el operador Cornell State University (2004).

3.3.3. Proporción de cada material presente en las pilas de compostaje.

Para aplicar las ecuaciones (3.1) y (3.2) se definió tanto una humedad teórica como una relación carbono-nitrógeno sugerida por literatura para iniciar el proceso. En la tabla N° 3.3 se muestran dichos valores.

Humedad Teórica (%) (Cisterna, 2008)	Relación C/N (Madrid y otros, 2001)
70	35

Tabla Nº 3.3: Humedad teórica y relación C/N predefinida.

Los valores señalados en la tabla Nº 3.3 se utilizaron para determinar la masa de lodos y de aserrín de ambas pilas de compostaje. De esta manera ambas pilas quedaron dosificadas con las mismas cantidades de cada material.

$$70 = \frac{M_1 \cdot 80 + M_2 \cdot 31,1}{(M_1 + M_2)}$$

$$25 = \frac{M_1 \cdot 31,6 \cdot (100 - 80) + M_2 \cdot 48,1 \cdot (100 - 31,1)}{(M_1 \cdot 1,93 \cdot (100 - 80) + M_2 \cdot 1,2 \cdot (100 - 31,1))}$$

Finalmente la masa de lodos y viruta de madera, que satisfacen ambas expresiones son:

$$M_1 : \text{Masa de lodos} = 330(\text{Kg})$$

$$M_2 : \text{Masa de viruta} = 80(\text{Kg})$$

En la tabla Nº 3.4, se resumen las características de ambas pilas al momento de dar inicio al proceso de compostaje.

	Lodos	Viruta de madera	Mezcla
Masa (Kg)	330	80	410
Proporción (%)	80,49	19,51	100
Humedad (%)	80	31,1	70
Relación C/N	16,37	40,08	25

Tabla Nº 3.4: Principales características de las mezclas a compostar.

3.3.4 Características geométricas de las pilas al inicio del proceso de compostaje.

Luego de haber determinado las cantidades de cada material a compostar, se procedieron a construir las pilas. Para ello se mezclaron ambos materiales, lodo y viruta de manera, obteniendo una mezcla homogénea. La pila fue diseñada geométricamente, de tal manera que se privilegie la aireación. En la tabla N° 3.5, se presentan las dimensiones de las pilas.

Características Geométricas	Dimensión (m)
Base	0,8
Altura	0,4
Longitud	1,7

Tabla N° 3.5: Dimensiones de las pilas a compostar.

3.4. Construcción del sistema de aireación.

Para la construcción del sistema de aireación de las pilas de compostaje, se utilizará tuberías de fierro reciclado, de 34 mm de diámetro interno, con uniones tee del mismo material. Se realizaron orificios con broca de 13 mm y luego se incorporaron difusores con un diámetro de 10 mm. En la pila N° 2 orificios cada 100 mm y en la pila N° 3 cada 200 mm.

Se diseñaron las tuberías, tal que pasara por el medio de la pila en su altura y dividiera en tres tramos, tanto la sección trasversal como la longitudinal. En la tabla N° 3.6, se muestra las dimensiones y en la figura N° 3.3, la geometría proyectada para el sistema de aireación.

Características Geométricas	Dimensión (m)
A	0,27
H	0,2
L	0,6
L1	0,55
D	0,2

Tabla Nº 3.6: Dimensiones sistema de aireación.

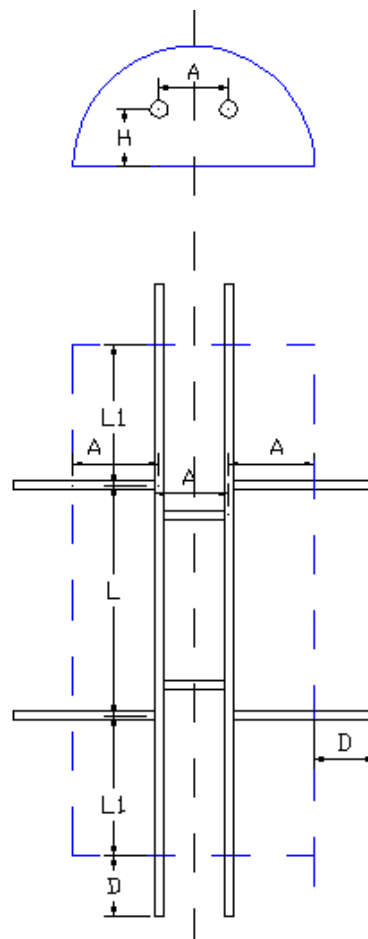


Fig. Nº 3.3: Esquema sistema de aireación proyectado.

En la figura Nº 3.4, se muestra el sistema de aireación terminado, con los difusores incorporados.



Fig. Nº 3.4: Sistema de aireación terminado con difusores de 10mm de diámetro incorporados.

3.5. Parámetros evaluados durante el proceso de compostaje.

Los parámetros evaluados a las pilas de compostaje durante la investigación fueron: temperatura, humedad, sólidos volátiles y minerales y pH. La descripción de los métodos utilizados para el control de la humedad, sólidos volátiles y minerales y pH, se encuentran en el anexo A.

3.5.1 Temperatura interna de la pila.

Durante un proceso de compostaje el control de la temperatura interna de la pila resulta de vital importancia, ya que ésta constituye una variable de indagación muy certera del nivel de actividad biodegradadora llevada a cabo por los microorganismos.

La temperatura de las pilas se midió en tres puntos: uno de ellos fue en el centro de la pila, en un punto ubicado aproximadamente en la mitad de su altura; los otros dos puntos escogidos para su medición fueron a una profundidad entre 15 y 20 cm.

En la figura Nº 3.5 se ilustra un esquema que muestra la sección transversal de la pila con la ubicación de los puntos en los cuales se efectuaron las mediciones de temperatura.

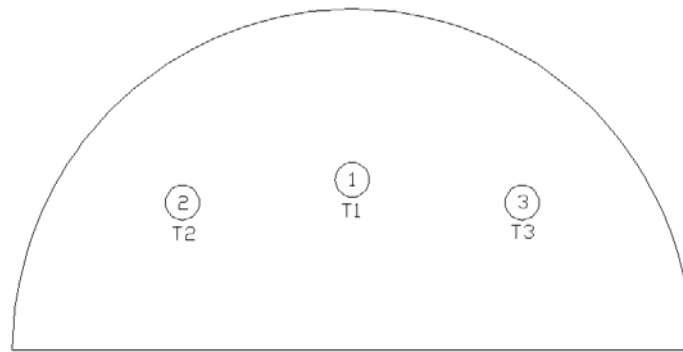


Fig. N° 3.5: Posiciones de medición de la temperatura interna de las pilas de compostaje.

Donde:

T1, T2, T3: temperaturas internas de las pilas en los puntos 1, 2 y 3 respectivamente.

El instrumento utilizado para medir la temperatura interna de las pilas en proceso de compostaje fue un termómetro de mercurio, el cual se introducía hasta las posiciones antes descritas tras lo cual se esperaba un par de minutos hasta que se estabilizara el valor que éste registraba.

3.6. Procedimientos operacionales efectuados a las pilas de compostaje.

Los procedimientos operacionales efectuados a la pila N° 1 fue el volteo del material que se encontraba en proceso de biodegradación de su materia orgánica. En cambio la incorporación de aireación pasiva se realizó a las pilas N° 2 Y N° 3.

3.6.1. Volteo.

El volteo del material suministra oxígeno a los microorganismos encargados de la biodegradación de la materia orgánica, haciendo que el proceso sea aeróbico. Permite mezclar zonas de alta biodegradación con zonas que se encuentran en un proceso fermentativo más lento (homogeniza la masa a compostar).

El volteo de las pilas fue realizado manualmente con pala.

3.7 Medición de parámetros.

La frecuencia de medición de los parámetros evaluados y de ejecución de los procedimientos operacionales a lo largo del proceso de compostaje se detalla en la tabla N° 3.7.

Parámetro	Etapas de Compostaje	Etapas de Maduración
T°	Diaria	Diaria
Ph	Cada 2 días	Cada 4 días
Volteo	Cada 2 días	Cada 5 días
Humedad	Cada 2 días	Cada 4 días
Riego	Cuando la H < 45%	

Tabla N° 3.7: Frecuencia de medición de las variables a medir.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos luego de ciento doce días de mediciones efectuadas a los proceso de compostaje en estudio.

Es importante mencionar, que la temperatura considerada para la comparación entre experiencias es la que en general fue la más alta registrada entre los puntos medidos, mencionados en la sección 3.5.1, que es la temperatura medida en el centro de la pila (T1).

4.1. COMPOSTAJE MEDIANTE VOLTEO (PILA Nº 1)

Se debe recordar que esta pila estuvo sometida a volteo durante toda la investigación, periódicamente como ya se indicó. A continuación se analizan cada una de las variables medidas durante el proceso de compostaje.

4.1.1. Variación de la temperatura interna de la pila

Al observar la figura Nº 4.1 se aprecia que al cabo de 24 horas de la creación de esta pila, la temperatura alcanzada fue de 28 °C. Además se observa que fue la más alta alcanzada durante todo el proceso, lo cual indica que el proceso de biodegradación se encontró en la etapa mesofílica a lo largo de toda la investigación.

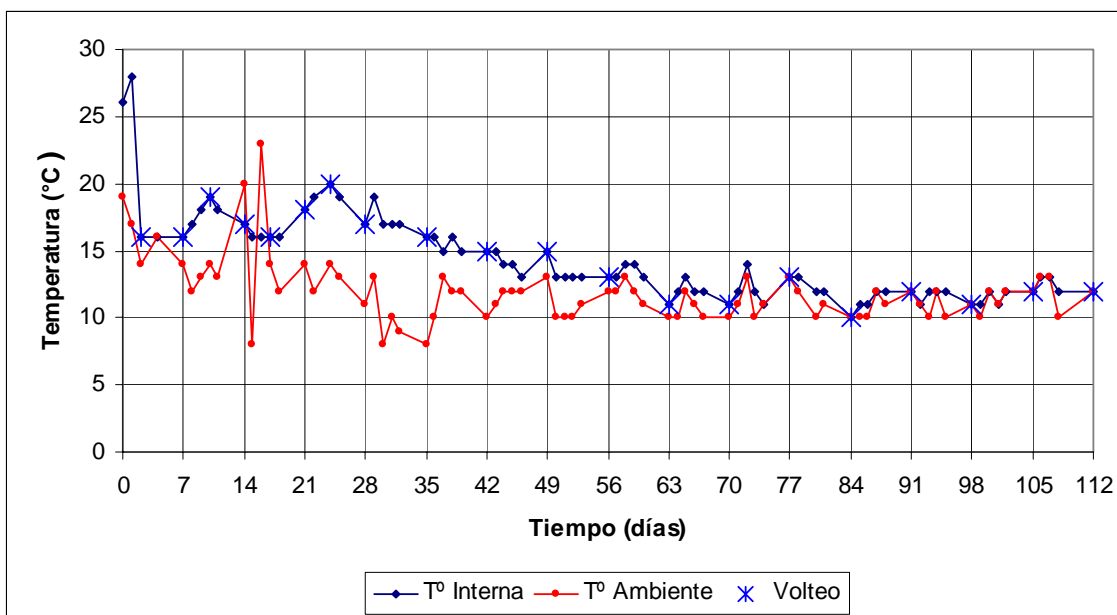


Fig. N° 4.1: Control temperatura interna de la pila N° 1.

El volteo se realizó en forma periódica. Es posible notar su efecto de inmediato sobre el proceso de compostaje, a través de una caída significativa de la temperatura interna de la pila en el día 2. Sin embargo en los días siguientes se produce un alza en la temperatura interna de la pila debido a un aumento de la actividad microbiana como consecuencia del suministro de oxígeno que proporcionó tal operación.

Otro aspecto importante es la influencia de la temperatura ambiente sobre el proceso, debido a que la pila está sometida a bajas temperaturas durante esta época del año. A partir del día 45 en adelante, se puede observar que las temperaturas en la pila son semejantes a la ambiental, debido al estancamiento de la biodegradación en la pila y comienzo de la etapa de maduración del proceso de compostaje de la pila.

4.1.2. Variación de la humedad interna de la pila.

Al momento del inicio del proceso de compostaje la pila se encontraba con una humedad de 70%.

En la figura N° 4.2 se observa la variación de la humedad interna de la pila N° 1, de donde se puede destacar que en los días 2 y 14 se observan bajas considerables de humedad, lo que se explica debido a altas temperaturas ambientales ocurridas en esas fechas durante la investigación. Además se aprecia que la pérdida de humedad es durante el primer mes, lo que se asocia a la alta actividad microbiológica para llevar a cabo la biodegradación.

Aunque la pila se encuentra protegida de la lluvia, igualmente se aprecia un aumento de la humedad interna de la pila durante los días lluviosos.

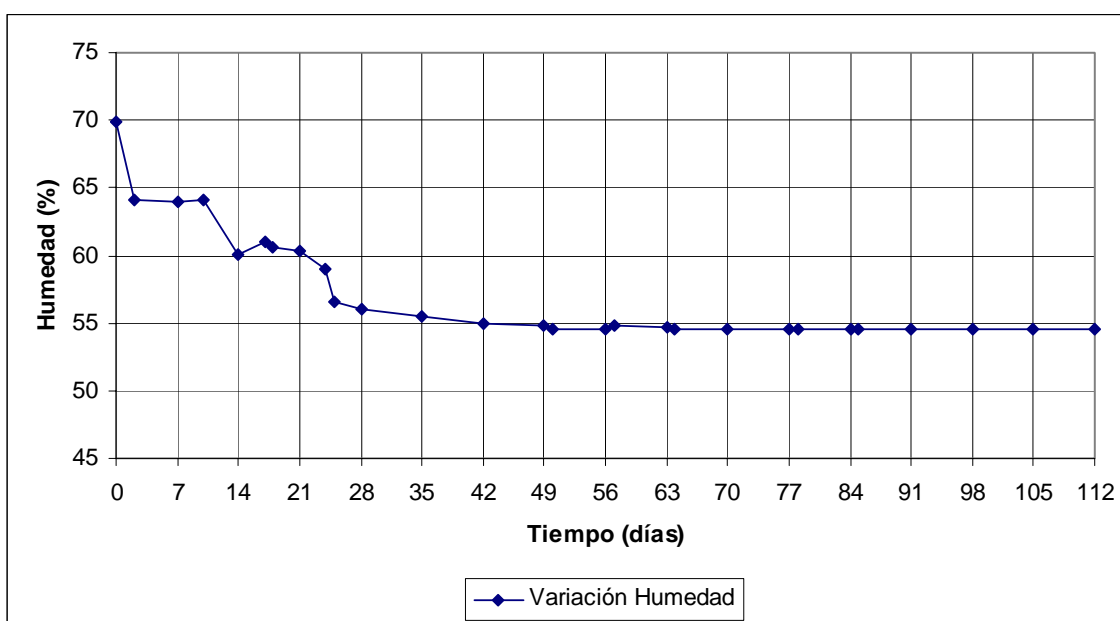


Fig. N° 4.2: Variación de la humedad interna de la pila N° 1.

4.1.3. Variación del pH en la pila.

El valor del pH inicial de la pila fue de 7. De la figura N° 4.3 se puede observar que el pH en la pila sufre una variación, en el periodo de 7 a 25 días, debido a la actividad metabólica que eleva la temperatura y se producen ácidos orgánicos que

hacen bajar el pH. Luego de esto, el pH alcanza el valor de 7 hasta el final del periodo de investigación.

En la figura N° 4.3, se puede observar la evolución que tuvo el pH de la pila en proceso de compostaje.

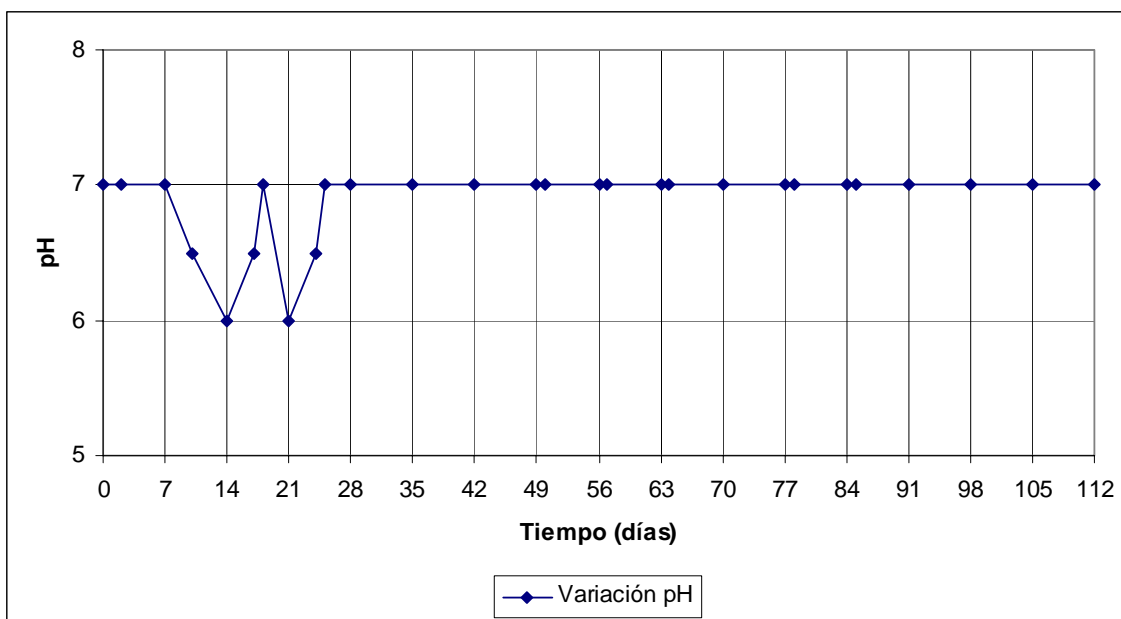


Fig. N° 4.3: Variación del pH de la pila N° 1.

4.1.4 Variación de sólidos suspendidos volátiles en la pila.

La variación de materia orgánica en una pila de compostaje es medida como la variación de sólidos volátiles presentes en ésta.

Al inicio del proceso el contenido de materia orgánica en el interior de la pila era de aproximadamente 75% mientras que el valor registrado el día 112 es de un 59,45%, lo cual constata una reducción del volumen inicial de la masa a compostar.

Se aprecia además que durante los 50 primeros días se concentra la mayor disminución de la materia orgánica. Esta reducción se asocia con las reacciones de biodegradación aeróbica que generan dióxido de carbono y agua.

En la figura 4.4 se observa la variación de sólidos volátiles en el tiempo.

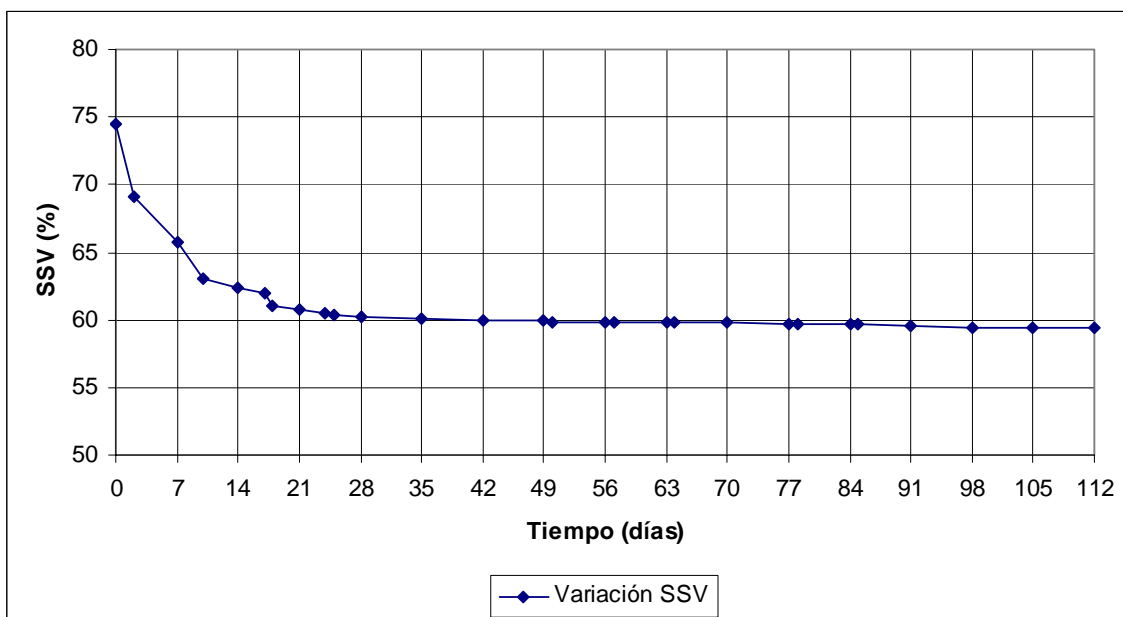


Fig. Nº 4.4: Variación Sólidos Suspendidos Volátiles en el tiempo de la pila Nº 1.

4.1.5 Variación de sólidos suspendidos minerales en la pila.

Al inicio del proceso de biodegradación el porcentaje de contenido mineral presente en la pila era de un 25% aproximadamente. A raíz de la reducción de la materia orgánica, al final de la investigación el porcentaje de sólidos minerales es de un 40,55%.

En la figura 4.5 se observa la curva que muestra la variación de los sólidos suspendidos minerales que presentó la pila.

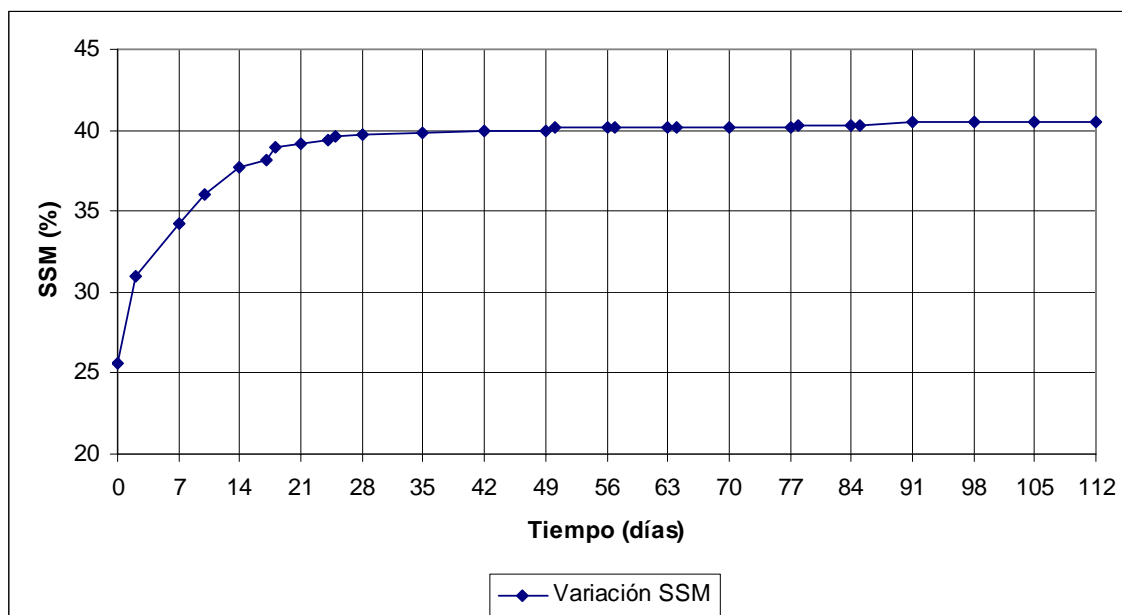


Fig. N° 4.5: Variación Sólidos Suspendedos Minerales en el tiempo de la pila N° 1.

4.2. COMPOSTAJE CON AIREACION PASIVA CON DIFUSORES CADA 10 cm (PILA N° 2)

Esta pila estuvo sometida a aireación pasiva durante toda la investigación. A continuación se analizan cada una de las variables medidas durante el proceso de compostaje.

4.2.1. Variación de la temperatura interna de la pila

Al observar la figura N° 4.6 se aprecia que al cabo de 24 horas de la creación de esta pila, la temperatura alcanzada fue de 24 °C. Además se observa que fue la más alta alcanzada durante todo el proceso, lo cual indica, que el proceso de biodegradación se encontró en la etapa mesofílica a lo largo de toda la investigación.

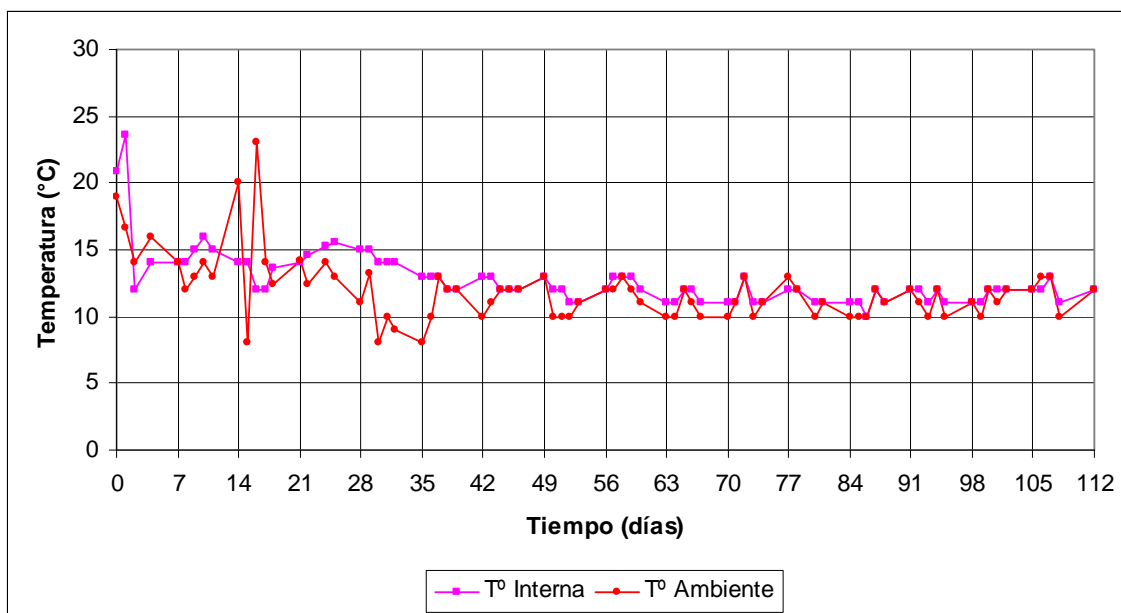


Fig. N° 4.6: Control temperatura interna de la pila N° 2.

En el día 2 se produce una baja considerable en la temperatura interna, recuperándose posteriormente, debido al aumento de la actividad microbiana como consecuencia del suministro de oxígeno que proporciona el sistema de aireación.

A partir del día 37 en adelante se puede observar que las temperaturas en la pila son semejantes a la ambiental, debido al estancamiento de la biodegradación en la pila y comienzo de la etapa de maduración del proceso de compostaje de la pila.

4.2.2. Variación de la humedad interna de la pila.

Al momento del inicio del proceso de compostaje la pila se encontraba con una humedad de 70%. En la figura N° 4.7, se observa la variación de la humedad interna de la pila N° 2, de donde se puede destacar que en el día 14 se observan bajas considerables, justificado por las altas temperaturas alcanzadas. Aunque la pila se encuentra protegida de la lluvia, igualmente se aprecia un aumento de la humedad interna de la pila durante los días lluviosos.

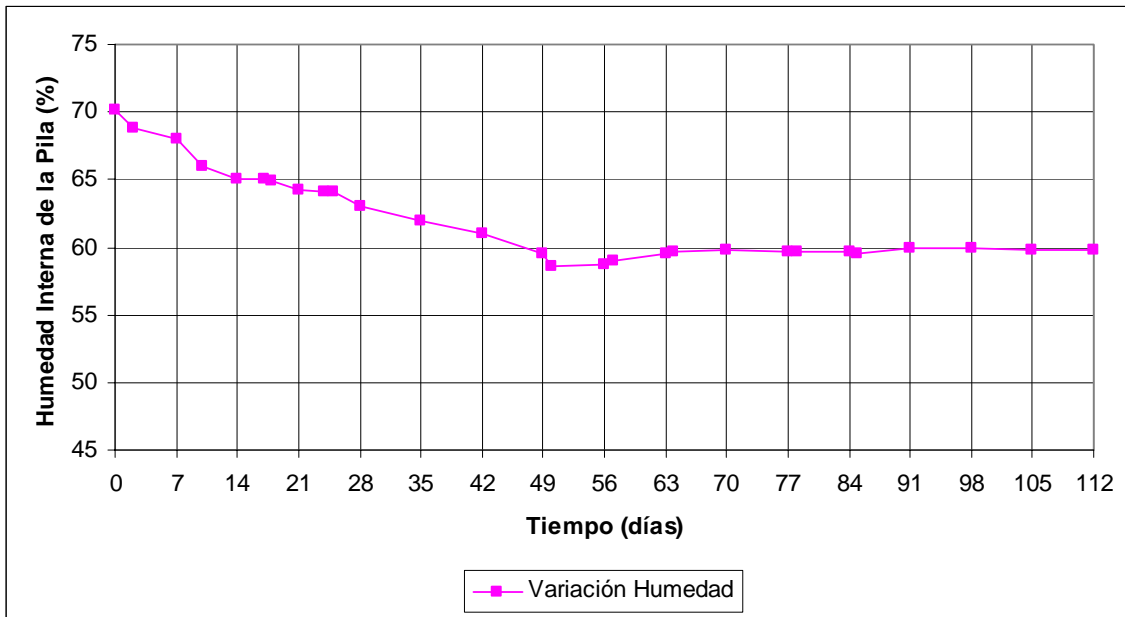


Fig. N° 4.7: Variación de la humedad interna de la pila N° 2.

4.2.3. Variación del pH en la pila.

El valor del pH inicial de la pila fue de 7. De la figura N° 4.8, se puede observar que el pH en la pila sufre una variación, en el periodo de 18 a 25 días, debido a la actividad metabólica que eleva la temperatura y se producen ácidos orgánicos que hacen bajar el pH. Luego de esto, el pH alcanza el valor de 7 hasta el final del periodo de investigación. En la figura N° 4.8, se puede observar la evolución que tuvo el pH de la pila en proceso de compostaje.

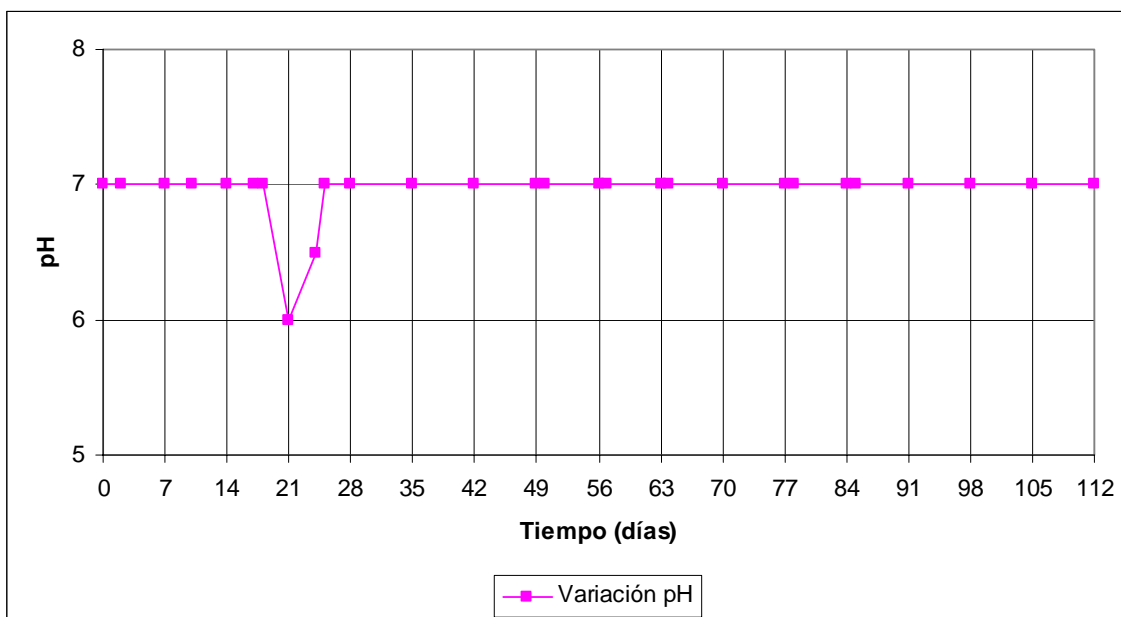


Fig. Nº 4.8: Variación del pH de la pila Nº 2.

4.2.4 Variación de sólidos suspendidos volátiles en la pila.

Al inicio del proceso el contenido de materia orgánica en el interior de la pila era de aproximadamente 74,5% mientras que el valor registrado el día 112 es de un 64,7%. Se aprecia además que durante aproximadamente los 57 primeros días se concentra la mayor disminución de la materia orgánica. Esta reducción se asocia con las reacciones de biodegradación aeróbica que generan dióxido de carbono y agua. En la figura 4.9 se observa la variación de sólidos volátiles en el tiempo.

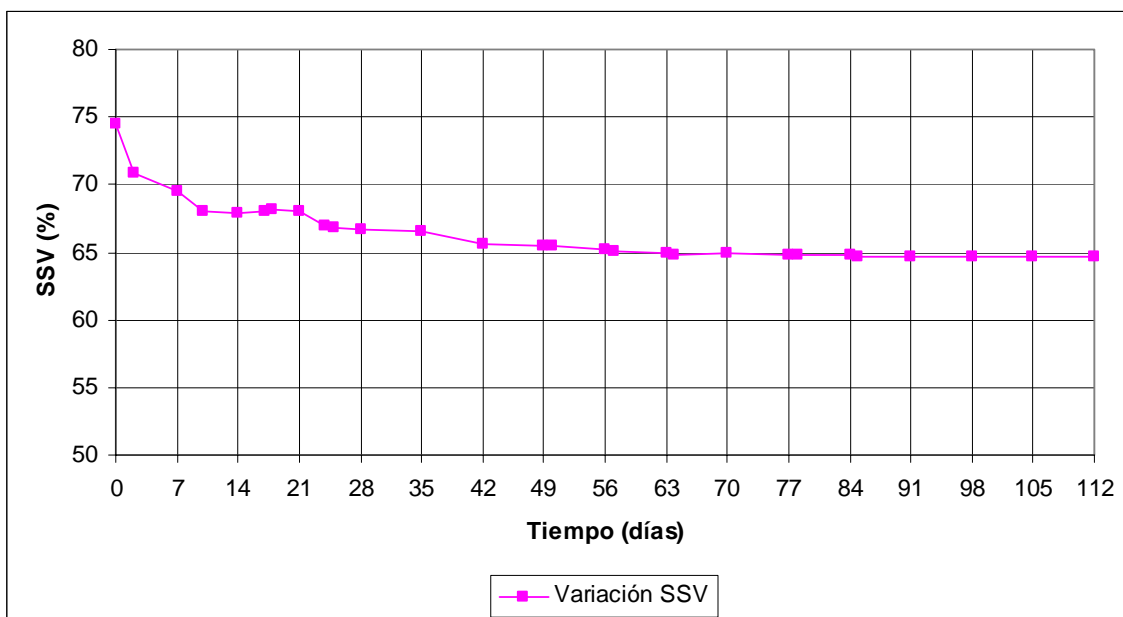


Fig. Nº 4.9: Variación Sólidos Suspendidos Volátiles en el tiempo de la pila Nº 2.

4.2.5. Variación de sólidos suspendidos minerales en la pila.

Al inicio del proceso de biodegradación el porcentaje de contenido mineral presente en la pila era de un 25,5% aproximadamente. A raíz de la reducción de la materia orgánica, al final de la investigación el porcentaje de sólidos minerales es de un 35,3%. En la figura 4.10, se observa la curva que muestra la variación de los sólidos suspendidos minerales que presentó la pila.

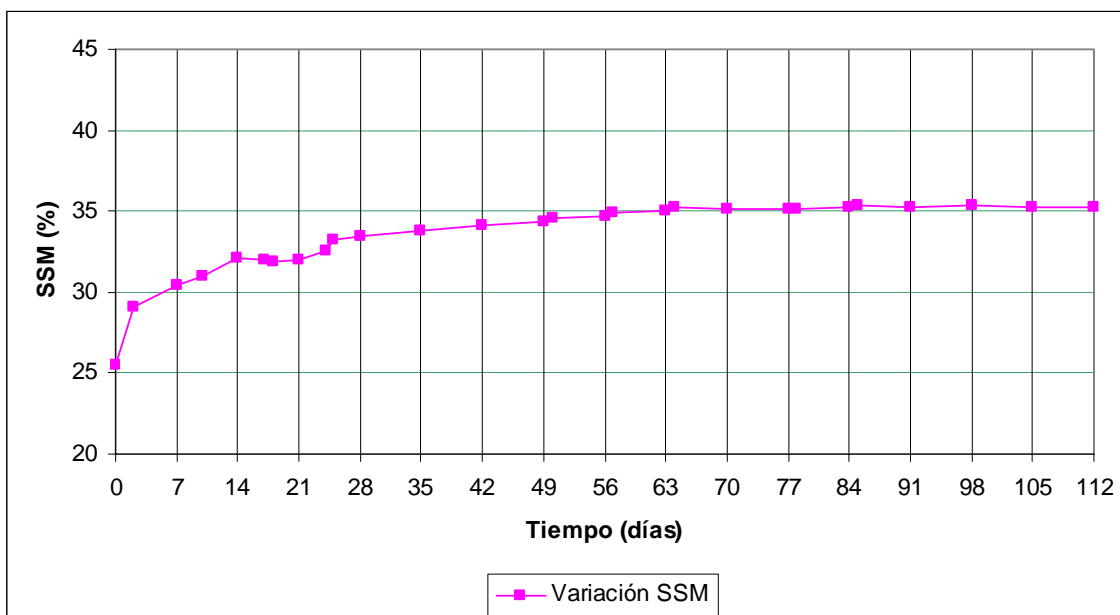


Fig. N° 4.10: Variación Sólidos Suspendidos Minerales en el tiempo de la pila N° 2.

4.3. COMPOSTAJE CON AIREACION PASIVA CON DIFUSORES CADA 20 cm (PILA N° 3)

Esta pila estuvo sometida a aireación pasiva durante toda la investigación con difusores de aire cada 20 cm. A continuación se analizan cada una de las variables medidas durante el proceso de compostaje.

4.3.1. Variación de la temperatura interna de la pila.

Al observar la figura N° 4.11 se aprecia que al cabo de 24 horas de la creación de esta pila, la temperatura alcanzada fue de 22 °C. Además se observa que fue la más alta alcanzada durante todo el proceso, lo cual indica, que el proceso de biodegradación se encontró en la etapa mesofílica a lo largo de toda la investigación.

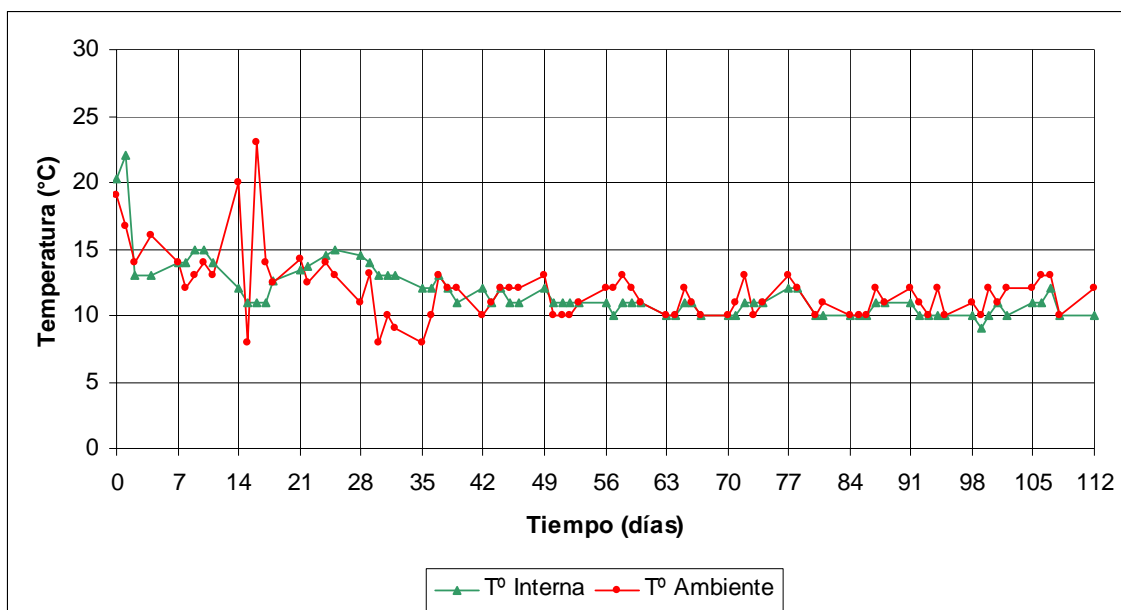


Fig. Nº 4.11: Control temperatura interna de la pila Nº 3.

En el día 2 se produce una baja considerable en la temperatura interna, recuperándose posteriormente, pero consiguiendo sólo una temperatura máxima de 15 °C en el resto del periodo. A partir del día 37 en adelante, se puede observar que las temperaturas en la pila son semejantes a la ambiental, y durante el resto del periodo en general se presentaron temperaturas inferiores a la temperatura ambiental.

4.3.2. Variación de la humedad interna de la pila.

Al momento del inicio del proceso de compostaje la pila se encontraba con una humedad de 70%.

En la figura Nº 4.12, se observa la variación de la humedad interna de la pila Nº 3, de donde se puede destacar que el día 7 presenta una baja en el valor, debido a la actividad microbiana para llevar a cabo la biodegradación. A partir del día 24 se aprecia un aumento de la humedad en el interior de la pila.

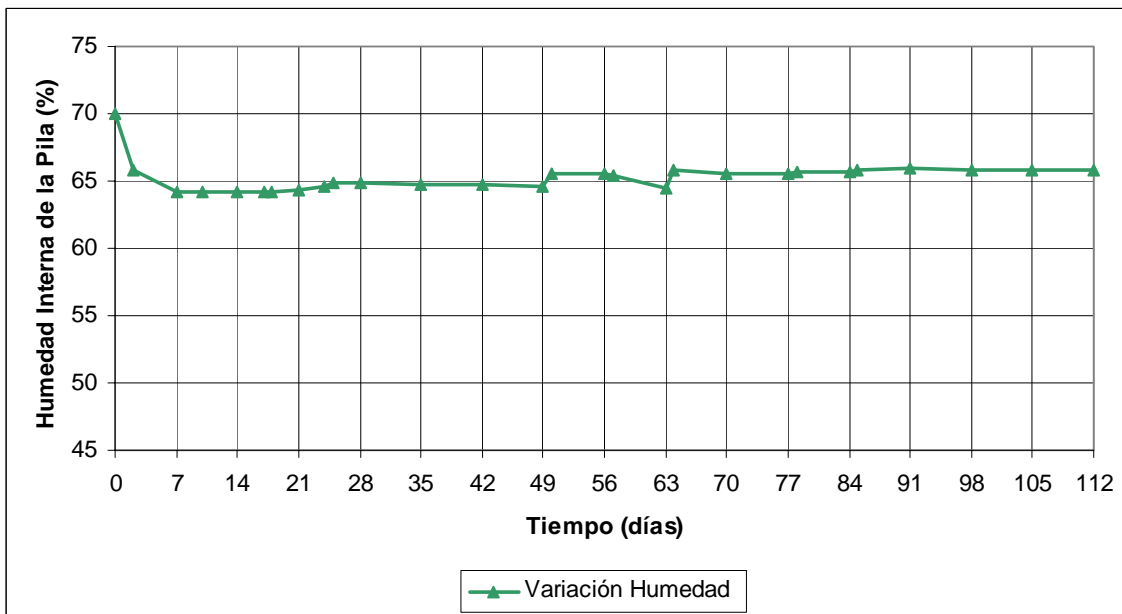


Fig. Nº 4.12: Variación de la humedad interna de la pila Nº 3.

4.3.3. Variación del pH en la pila.

El valor del pH inicial de la pila fue de 7. De la figura Nº 4.13 se puede observar que el pH en la pila sufre una variación, en el periodo de 7 a 25 días, debido a la actividad metabólica que eleva la temperatura y se producen ácidos orgánicos que hacen bajar el pH. El valor del pH bajo a 6, en el periodo de 85 a 91 días, para luego al final del proceso llegar a 5, por una deficiente oxigenación. En la figura Nº 4.13, se puede observar la evolución que tuvo el pH de la pila en proceso de compostaje.

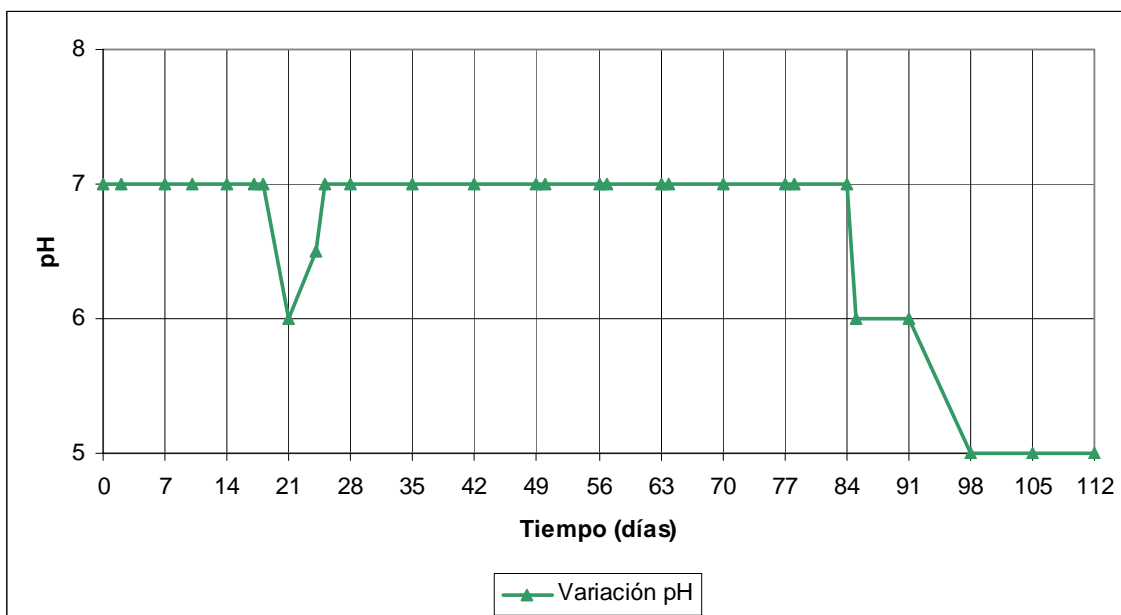


Fig. Nº 4.13: Variación del pH de la pila Nº 3.

4.3.4 Variación de sólidos suspendidos volátiles en la pila.

Al inicio del proceso el contenido de materia orgánica en el interior de la pila era de aproximadamente 74,4% mientras que el valor registrado el día 112 es de un 68,6%. Se aprecia además que durante aproximadamente los 70 primeros días se concentra la mayor disminución de la materia orgánica. Esta reducción se asocia con las reacciones de biodegradación aeróbica que generan dióxido de carbono y agua.

En la figura 4.14 se observa la variación de sólidos volátiles en el tiempo.

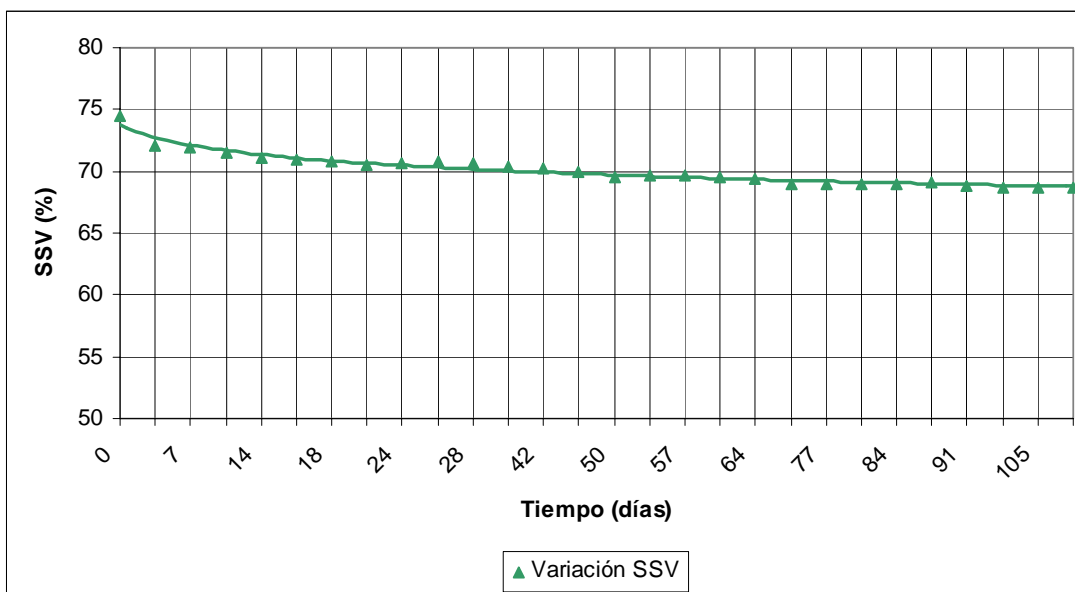


Fig. Nº 4.14: Variación Sólidos Suspending Volátiles en el tiempo de la pila Nº 3.

4.3.5 Variación de sólidos suspendidos minerales en la pila.

Al inicio del proceso de biodegradación el porcentaje de contenido mineral presente en la pila era de un 25,6% aproximadamente. A raíz de la reducción de la materia orgánica, al final de la investigación el porcentaje de sólidos minerales es de un 31,3%. En la figura 4.15, se observa la curva que muestra la variación de los sólidos suspendidos minerales que presentó la pila.

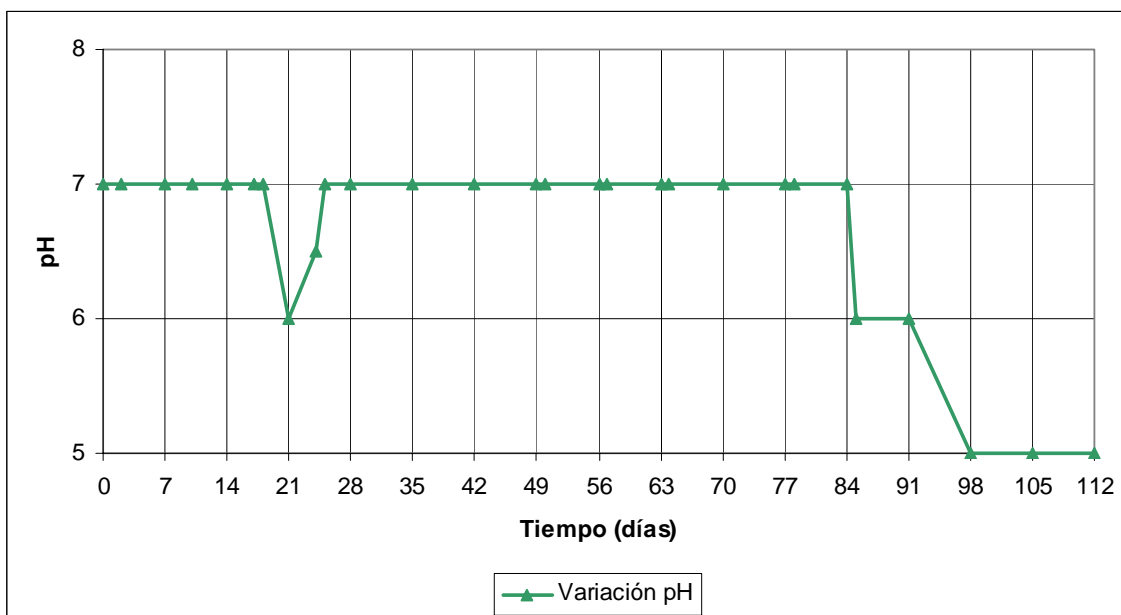


Fig. N° 4.15: Variación Sólidos Suspendidos Minerales en el tiempo de la pila N° 3.

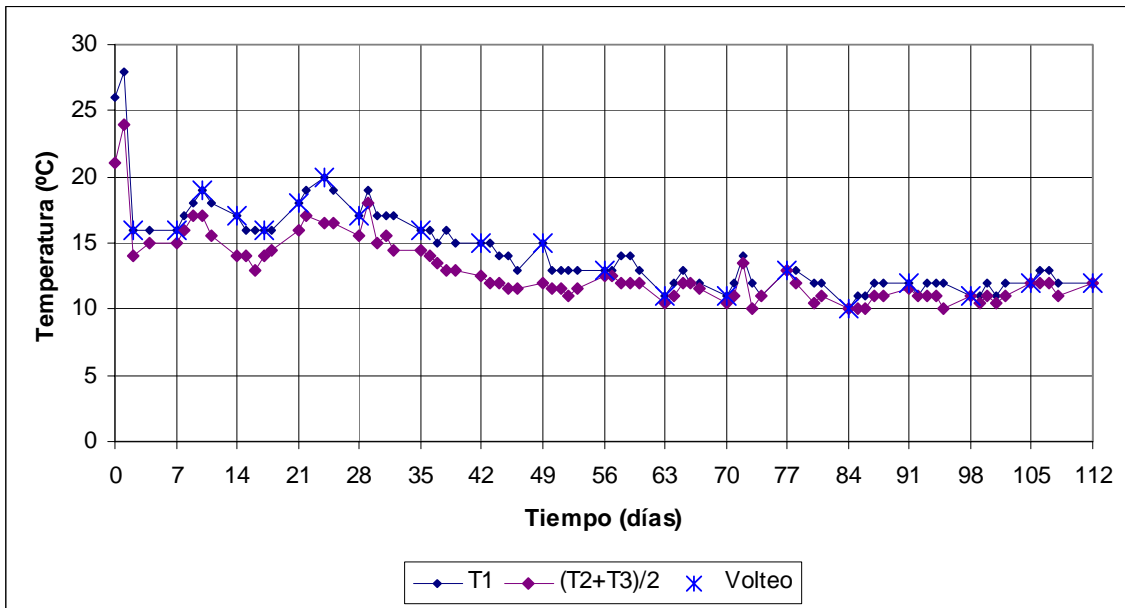
4.4. COMPARACIÓN ENTRE EXPERIENCIAS.

En los siguientes puntos se comparan las principales variables medidas en las tres pilas de compostaje estudiadas, de manera de visualizar el efecto de la variación de la aireación en dichas variables.

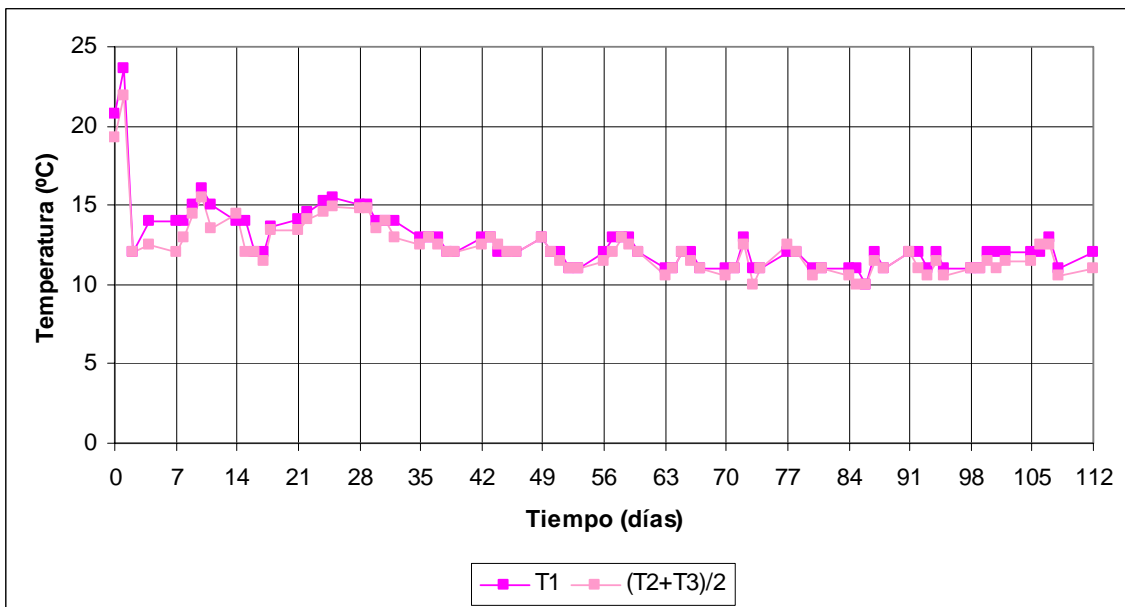
4.4.1 Comparación de las temperaturas internas registradas en las pilas.

Recordando lo que se menciona en la sección 3.5.1, se realizaron mediciones de temperatura interna en tres puntos de las pilas. A partir de estas mediciones efectuadas se construyeron los siguientes gráficos en la figura N° 4.16, donde se puede observar que en la pila N° 1 existe una marcada diferencia entre la medición central en el interior de la pila (T1) con lo existente en las orillas (T2 y T3). A diferencia de las pilas N° 2 y N° 3, donde esta diferencia no es significativa. Las temperaturas medidas en T2 y T3 son similares, por lo que se calculó un promedio de ellas para hacer la comparación con la registrada en T1.

Pila N° 1



Pila N° 2



Pila Nº 3

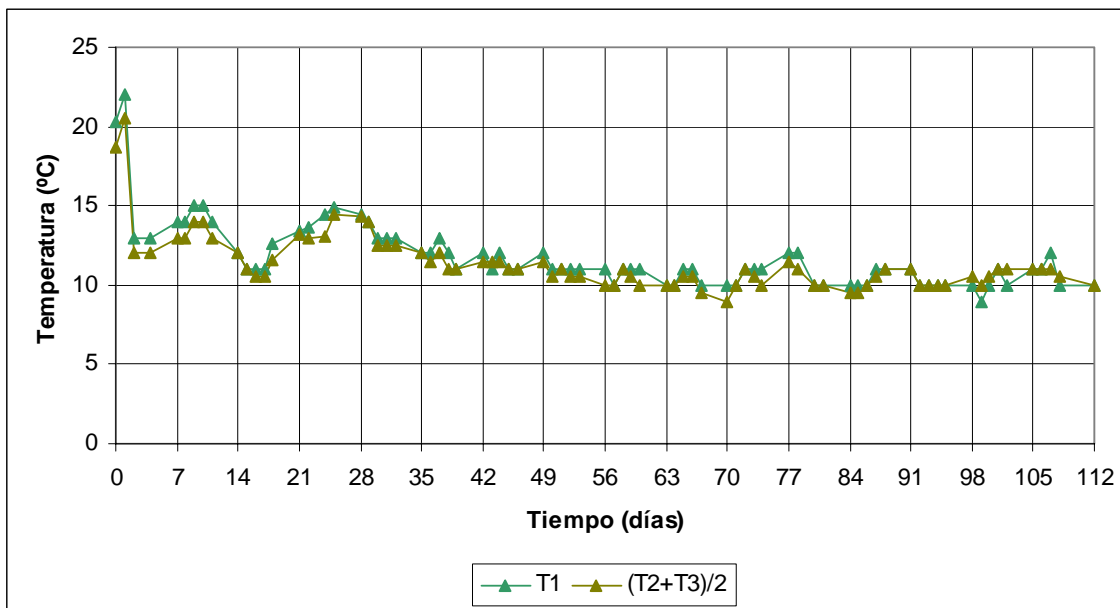


Fig. Nº 4.16: Variación de la Temperatura en los Distintos Puntos de Medición para cada Pila.

Al observar la figura Nº 4.17 se observa que las más altas temperaturas fueron alcanzadas en la pila Nº 1, con un máximo de 28 °C, y la pila que registro la mas baja fue la Nº 3, con una temperatura máxima de 22 °C. Esto se explica por la falta de aireación presente en la pila, lo que trae consigo una baja actividad microbiológica. Mientras que la pila Nº 2 estuvo entre el rango de las anteriores y su temperatura máxima fue de 24 °C.

Otro punto a destacar es el periodo durante el cual las pilas mantuvieron las temperaturas sobre la ambiental, donde, en la pila Nº 1 se mantuvo por un periodo de 45 días, en la pila Nº 2 de 37 días al igual que en la pila Nº 3.

Cabe destacar que en ninguna de las tres pilas se alcanzó a desarrollar organismos termofílicos. Por lo tanto, toda la investigación se encontró en la etapa mesofílica.

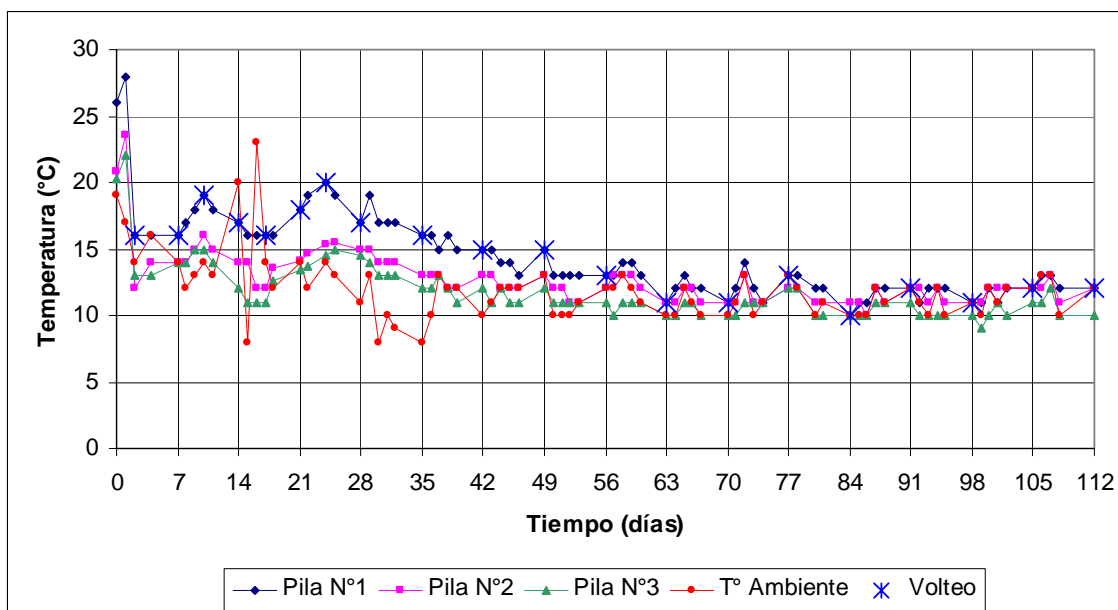


Figura 4.17: Comparación de las temperaturas internas de las pilas.

Además, en ningún momento se desarrollaron temperaturas por sobre lo 55 °C en el interior de las pilas, temperatura considerada como necesaria para la destrucción de patógenos presentes en la pila a compostar (Cisterna, 2004).

4.4.2 Comparación de la humedad interna registradas en las pilas.

Para la construcción de la figura N° 4.18, se utilizaron los datos de precipitación diaria del observatorio geodésico Tigo, para el periodo de investigación del 28 de abril al 18 de agosto de este año (Anexo C). Como se aprecia claramente en la figura N° 4.18, la humedad interna de las pilas fue variada en las pilas. En las tres pilas el valor inicial de la humedad fue de 70%. Considerando lo antes mencionado sobre las temperaturas internas en cada pila, es lógico que las pilas que presenta una mayor baja en el contenido de humedad, sean las pilas N° 1 y N° 2, debido al consumo por parte de los microorganismos para llevar a cabo la biodegradación y a la evaporación por las temperaturas desarrolladas. En cuanto a la pila N° 3, queda claro que el alto contenido de humedad se debe a la baja actividad microbiológica desarrollada durante el proceso.

Las tres pilas se vieron muy susceptibles a la humedad presente en el ambiente, por ejemplo el día 14 se registraron 20 °C de temperatura ambiente, provocando en la pila N° 1 Y N° 2, una baja considerable de humedad y en los días de lluvias se aprecia, en general, un aumento.

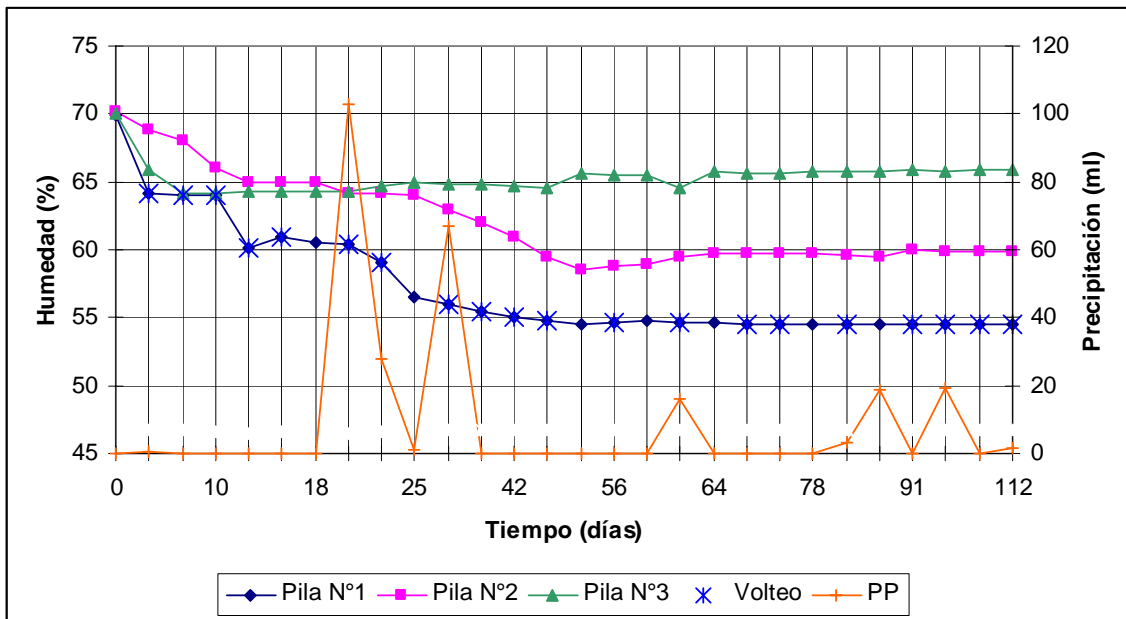


Figura 4.18: Comparación de la humedad interna de las pilas.

4.4.3. Comparación del pH registrado en la pila.

Como se puede observar en la figura N° 4.19, el valor del pH inicial de las pilas fue de 7. En la pila N° 1 el pH baja a 6, en el periodo de 7 a 25 días debido a la actividad metabólica que eleva la temperatura y se producen ácidos orgánicos. Lo mismo ocurre para la pila N° 2 y N° 3, en el periodo de 18 a 25 días.

Luego las pilas N° 2 y N° 3, aumentan el pH llegando al valor 7, que se registro hasta el final de la investigación. En la pila N° 3 alcanza el valor de pH 6, en periodo de 85 a 91 días, para luego al final del proceso llegar a 5, debido a la deficiente oxigenación.

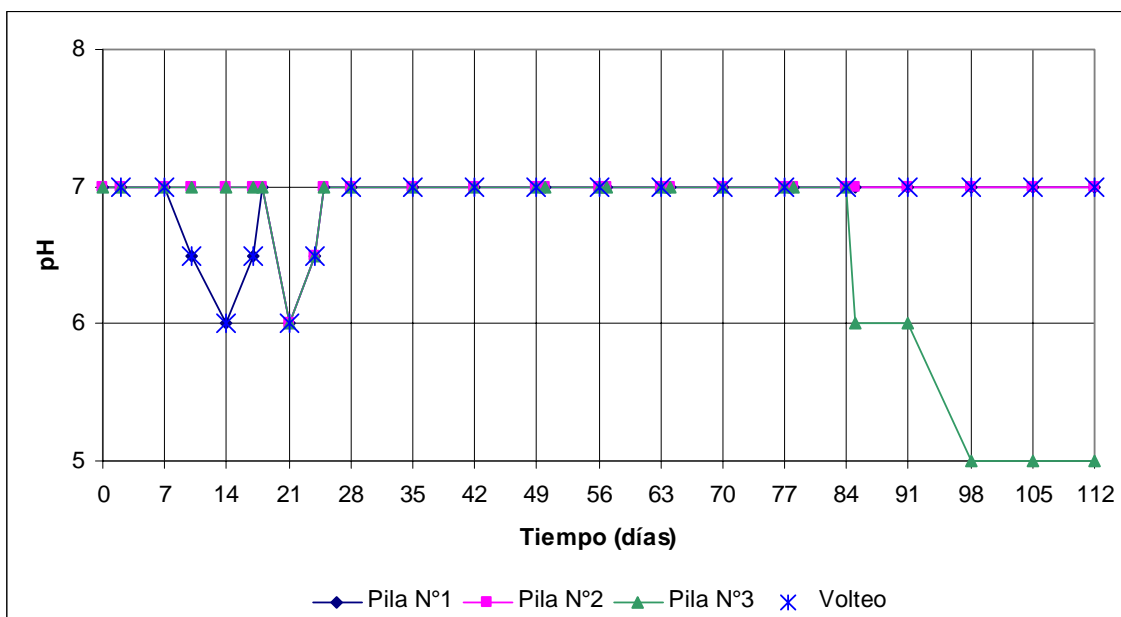


Figura 4.19: Comparación del pH de las pilas.

4.4.4. Comparación de la variación de sólidos suspendidos volátiles registrado en las pilas.

En la figura N° 4.20, se observa que la fracción inicial de sólidos suspendidos volátiles en las tres pilas fue de 75. La pila con una mayor reducción de sólidos volátiles es la N° 1, llegando a un valor de 59,45% y la más baja fue N° 3, alcanzando un valor de 68,7%, mientras que la pila N° 2 llega a un valor de 64,7%. De la misma forma que se comportó la temperatura, se refleja aquí, dado que a una mayor biodegradación desarrollada durante el proceso se produce una mayor temperatura.

Otro aspecto importante es el periodo durante el cual existe una mayor baja en el contenido de sólidos volátiles. En la pila N° 1, el periodo es de 50 días, llegando a un valor de 54,54%, la pila N° 2, durante 57 días alcanzando un valor de 65,05% y la pila N° 3 de 70 días con un valor de 69,01%.

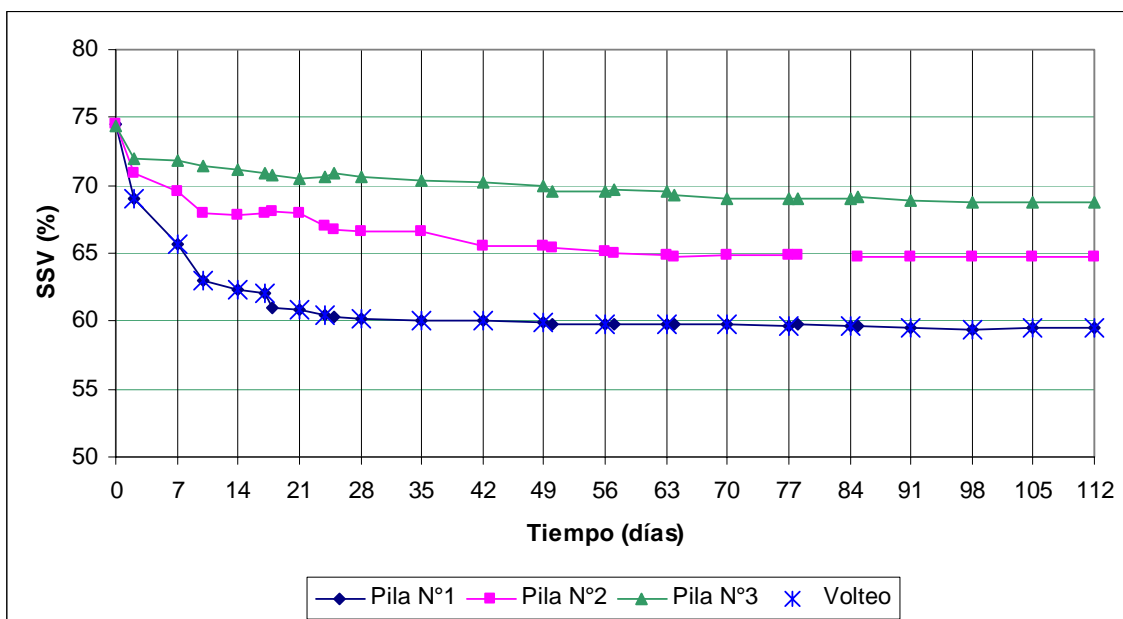


Fig. N° 4.20: Comparación de la variación de sólidos suspendidos volátiles en el tiempo.

4.4.5. Comparación visual de las pilas.

De la figura N° 4.21 se puede apreciar que la pila N° 1 presenta el mejor aspecto de todas y la menor humedad. En cuanto a la pila N° 2 presenta un buen aspecto pero un mayor contenido de humedad comparado con la muestra de la pila N° 1. En cambio la pila N° 3 presenta mal aspecto, gran contenido de humedad y mal olor, con grandes muestras de pudrición.

Pila N° 1



Pila N° 2



Pila N° 3



Fig. N° 4.21: Muestras de cada pila

4.4.6. Comparación de las constantes endógenas de las pilas.

Para determinar la constante endógena o de reacción (K_d) se procedieron a linealizar las curvas mostradas en la figura 4.21. La pendiente para cada línea de tendencia corresponde a la constante de reacción.

En el caso de la pila N° 1 el valor de K_d es 0,0686, en la pila N° 2 el valor es de 0,0485 y en la pila N° 3 es de 0,028.

Esta diferencia en los valores de las constantes de reacción se explica por las diferentes condiciones de aireación a las que encontraban expuestas las pilas.

En la figura se aprecia 4.22 se aprecia que las constantes K_d presentan la misma tendencia que presentaron las pilas frente a todas las mediciones efectuadas, donde la pila N° 1, presenta un mayor valor que las pilas N° 2 y N° 3. A su vez la pila N° 2 registra un mayor valor que la pila N° 3, debido a que esta ultima fue expuesta a una deficiente aireación.

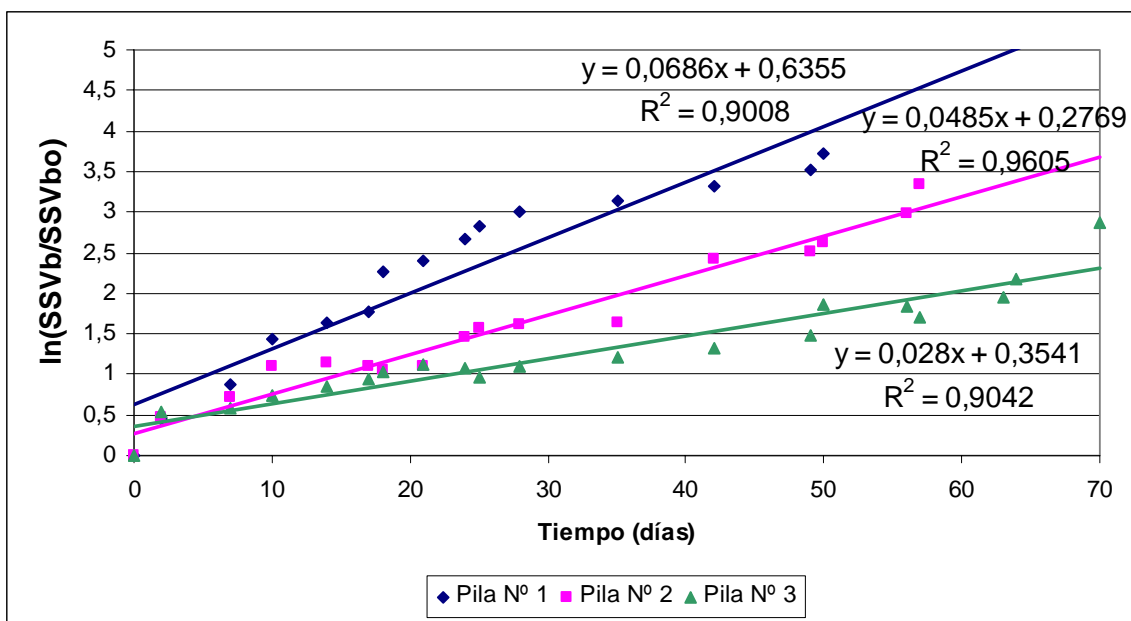


Fig. N° 4.22: Determinación de las constantes endógenas para ambas pila.

Es importante señalar que si bien la temperatura interna de las pilas es variable durante el proceso de biodegradación de su materia orgánica, para el desarrollo de la linealización de la curva se consideró una temperatura interna media, de manera de hacer una aproximación a la cinética de un digestor aeróbico, en el cual la constante endógena se encuentra asociada a una temperatura constante.

CAPITULO V. CONCLUSIONES.

- Durante la investigación se vieron afectados, por efecto de la aireación en las pilas, todos los factores medidos en diferente grado.
- La pila sometida a volteo, presenta gran actividad microbiológica reflejada en su evolución de temperatura, alcanzando un máximo de 28 °C. A diferencia de las pilas con aireación pasiva, que alcanzan máximos de 24 y 22 °C, comprobándose que la pila con menor aireación alcanza menores temperaturas en el periodo de experimentación.
- Las pilas con mayor oxigenación, pila sometida a volteo y pila estática con mayor cantidad de difusores, presentan una baja en el contenido de humedad, a lo largo del proceso, debido a la actividad microbiológica y a la evaporación por las temperaturas desarrolladas. En cuanto a la pila expuesta a deficiente aireación, queda claro que el alto contenido de humedad se debe a la baja actividad desarrollada durante el proceso.
- En un comienzo, la actividad metabólica eleva la temperatura y se producen ácidos orgánicos que hacen bajar el pH en las tres pilas, para luego alcanzar un pH 7 por el resto del proceso, en el caso de las pilas con mayor oxigenación. La pila expuesta a una deficiente aireación al final del proceso, alcanza valores de pH 5.
- La pila con compostaje mediante volteo presenta una mayor reducción de sólidos comparada con el resto. Y entre las pilas estáticas con aireación pasiva, se destaca que la pila con mayor cantidad de difusores desarrolla una mayor reducción.

- En terreno, se pudo ver claramente las diferencias físicas presentadas entre el compost de cada pila al final del proceso. Encontrándose que la muestra con mejor aspecto es la pila sometida a volteo y luego la pila estática con difusores cada 10 cm, esta diferencia entre ambas, se debe a la presencia de mayor humedad en esta última. En cambio, la pila con menor cantidad de difusores presenta signo de pudrición, esto es, una gran contenido humedad, mal olor y color verdoso.
- Existen grandes diferencias entre los valores de las constantes de reacción. En el caso de la pila sometida a volteo el valor de K_d es 0,0686, en la pila con mayores aireadores el valor es de 0,0485 y en la pila con menor cantidad es de 0,028, esto se explica por las diferentes condiciones de aireación a las que encontraban expuestas las pilas.
- En esta investigación se obtuvieron mejores resultados en la pila mediante volteo. Pero se debe destacar los buenos resultados obtenidos en la pila estática con difusores cada 10 cm, donde a diferencia del compostaje mediante volteo, no se necesita mano de obra para llevar a cabo este proceso. El compostaje estático con aireación pasiva, se aproxima al compostaje por volteo, en la medida que se aumente la cantidad de difusores de aire.

BIBLIOGRAFIA

- ABARRA TALDEA. “Manual Práctico de Técnicas De Compostaje”. Vitoria-Gasteiz, España, 2005. [online]. Sitio Web: <http://www.abarrataldea.org/manual.htm> <junio 2008>
- AHUMADA, CARLOS. “Evaluación de los Efectos de la Pluviométrica en las Pilas de Compostaje”, Proyecto de Título de Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío. 2005.
- CISTERNA, PEDRO. “Gestión de Residuos Sólidos”. Apunte de clase, 2008.
- CONSORCIO ONDEO DEGRÉMONT. “Diseño. Construcción, Montaje y Operación Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas del Gran Concepción VIII Región”, Santiago, Noviembre 2001.
- CORNELL STATE UNIVERSITY. “The Science and Engineering of Composting”, USA 2004. [online]. Sitio Web: <http://compost.css.cornell.edu> <abril 2008>
- LABBÉ, PEDRO. “Acondicionamiento de Residuos Sólidos Mediante Compostaje”, Proyecto de Título de Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío. 2003.
- MADRID F., LOPEZ R., CABRERA F., “Caracterización de los compost de residuos sólidos urbanos de la planta de Villarasa (Huelva)”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Murcia, España 2001.

- METCALF & EDDY. "Ingeniería de Aguas Residuales, tratamiento, vertido y reutilización", Vol. I y II, Editorial McGraw-Hill, 1995.
- MONTEAGUDO, JOSÉ MARÍA. "COMPOSTAJE". Apuntes de clases de Diseño de Procesos en Ingeniería Ambiental, *Especialidad Técnicas Energéticas, Universidad de Castilla-La Mancha, España 2008*. [online].
 Sitio Web:
www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema8.pdf <mayo 2008>
- OBSERVATORIO GEODESICO TIGO. "Precipitación diaria del 28 de abril al 18 de agosto de 2008" [online]. Sitio Web:
http://www.tigo.cl/component/option,com_tigometeo/Itemid,274/lang,es_urs/pr/ <septiembre 2008>
- TCHOBANOGLIOUS GEORGE. "Gestión Integral de Residuos Sólidos", Vol. I y II, Editorial McGraw-Hill, 1998.
- TORRES LOZADA, PATRICIA, ESCOBAR, JUAN CARLOS, PEREZ VIDAL, ANDREA ET AL. "Influencia del material de enmienda en el compostaje de lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR". *Ing. Investig.* [online]. mayo/ago. 2005, vol.25, no.2, p.53-61. [online]. Sitio Web:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092005000200007&lng=es&nrm=iso. ISSN 0120-5609 <abril 2008>
- UNDA OPAZO, FRANCISCO."Ingeniería Sanitaria Aplicada a Saneamiento y Salud Pública", Editorial Limusa, 1998.

Proyecto de Título

ANEXOS

Anexo A. Métodos.

A continuación se describen los métodos utilizados para el control de la humedad, sólidos volátiles y minerales y pH.

A.1. Humedad interna de las pilas.

Para determinar la humedad de la mezcla en proceso de compostaje, el análisis que se emplea se basa en la evaporación del agua contenida en la muestra tomada en terreno, debido al sometimiento de ella a una temperatura de 105° C durante una cierta cantidad de tiempo. La diferencia porcentual entre el peso de la muestra húmeda y el peso de la muestra seca constituye el porcentaje de humedad de la mezcla.

Los equipos que se utilizaron para medir esta variable fueron:

- Horno de secado
- Balanza analítica
- Crisol o vaso de precipitado
- Pinzas
- Desecador
- Espátula

El procedimiento que se llevó a cabo fue el siguiente:

- Se secó el crisol o vaso de precipitado en el horno a 105° C durante 10 minutos, luego se sacaba con las pinzas y se colocaba en el desecador durante 15 minutos para posteriormente pesarlo en la balanza de precisión.
- Se extrajo una muestra del material que se está compostando de diferentes lugares de la pila, se mezclaron y separaron en cuatro partes iguales. Se selecciona una de las partes y se pesa un gramo de ella en el crisol.
- Registrar la masa del crisol con la muestra húmeda.
- Colocar el crisol con dicha muestra en el horno de secado a 105° C durante 60 minutos.

Proyecto de Título

- Se extrae la muestra seca del horno y dejarla en el desecador durante 15 minutos.
- Pesarse el crisol con la muestra seca.
- Calcular la sequedad y humedad de la muestra.

Para obtener el porcentaje de sequedad de la muestra se utiliza la ecuación (A.1):

$$\% \text{ Sequedad} = \left(\frac{M_{c+ms} - M_c}{M_{c+mh} - M_c} \right) \cdot 100 \quad \dots(A.1)$$

Donde:

M_{c+ms} : Masa del crisol con la muestra seca.

M_{c+mh} : Masa del crisol con muestra húmeda.

M_c : Masa del crisol.

Luego el porcentaje de humedad se determina con la ecuación (A.2):

$$\% \text{ Humedad} = (100 - \% \text{ Sequedad}) \quad \dots(A.2)$$

A.2. Determinación de sólidos volátiles y sólidos minerales.

Para determinar la reducción de materia orgánica (SV) a raíz del proceso de biodegradación, se procedió a calcinar una muestra seca a una temperatura de 550° C durante seis horas. El peso perdido se consideró como sólidos volátiles mientras que el peso restante, cenizas, corresponde a los sólidos minerales.

Los instrumentos utilizados fueron:

- Crisol
- Mufla
- Desecador
- Pinzas
- Balanza de precisión

Proyecto de Título

El procedimiento realizado fue el siguiente:

- Se midió en la balanza la masa del crisol con la muestra seca registrando su valor.
- Se coloca el crisol con la muestra seca en la mufla durante seis horas.
- Se extrae la muestra ya calcinada y se coloca en el desecador durante 30 minutos.
- Se mide la masa del crisol con la muestra calcinada.

Para obtener el porcentaje de sólidos volátiles y sólidos minerales se aplican las ecuaciones (A.3) y (A.4) respectivamente:

$$\% \text{ Sólidos Volátiles} = \left(\frac{M_{c+ms} - M_{c+mc}}{M_{c+ms} - M_c} \right) \cdot 100 \quad \dots(A.3)$$

Donde:

M_{c+ms} : Masa del crisol más masa de la muestra seca.

M_{c+mc} : Masa del crisol más masa de cenizas.

M_c : Masa del crisol.

$$\% \text{ Sólidos Minerales} = (100 - \% \text{ Sólidos Volátiles}) \cdot 100 \quad \dots(A.4)$$

En la figura N° A.1, se observa las muestras calcinadas.

Proyecto de Título



Fig. N° A.1: Muestras Calcinadas

A.3. Medición de pH.

El pH al igual que las variables antes destacadas también fue utilizado para ir evaluando la efectividad del proceso de biodegradación. Los equipos que se utilizaron fueron los siguientes:

- Papel para medir pH 0 a 14
- Embudo cónico
- Vaso de precipitado
- Balanza de precisión
- Papel filtro
- Matraz de Erlenmeyer
- Espátula

El procedimiento para medir el pH fue el que se describe a continuación:

- Se extrajo una muestra representativa de la pila de compostaje de 10 g y se le añadió 50 ml de agua destilada.
- Se agitó durante unos minutos en el matraz para luego vaciar la mezcla al embudo cónico en el cual se encuentra el papel filtro.

Proyecto de Título

- Una vez que la muestra ha sido filtrada se introduce el papel para medir pH de 0 a 14, en la solución resultante y se registra el valor de pH.

En la figura N° A.2, se observa el procedimiento llevado a cabo para medir el pH.



Fig. N° A.2: Medición de pH.

Proyecto de Título

Anexo B. Resultados.

A continuación se muestran las tablas de registro de datos de la investigación, para cada pila.

B.1. Compostaje mediante volteo (Pila N° 1).

B.1.1. Datos temperatura pila N° 1.

Día	Observaciones	T1	T2	T3	T amb	(T2+T3)/2
0		26	21	21	19	21
1		28	24	24	17	24
2	Volteo	16	14	14	14	14
4		16	15	15	16	15
7	Volteo	16	15	15	14	15
8		17	16	16	12	16
9		18	17	17	13	17
10	Volteo	19	17	17	14	17
11		18	15	16	13	15,5
14	Volteo	17	14	14	20	14
15		16	14	14	8	14
16		16	13	13	23	13
17	Volteo	16	14	14	14	14
18		16	15	14	12	14,5
21	Volteo	18	16	16	14	16
22		19	18	16	12	17
24	Volteo	20	17	16	14	16,5
25		19	17	16	13	16,5
28	Volteo	17	16	15	11	15,5
29		19	18	18	13	18
30		17	15	15	8	15
31		17	15	16	10	15,5
32		17	15	14	9	14,5
35	Volteo	16	14	15	8	14,5
36		16	14	14	10	14
37		15	13	14	13	13,5
38		16	13	13	12	13

Proyecto de Título

39		15	13	13	12	13
42	Volteo	15	13	12	10	12,5
43		15	12	12	11	12
44		14	12	12	12	12
45		14	12	11	12	11,5
46		13	12	11	12	11,5
49	Volteo	15	12	12	13	12
50		13	12	11	10	11,5
51		13	12	11	10	11,5
52		13	11	11	10	11
53		13	12	11	11	11,5
56	Volteo	13	13	12	12	12,5
57		13	12	13	12	12,5
58		14	12	12	13	12
59		14	12	12	12	12
60		13	12	12	11	12
63	Volteo	11	11	10	10	10,5
64		12	11	11	10	11
65		13	12	12	12	12
66		12	12	12	11	12
67		12	11	12	10	11,5
70	Volteo	11	11	10	10	10,5
71		12	11	11	11	11
72		14	13	14	13	13,5
73		12	10	10	10	10
74		11	11	11	11	11
77	Volteo	13	13	13	13	13
78		13	12	12	12	12
80		12	11	10	10	10,5
81		12	11	11	11	11
84	Volteo	10	10	10	10	10
85		11	10	10	10	10
86		11	10	10	10	10
87		12	11	11	12	11
88		12	11	11	11	11
91	Volteo	12	11	12	12	11,5
92		11	11	11	11	11

Proyecto de Título

93		12	11	11	10	11
94		12	11	11	12	11
95		12	10	10	10	10
98	Volteo	11	11	11	11	11
99		11	11	10	10	10,5
100		12	11	11	12	11
101		11	10	11	11	10,5
102		12	11	11	12	11
105	Volteo	12	12	12	12	12
106		13	12	12	13	12
107		13	12	12	13	12
108		12	11	11	10	11
112	Volteo	12	12	12	12	12

B.1.2. Datos de laboratorio pila N° 1.

Día	Mc+mh	Mc+ms	Mc	Mc+mc	%S	%H	SSV	SSM	Ph
0	26,9977	26,173	25,8184	25,909	30,07	69,93	74,45	25,55	7
2	26,9413	26,2212	25,8184	25,943	35,87	64,13	69,07	30,93	7
7	26,8225	26,1802	25,8192	25,943	35,98	64,02	65,72	34,28	7
14	27,0222	26,2983	25,8177	25,9987	39,90	60,10	62,34	37,66	6
18	26,7829	26,1977	25,8167	25,9652	39,43	60,57	61,02	38,98	7
21	26,8461	26,2257	25,818	25,9777	39,66	60,34	60,83	39,17	6
25	27,1781	26,4096	25,8185	26,0529	43,48	56,52	60,35	39,65	7
50	27,2416	26,4647	25,8172	26,0774	45,46	54,54	59,81	40,19	7
57	27,2518	26,4658	25,8172	26,0779	45,21	54,79	59,81	40,19	7
64	27,2501	26,4648	25,812	26,0744	45,39	54,61	59,80	40,20	7
70	27,2401	26,4642	25,8172	26,0773	45,47	54,53	59,80	40,20	7
78	27,2193	26,4549	25,8174	26,074	45,47	54,53	59,75	40,25	7
85	27,2407	26,4639	25,8172	26,078	45,43	54,57	59,67	40,33	7
91	27,6312	26,642	25,8172	26,1512	45,47	54,53	59,51	40,49	7
98	26,7523	26,242	25,8172	25,9895	45,43	54,57	59,44	40,56	7
112	27,0212	26,3649	25,8174	26,0394	45,48	54,52	59,45	40,55	7

Proyecto de Título

B.1.3. Determinación constante endógena pila N° 1.

Día	SSV	SSM	SSV b	SSV nb	SSVb/SSV bo	ln(SSVb/SSVbo)
0	74,45	25,55	15,00	59,45	1	0
2	69,07	30,93	9,61	59,45	0,6410495	0,444648606
7	65,72	34,28	6,27	59,45	0,4178646	0,872597906
14	62,34	37,66	2,89	59,45	0,1924712	1,647808869
18	61,02	38,98	1,57	59,45	0,1047849	2,255845475
21	60,83	39,17	1,38	59,45	0,0918111	2,388021672
25	60,35	39,65	0,89	59,45	0,0595455	2,821015347
50	59,81	40,19	0,36	59,45	0,0241776	3,722326889
57	59,81	40,19	0,35	59,45	0,0235818	
64	59,80	40,20	0,35	59,45	0,0234609	
70	59,80	40,20	0,35	59,45	0,0231376	
78	59,75	40,25	0,30	59,45	0,0198003	
85	59,67	40,33	0,22	59,45	0,0146771	
91	59,51	40,49	0,05	59,45	0,0035525	
98	59,44	40,56	-0,01	59,45	-0,000821	
112	59,45	40,55	0,00	59,45	0	

Proyecto de Título

B.2. Compostaje estático con aireación pasiva con difusores cada 10 cm (Pila N° 2).

B.2.1. Datos temperatura pila N° 2.

Día	T1	T2	T3	T amb	(T2+T3)/2
0	21	18	21	19	19,25
1	24	22	22	17	21,85
2	12	12	12	14	12
4	14	13	12	16	12,5
7	14	12	12	14	12
8	14	13	13	12	13
9	15	15	14	13	14,5
10	16	16	15	14	15,5
11	15	13	14	13	13,5
14	14	16	13	20	14,5
15	14	12	12	8	12
16	12	12	12	23	12
17	12	11	12	14	11,5
18	14	13	13	12	13,4
21	14	14	13	14	13,45
22	15	14	14	12	14,1
24	15	14	15	14	14,55
25	16	15	15	13	14,95
28	15	15	15	11	14,75
29	15	15	15	13	14,75
30	14	13	14	8	13,5
31	14	14	14	10	14
32	14	13	13	9	13
35	13	12	13	8	12,5
36	13	13	13	10	13
37	13	13	12	13	12,5
38	12	12	12	12	12
39	12	12	12	12	12
42	13	13	12	10	12,5
43	13	13	13	11	13
44	12	12	13	12	12,5

Proyecto de Título

45	12	12	12	12	12
46	12	12	12	12	12
49	13	13	13	13	13
50	12	12	12	10	12
51	12	11	12	10	11,5
52	11	11	11	10	11
53	11	11	11	11	11
56	12	11	12	12	11,5
57	13	12	12	12	12
58	13	13	13	13	13
59	13	12	13	12	12,5
60	12	12	12	11	12
63	11	11	10	10	10,5
64	11	11	11	10	11
65	12	12	12	12	12
66	12	11	12	11	11,5
67	11	11	11	10	11
70	11	10	11	10	10,5
71	11	11	11	11	11
72	13	12	13	13	12,5
73	11	10	10	10	10
74	11	11	11	11	11
77	12	12	13	13	12,5
78	12	12	12	12	12
80	11	11	10	10	10,5
81	11	11	11	11	11
84	11	10	11	10	10,5
85	11	10	10	10	10
86	10	10	10	10	10
87	12	11	12	12	11,5
88	11	11	11	11	11
91	12	12	12	12	12
92	12	11	11	11	11
93	11	10	11	10	10,5
94	12	11	12	12	11,5
95	11	11	10	10	10,5
98	11	11	11	11	11

Proyecto de Título

99	11	11	11	10	11
100	12	11	12	12	11,5
101	12	11	11	11	11
102	12	11	12	12	11,5
105	12	12	11	12	11,5
106	12	12	13	13	12,5
107	13	12	13	13	12,5
108	11	10	11	10	10,5
112	12	11	11	12	11

B.2.2. Datos de laboratorio pila N° 2.

Día	Mc+mh	Mc+ms	Mc	Mc+mc	%S	%H	SSV	SSM	Ph
0	29,3022	28,5592	28,2436	28,3241	29,81	70,19	74,5	25,5	7
2	29,3292	28,5826	28,2438	28,3425	31,21	68,79	70,87	29,13	7
7	29,2628	28,5696	28,2438	28,3431	31,97	68,03	69,52	30,48	7
14	29,4701	28,6723	28,243	28,381	34,98	65,02	67,85	32,15	7
18	29,2945	28,6117	28,2431	28,3606	35,06	64,94	68,12	31,88	7
21	29,5811	28,7218	28,243	28,3964	35,78	64,22	67,96	32,04	6
25	29,3072	28,6261	28,2441	28,3711	35,93	64,07	66,76	33,24	7
50	29,5504	28,785	28,2432	28,4306	41,45	58,55	65,41	34,59	7
57	29,3811	28,7098	28,2432	28,4063	41,01	58,99	65,05	34,95	7
64	29,4262	28,7198	28,2432	28,411	40,29	59,71	64,79	35,21	7
70	29,3404	28,685	28,2432	28,3984	40,27	59,73	64,87	35,13	7
78	27,2411	26,6414	26,2361	26,3787	40,33	59,67	64,82	35,18	7
85	29,1872	28,6261	28,2441	28,379	40,5	59,5	64,68	35,32	7
91	29,3162	28,6723	28,243	28,3944	40	60	64,72	35,28	7
98	27,2712	26,6514	26,2361	26,3828	40,12	59,88	64,68	35,32	7
112	29,2538	28,6492	28,2436	28,3868	40,15	59,85	64,7	35,3	7

Proyecto de Título

B.2.3. Determinación constante endógena pila N° 2.

Día	SSV	SSM	SSV b	SSV nb	SSVb/SSVbo	ln(SSVb/SSVbo)
0	74,504701	25,495299	9,80	64,70	1	0
2	70,874499	29,125501	6,17	64,70	0,6297111	0,462494131
7	69,519199	30,480801	4,82	64,70	0,4914674	0,710359655
14	67,845101	32,154899	3,14	64,70	0,3207056	1,137231753
18	68,120001	31,879999	3,42	64,70	0,348746	1,053411374
21	67,964	32,036	3,26	64,70	0,3328336	1,100112745
25	66,755999	33,244001	2,06	64,70	0,2096147	1,562484221
50	65,411591	34,588409	0,71	64,70	0,072482	2,624416933
57	65,045799	34,954201	0,34	64,70	0,0351704	3,34755081
64	64,785399	35,214601	0,08	64,70	0,008609	
70	64,873999	35,126001	0,17	64,70	0,0176464	
78	64,823999	35,176001	0,12	64,70	0,0125463	
85	64,677999	35,322001	-0,02	64,70	-0,002346	
91	64,7245	35,2755	0,02	64,70	0,0023972	
98	64,683999	35,316001	-0,02	64,70	-0,001734	
112	64,700999	35,299001	0,00	64,70	0	

Proyecto de Título

B.3. Compostaje estático con aireación pasiva con difusores cada 20 cm (Pila N° 3).

B.3.1. Datos temperatura pila N° 3.

Día	T1	T2	T3	T amb	(T2+T3)/2
0	20	19	19	19	18,65
1	22	20	21	17	20,5
2	13	12	12	14	12
4	13	12	12	16	12
7	14	13	13	14	13
8	14	13	13	12	13
9	15	14	14	13	14
10	15	14	14	14	14
11	14	13	13	13	13
14	12	12	12	20	12
15	11	11	11	8	11
16	11	11	10	23	10,5
17	11	11	10	14	10,5
18	13	12	11	12	11,55
21	13	13	13	14	13,2
22	14	13	13	12	13
24	15	13	13	14	13,05
25	15	15	15	13	14,5
28	15	14	14	11	14,35
29	14	14	14	13	14
30	13	12	13	8	12,5
31	13	12	13	10	12,5
32	13	13	12	9	12,5
35	12	12	12	8	12
36	12	11	12	10	11,5
37	13	12	12	13	12
38	12	11	11	12	11
39	11	11	11	12	11
42	12	12	11	10	11,5
43	11	12	11	11	11,5
44	12	11	12	12	11,5

Proyecto de Título

45	11	11	11	12	11
46	11	11	11	12	11
49	12	11	12	13	11,5
50	11	11	10	10	10,5
51	11	11	11	10	11
52	11	10	11	10	10,5
53	11	11	10	11	10,5
56	11	10	10	12	10
57	10	10	10	12	10
58	11	11	11	13	11
59	11	11	10	12	10,5
60	11	10	10	11	10
63	10	10	10	10	10
64	10	10	10	10	10
65	11	10	11	12	10,5
66	11	11	10	11	10,5
67	10	10	9	10	9,5
70	10	9	9	10	9
71	10	10	10	11	10
72	11	11	11	13	11
73	11	10	11	10	10,5
74	11	10	10	11	10
77	12	11	12	13	11,5
78	12	11	11	12	11
80	10	10	10	10	10
81	10	10	10	11	10
84	10	9	10	10	9,5
85	10	10	9	10	9,5
86	10	10	10	10	10
87	11	10	11	12	10,5
88	11	11	11	11	11
91	11	11	11	12	11
92	10	10	10	11	10
93	10	10	10	10	10
94	10	10	10	12	10
95	10	10	10	10	10
98	10	10	11	11	10,5

Proyecto de Título

99	9	10	10	10	10
100	10	10	11	12	10,5
101	11	11	11	11	11
102	10	11	11	12	11
105	11	11	11	12	11
106	11	11	11	13	11
107	12	11	11	13	11
108	10	11	10	10	10,5
112	10	10	10	12	10

B.3.2. Datos de laboratorio pila N° 3.

Día	Mc+mh	Mc+ms	Mc	Mc+mc	%S	%H	SSV	SSM	Ph
0	27,5089	26,6187	26,2379	26,3353	29,96	70,04	74,42	25,58	7
2	27,3427	26,6148	26,2377	26,3432	34,12	65,88	72,02	27,98	7
7	27,4145	26,6602	26,2389	26,3574	35,83	64,17	71,87	28,13	7
14	27,1302	26,556	26,2362	26,3285	35,77	64,23	71,13	28,87	7
18	27,1534	26,5648	26,2373	26,3331	35,75	64,25	70,75	29,25	7
21	27,3241	26,6258	26,2381	26,3523	35,7	64,3	70,55	29,45	6
25	27,3977	26,6449	26,2378	26,3565	35,1	64,9	70,85	29,15	7
50	27,3015	26,6038	26,2374	26,3489	34,43	65,57	69,57	30,43	7
57	27,3901	26,6354	26,2374	26,3579	34,53	65,47	69,72	30,28	7
64	27,3401	26,6148	26,2377	26,3533	34,2	65,8	69,34	30,66	7
70	27,3476	26,6199	26,2379	26,3563	34,42	65,58	69,01	30,99	7
78	26,9574	26,2072	25,8155	25,937	34,3	65,7	68,98	31,02	7
85	27,2296	26,5769	26,2373	26,3422	34,22	65,78	69,12	30,88	6
91	27,3168	26,6054	26,2374	26,3519	34,09	65,91	68,88	31,12	6
98	27,4323	26,6459	26,2374	26,3652	34,19	65,81	68,72	31,28	5
112	27,4621	26,6558	26,2381	26,3689	34,13	65,87	68,69	31,31	5

Proyecto de Título

B.3.3. Determinación constante endógena pila N° 3.

Día	SSV	SSM	SSV b	SSV nb	SSVb/SSVbo	ln(SSVb/SSVbo)
0	74,416501	25,583499	5,73	68,69	1	0
2	72,0158	27,9842	3,33	68,69	0,581091	0,542847891
7	71,874501	28,125499	3,19	68,69	0,5564351	0,586204703
14	71,1254	28,8746	2,44	68,69	0,4257212	0,853970713
18	70,7458	29,2542	2,06	68,69	0,3594831	1,023088214
21	70,5479	29,4521	1,86	68,69	0,3249506	1,124082069
25	70,847501	29,152499	2,16	68,69	0,3772293	0,974901992
50	69,568777	30,431223	0,88	68,69	0,1540991	1,870159127
57	69,723618	30,276382	1,04	68,69	0,181118	1,708606539
64	69,342578	30,657422	0,66	68,69	0,1146286	2,166058161
70	69,0125	30,9875	0,33	68,69	0,0570318	2,864145558
78	68,977999	31,022001	0,29	68,69	0,0510116	
85	69,124001	30,875999	0,44	68,69	0,0764881	
91	68,879	31,121	0,19	68,69	0,0337368	
98	68,722999	31,277001	0,04	68,69	0,0065155	
112	68,68566	31,31434	0,00	68,69	0	

Anexo C. Tabla de datos de precipitación diaria.

Estos datos fueron obtenidos de observatorio geodésico TIGO.

Epoche	Precipitations
28/04/2008 0:00	0.0
29/04/2008 0:00	0.0
30/04/2008 0:00	0.3
01/05/2008 0:00	0.0
02/05/2008 0:00	0.0
03/05/2008 0:00	0.0
04/05/2008 0:00	0.1
05/05/2008 0:00	0.1
06/05/2008 0:00	0.0
07/05/2008 0:00	0.0

Proyecto de Titulo

08/05/2008 0:00	0.0
09/05/2008 0:00	3.0
10/05/2008 0:00	0.0
11/05/2008 0:00	0.0
12/05/2008 0:00	0.0
13/05/2008 0:00	0.1
14/05/2008 0:00	0.3
15/05/2008 0:00	0.0
16/05/2008 0:00	0.0
17/05/2008 0:00	22.5
18/05/2008 0:00	88.6
19/05/2008 0:00	102.8
20/05/2008 0:00	52.1
21/05/2008 0:00	20.2
22/05/2008 0:00	28.1
23/05/2008 0:00	1.2
24/05/2008 0:00	0.0
25/05/2008 0:00	26.4
26/05/2008 0:00	67.0
27/05/2008 0:00	0.2
28/05/2008 0:00	0.0
29/05/2008 0:00	0.0
30/05/2008 0:00	0.0
31/05/2008 0:00	0.0
01/06/2008 0:00	0.0
02/06/2008 0:00	0.1
03/06/2008 0:00	39.9
04/06/2008 0:00	16.9
05/06/2008 0:00	0.5
06/06/2008 0:00	4.1
07/06/2008 0:00	2.8
08/06/2008 0:00	1.0
09/06/2008 0:00	0.0
10/06/2008 0:00	13.7
11/06/2008 0:00	0.8
12/06/2008 0:00	0.0

Proyecto de Título

13/06/2008 0:00	0.0
14/06/2008 0:00	0.0
15/06/2008 0:00	0.0
16/06/2008 0:00	0.0
17/06/2008 0:00	0.0
18/06/2008 0:00	6.6
19/06/2008 0:00	7.8
20/06/2008 0:00	1.8
21/06/2008 0:00	0.6
22/06/2008 0:00	2.6
23/06/2008 0:00	0.0
24/06/2008 0:00	0.0
25/06/2008 0:00	0.0
26/06/2008 0:00	0.0
27/06/2008 0:00	0.5
28/06/2008 0:00	0.0
29/06/2008 0:00	0.1
30/06/2008 0:00	16.3
01/07/2008 0:00	0.2
02/07/2008 0:00	0.2
03/07/2008 0:00	0.0
04/07/2008 0:00	28.6
05/07/2008 0:00	53.3
06/07/2008 0:00	8.1
07/07/2008 0:00	0.2
08/07/2008 0:00	0.0
09/07/2008 0:00	0.7
10/07/2008 0:00	30.1
11/07/2008 0:00	4.3
12/07/2008 0:00	33.6
13/07/2008 0:00	1.6
14/07/2008 0:00	0.0
15/07/2008 0:00	0.2
16/07/2008 0:00	44.4
17/07/2008 0:00	5.8
18/07/2008 0:00	0.0

Proyecto de Título

19/07/2008 0:00	0.0
20/07/2008 0:00	5.2
21/07/2008 0:00	3.3
22/07/2008 0:00	18.9
23/07/2008 0:00	3.4
24/07/2008 0:00	2.9
25/07/2008 0:00	12.5
26/07/2008 0:00	0.0
27/07/2008 0:00	32.8
28/07/2008 0:00	0.1
29/07/2008 0:00	0.0
30/07/2008 0:00	26.3
31/07/2008 0:00	35.6
01/08/2008 0:00	16.6
02/08/2008 0:00	9.1
03/08/2008 0:00	3.1
04/08/2008 0:00	19.1
05/08/2008 0:00	7.3
06/08/2008 0:00	2.1
07/08/2008 0:00	0.7
08/08/2008 0:00	0.3
09/08/2008 0:00	0.2
10/08/2008 0:00	0.3
11/08/2008 0:00	0.2
12/08/2008 0:00	0.2
13/08/2008 0:00	0.2
14/08/2008 0:00	0.2
15/08/2008 0:00	0.3
16/08/2008 0:00	0.2
17/08/2008 0:00	6.2
18/08/2008 0:00	1.6