

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**“Evaluación de la biodegradación de residuos sólidos ganaderos tratados mediante pilas de compostaje”**

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

**Jorge Chaparro Urrutia**

**Prof. Guía: Pedro Cisterna O.**

Concepción, Diciembre de 2013

## RESUMEN

Debido a la acumulación de grandes volúmenes de residuos sólidos producidos por las actividades ganaderas, se hace necesaria la existencia de tratamientos para estos residuos, uno de ellos es el proceso de compostaje que se presenta como una tecnología ecológica y ambientalmente sustentable que permite mantener la materia orgánica dentro del ciclo natural. El compostaje de residuos ganaderos es un proceso con alto grado de eficiencia y de bajo costo, en el cual la materia orgánica es biodegradada por microorganismos, obteniéndose un producto estabilizado que puede ser usado como fertilizante o enmienda orgánica para suelos, todas las ventajas presentadas por el compostaje hacen de gran importancia el estudio y la investigación de alternativas de manejo que mejoren la eficiencia del proceso.

Esta tesis tiene por objetivo evaluar y comparar la biodegradación de residuos sólidos ganaderos, tratados mediante pilas de compostaje con distintas condiciones de aireación y mezcla.

La investigación se realizó mediante el estudio de tres pilas instaladas bajo techo, en todas ellas se utilizó la misma mezcla usando como materia prima estiércol de bovino y como material estructurante viruta de madera, se tiene una pila con aireación por volteo manual, una pila de aireación pasiva con difusores cada 10 centímetros y una pila de aireación pasiva con difusores cada 10 centímetros que incorpora un mezclador mecánico de eje vertical, durante la investigación se monitoreó diariamente la temperatura interna de las pilas y otros parámetros como pH, humedad, sólidos volátiles y minerales se evaluaron cada tres días.

El estudio determinó que el sistema de aireación por volteo manual (41.3%) y el equipo de aireación por mezcla mecánica (39.1%) lograron los niveles de biodegradabilidad más altos y se consideraron similares al no presentaron diferencias significativas, en cambio el sistema de aireación por difusores (30.1%) mostró un menor biodegradación de los residuos.

**Palabras Claves:** Residuos ganaderos, Biodegradación, Compostaje, Sistema de aireación.

**Número de Palabras:** 5914 + 16\*250 = 9914

## ABSTRACT

Due to the accumulation of large volumes of solid waste produced by livestock activities, it is necessary to find treatments for these residues, one of them is the composting process which is presented as an ecological and environmentally sustainable technology and keeps material organic within the natural cycle. The composting of livestock waste is a process with high efficiency and low cost, in which the organic matter is biodegraded by microorganisms, resulting in a stabilized product that can be used as fertilizer or organic amendment for soil, all these advantages make it an important study and research management alternatives that improve process efficiency.

This thesis aims to evaluate and compare the biodegradation of solid livestock waste treated by piles of composting with different conditions of aeration and mixing.

The research was conducted by studying three piles installed indoors, in all the piles the same mixture was used using cattle manure feedstock and as material structuring wood shavings, was built a stack aerated by manual tumbling, a pile of passive aeration with diffusers each 10 centimeters and a pile of passive aeration with diffusers each 10 centimeters incorporating a mechanical mixer, during the investigation was monitored internal temperature every day and other parameters such as pH, moisture, the volatile solids and minerals were evaluated every three days.

The study found the aeration system by manual tumbling (41.3 %) and aeration equipment with mechanical mixing (39.1 %) achieved the highest levels of biodegradability and were found to be similar by not having significant differences, however, the aeration system with diffusers (30.1%) showed a less biodegradation of the waste.

**Keywords:** Livestock waste, biodegradation, composting, aeration system.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	5
<b>1.1 Objetivos</b> .....	7
1.1.1 <i>Objetivo general.</i> .....	7
1.1.2 <i>Objetivos específicos.</i> .....	7
<b>1.2 Alcances</b> .....	7
<b>1.3 Revisión bibliográfica</b> .....	8
1.3.1 <i>El proceso de Compostaje.</i> .....	8
1.3.2 <i>Factores que afectan el proceso de compostaje</i> .....	9
<b>CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	11
<b>2.1 Emplazamiento de la investigación</b> .....	11
<b>2.2 Caracterización de los residuos a compostar</b> .....	11
2.2.1 <i>Materia prima</i> .....	11
2.2.2 <i>Material estructurante</i> .....	12
2.2.3 <i>Mezcla</i> .....	12
<b>2.3 Diseño e implementación de las pilas a compostar</b> .....	13
2.3.1 <i>Compostaje mediante volteo (Pila N° 1).</i> .....	13
2.3.2 <i>Compostaje con aireación pasiva (Pila N° 2).</i> .....	14
2.3.3 <i>Compostaje con mezclador mecánico (Pila N° 3).</i> .....	15
<b>2.4 Variables y frecuencia de medición</b> .....	17
2.4.1 <i>Temperatura</i> .....	17
2.4.2 <i>pH</i> .....	18
2.4.3 <i>Humedad</i> .....	18
2.4.4 <i>Sólidos volátiles y minerales</i> .....	18
<b>2.5 Metodología de análisis</b> .....	19
<b>CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	20
<b>3.1 Análisis Comparativo en las Pilas de Compostaje</b> .....	20

3.1.1 Comparación de la Temperatura.....	20
3.1.2 Comparación del pH .....	22
3.1.3 Comparación de la Humedad .....	23
3.1.4 Comparación de los Sólidos volátiles.....	24
3.1.5 Comparación de los Sólidos minerales .....	25
3.1.6 Análisis comparativo de Biodegradabilidad y Constante Endógena .....	26
<b>3.2 Análisis visual de las muestras .....</b>	<b>28</b>
<b>CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>30</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>31</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>33</b>
ANEXO A. DISEÑO DE LAS PILAS.....	33
ANEXO B. ELEMENTOS DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL PROCESO .....	37
ANEXO C. TABLAS DE REGISTRO DE LA INVESTIGACIÓN .....	40

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

La situación actual de nuestra sociedad nos obliga a controlar cada vez más la generación y gestión de desechos producidos por diversas actividades humanas, la transformación de estos residuos debe ser realizada en forma eficiente y ambientalmente sustentable.

Una de las actividades que ha intensificado su producción es el sector ganadero, en las últimas décadas ha provocado también un aumento en la generación de residuos generando cambios en los balances ecológicos ya existentes en la naturaleza, el medio ambiente hoy en día no es capaz de soportar la descarga de los residuos provenientes de esta actividad sin un manejo adecuado.

La inadecuada gestión de estos residuos puede plantear serios problemas sanitarios, tanto para los animales y personas que trabajan en la explotación, como medioambientales debido a la aparición de olores procedentes de sustancias amoniacales y sulfhídricas, aparición de plagas de insectos y roedores, presencia de determinadas bacterias, contaminación de suelos y cauces de aguas tanto superficiales como subterráneas producto de nitratos, nitritos y fósforo excedente.

El tratamiento de los residuos ganaderos cada día tiene mayor importancia debido a la problemática ambiental asociada a los volúmenes generados, los olores molestos que emanan, la aparición de vectores, y por sobre todo a que pueden contener compuestos nocivos para la salud animal y humana (Rodríguez, 2002), una de las alternativas económicamente viable y ambientalmente segura para el tratamiento y estabilización de los desechos ganaderos es el proceso de compostaje.

Los principales residuos ganaderos corresponden a estiércoles y purines, generados por la explotación de diversos tipos de animales (ganado vacuno, porcino y aves), sus características y producción están en función de la especie, raza, alimentación del ganado y época del año en que se genera, las cantidades de desechos que se producen van a depender del tipo de explotación, de modo general en la tabla 1 se presentan valores medios de producción de materia fresca según el animal explotado.

**Tabla 1: Producción de residuos frescos de explotaciones ganaderas.**

<b>Tipo de ganado</b>	<b>Kg. heces/día</b>
Vacuno	30-50
Equino	20-50
Porcino	4-8
Ovino	4-8
Aves	0.1-0.5

**Fuente:** Navarro y otros (1995)

El estiércol bovino esta formado por excrementos sólidos y líquidos de los animales, mezclados con los residuos que se han utilizado como cama, alimento y otros desperdicios, el estiércol vacuno esta compuesto principalmente por una fracción orgánica, fuente de energía, y una fracción mineral que es fuente de elementos inorgánicos, entre los que se encuentran todos los macro y micronutrientes necesarios para la vida de las plantas (N, P, K entre otros).

El compostaje es una tecnología simple, de bajo costo y sustentable ecológicamente, consiste en la degradación bioquímica de una mezcla de residuos orgánicos, con un material de soporte, en condiciones controladas de temperatura, humedad, pH y aireación, durante el proceso la materia orgánica sufre una degradación biológica por microorganismos facultativos, generando un producto estable llamado compost, este producto se puede utilizar como enmienda orgánica en el suelo, con el fin de mejorar la estructura del suelo, eliminar patógenos y aumentar el crecimiento de las plantas.

El proceso de compostaje genera beneficios ecológicos, económicos y sociales, es importante también mencionar que si los desechos ganaderos no se tratan adecuadamente podrían contaminar el suelo, los causes de agua y perderían gran parte de su potencial como fertilizante.

## **1.1 Objetivos**

### *1.1.1 Objetivo general.*

Evaluar la biodegradación de los residuos sólidos ganaderos, tratados mediante pilas de compostaje sometidas a distintas condiciones de aireación y mezcla.

### *1.1.2 Objetivos específicos.*

- Incorporar un mezclador mecánico al sistema de compostaje con aireación pasiva.
- Estudiar el comportamiento térmico y la humedad de tres pilas de degradación aeróbica.
- Evaluar el nivel de biodegradación de la fracción orgánica de los desechos.
- Comparar el proceso de compostaje bajo distintas condiciones de aireación y mezcla de los residuos.

## **1.2 Alcances**

El presente proyecto de título tiene por objetivo evaluar y comparar la biodegradación de los residuos sólidos ganaderos mediante el proceso de compostaje, en tres pilas de degradación aeróbica las que poseen distintas condiciones de aireación y mezcla, con la finalidad de buscar sistemas de aireación más eficientes y de bajo costo para el tratamiento de residuos sólidos ganaderos. En primer lugar se implementó un sistema de compostaje de aireación pasiva con mezcla mecánica probado exitosamente en el tratamiento de residuos domiciliarios, también se creó una pila con sistema de aireación por difusores y una pila con volteo manual, esta última se usó como medio de comparación para los otros sistemas, debido a su alto grado de eficiencia en la biodegradación.

### 1.3 Revisión bibliográfica

El compostaje es una técnica que se ha practicado desde hace miles de años, los agricultores de diferentes culturas desde la antigüedad han reunido los desperdicios orgánicos para transformarlos en abono para sus tierras, imitando el proceso de fermentación que ocurre normalmente en un suelo de un bosque, pero en forma acelerada y dirigida.

El desarrollo de la técnica de compostaje a gran escala tiene su origen en la India con las experiencias llevadas a cabo por el inglés Albert Howard desde 1905 a 1947, su experiencia consistió en combinar sus conocimientos científicos con los tradicionales de los campesinos, su método llamado “método Indore”, se basaba en fermentar una mezcla de desechos vegetales y excrementos animales periódicamente humedecidos (Rodale, 1946).

En la actualidad el proceso de compostaje se ha transformado en una herramienta eficiente para el aprovechamiento de residuos orgánicos de distintos orígenes, transformándose en una práctica utilizada en todo el mundo. El interés por estudiar e implementar esta técnica ha ido en aumentando debido a las nuevas tendencias ecológicas y a las elevadas cantidades de desechos generados producto del crecimiento demográfico y la industrialización.

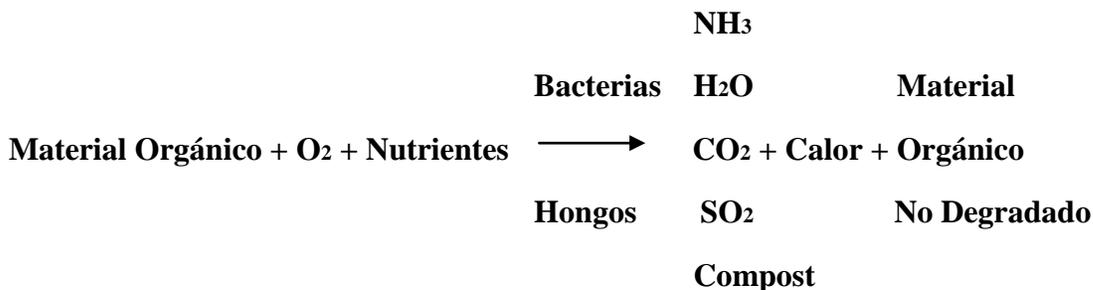
#### *1.3.1 El proceso de Compostaje.*

El compostaje es un proceso de degradación biológica en condiciones aeróbicas donde los microorganismos transforman los compuestos orgánicos mediante reacciones metabólicas, en las que se separan los electrones de los compuestos y se oxidan las estructuras de carbono a dióxido de carbono y agua. Nunca se produce una oxidación completa debido a que una parte del material orgánico se transforma y otra no es biodegradable (Eweis, 1999).

Los nuevos materiales formados poseen unas propiedades distintas a las de los materiales originales, confiriéndole a la masa unas características físicas y químicas distintas, la velocidad de transformación de materia orgánica depende de su naturaleza física y química de los microorganismos que intervienen y de las condiciones físico-químicas del proceso (Haug, 1993).

El proceso de biodegradación aeróbica se puede describir mediante la ecuación 1, que se presenta a continuación.

**Ec. (1)** Ecuación del proceso de Compostaje



El proceso de compostaje ocurre en fases distintas de acuerdo a los cambios de temperatura interna de los residuos, la fase mesófila (10-40°C) es la primera, en ellas se produce gran actividad de bacterias mesófilicas quienes utilizan gran parte del carbono como fuente de energía expulsando CO<sub>2</sub> y generando calor, debido a que las reacciones metabólicas son de naturaleza exotérmica, la generación de calor incrementa la temperatura lo que da paso a la fase termófila (40-60°C), donde la materia orgánica alcanza su bioestabilización a través de reacciones bioquímicas de oxidación llevadas a cabo por organismos de naturaleza termofílicas. En la última etapa del proceso comienza el enfriamiento y finalmente la fase denominada de maduración, en ella la temperatura disminuye a temperatura ambiente actuando mohos y actinomicetes que contribuyen a la estabilidad del compost (Tchobanoglous, 1998).

### *1.3.2 Factores que afectan el proceso de compostaje*

La humedad y la aireación son los dos factores operacionales de mayor importancia en el proceso de compostaje, los microorganismos necesitan agua y oxígeno para el correcto desarrollo del proceso.

El control de humedad es un factor que condiciona el desarrollo del compostaje ya que incide en el crecimiento bacteriano, debido a que los microorganismos requieren agua para cumplir con sus necesidades fisiológicas y no pueden sobrevivir en ausencia de ésta. Los valores mínimos en los que tiene lugar la actividad biológica se sitúa entre 12 y 14%, mientras que el rango razonable para mantener las condiciones aeróbicas esta entre el 40 y 70% de humedad, siempre que se pueda mantener una buena aireación en el proceso de compostaje (OPS, 1999).

La aireación es una variable de operación muy importante para el correcto desarrollo del compostaje es necesario asegurar la presencia de oxígeno, es esencial para el metabolismo y la respiración de los microorganismos aerobios y para oxidar las moléculas orgánicas presentes en los residuos. El oxígeno debe mantenerse en niveles adecuados mayor al 5%, teniendo en cuenta además que las necesidades de oxígeno varían a lo largo del proceso. La concentración óptima en el interior de las pilas de degradación biológica esta comprendida entre el 15 y 20% del volumen de los residuos.

La aireación tiene varios objetivos, mezclar los materiales, soltarlos (evitar compactación), controlar la humedad, crear nuevas superficies de ataque para los microorganismos, aportar el oxígeno suficiente a los microorganismos y permitir al máximo la evacuación del dióxido de carbono producido.

El aire en los sistemas de compost puede ser suministrado por distintas formas, por medio de volteos periódicos del material, también existen sistemas de tuberías con aireación pasiva o forzada, el método usado depende de la tecnología de compostaje seleccionada de acuerdo a los objetivos del productor. Actualmente se han desarrollado varias técnicas para airear los residuos en transformación, pero hasta ahora el método de las pilas con volteos intermitentes de los residuos sigue siendo uno de los métodos mas eficaces (Pérez, 2008).

## **CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS**

En este capítulo se realizará una descripción de las etapas en que se desarrolla el proceso experimental, los materiales usados para la experiencia y la planificación adoptada en conformidad con los objetivos del proyecto.

Para llevar a cabo este estudio se construyeron tres pilas de compostaje con residuos ganaderos, cada una con distintas condiciones de aireación y mezcla durante el proceso, que se desarrollo por 90 días, entre los meses de Julio y Octubre del 2012.

Para controlar la biodegradación del proceso se monitorearon distintos parámetros durante la etapa experimental; temperatura, pH, humedad, sólidos suspendidos volátiles y minerales, se realizó toma de muestras in situ en forma periódica, posteriormente estas eran trasladadas y analizadas en el Laboratorio de Mecánica de suelos de la Universidad del Bio-Bío, Campus Concepción.

### **2.1 Emplazamiento de la investigación**

La experimentación se realizó en un galpón particular, ubicado al sur de la ciudad de Cañete, provincia de Arauco, región del Bio-Bío. Los ensayos se realizaron bajo techo ya que el exceso de agua por precipitaciones ocasiona una disminución de la temperatura y de la actividad microbológica por la carencia de oxígeno en la pila (Ahumada, 2005).

Previo a la construcción de las pilas, se realizó un despeje del lugar donde estas serían ubicadas, además en la superficie se colocó polietileno con el fin de evitar la percolación de los lixiviados generados en el proceso.

### **2.2 Caracterización de los residuos a compostar**

#### *2.2.1 Materia prima*

La materia orgánica utilizada como substrato en el proceso de compostaje fue estiércol de bovino (Figura 1a), el que se obtuvo en corrales de engorda de novillos en la comuna de Cañete.

Luego de recolectar y trasladar el material al lugar de ensayo, se procedió a realizar una caracterización de los desechos, se analizó el contenido de humedad del estiércol en el laboratorio arrojando un valor del 81% y los porcentajes de carbono y nitrógeno se extrajeron de la literatura (FIA, 2007), estos valores se podrán ver a continuación en la tabla 2.

### 2.2.2 Material estructurante

Se utilizó como material estructurante viruta de madera de pino insigne (Figura 1b), el cual fue obtenido en la planta maderera Las Misiones, de la comuna de Cañete. Este elemento se eligió pensando en aumentar la porosidad y mejorar la relación carbono nitrógeno de la mezcla.

En la tabla 2 se muestran los porcentajes de carbono y nitrógenos según la literatura consultada (Tchobanoglous, 1998), y mediante ensayos de laboratorio se determinó que su contenido de humedad es de un 12.8%.



a) Estiércol de bovino.

b) Viruta de madera.

**Figura 1:** Residuos a compostar.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### 2.2.3 Mezcla

Para llevar a cabo el proceso de compostaje fue necesario determinar los porcentajes de cada uno de los residuos, conforme a las condiciones o rangos óptimos de humedad y relación carbono nitrógeno (C/N), sugeridos por literatura para el inicio del proceso.

Se definió que el contenido de humedad ideal de la mezcla es de un 70% (Cisterna, 2008) condición con la cual se realizará un buen desarrollo de los microorganismos y se aseguran las condiciones aeróbicas del proceso, además se estima como rango óptimo para la razón carbono nitrógeno los valores entre 25:1 y 35:1 (Madrid y otros, 2001).

Se calculó la masa necesaria de cada elemento para satisfacer la humedad teórica ideal del proceso, luego con estas cantidades ya definidas se calculó la relación C/N de la mezcla y se verificó que el valor se encontrara dentro del rango deseado, lo cuál se puede observar claramente en la tabla 2.

**Tabla 2: Características de los residuos a compostar**

<b>Material</b>	<b>Estiércol</b>	<b>Viruta</b>	<b>Mezcla</b>
Masa (Kg)	300	55	<b>355</b>
Proporción (%)	84.5	15.5	<b>100</b>
Humedad (%)	81	12.8	<b>70</b>
Relación C/N	19	40	<b>25</b>

**Fuente:** Elaboración propia

La masa de cada uno de los residuos presentes en la mezcla fueron determinadas utilizando las expresiones matemáticas recomendadas por Cornell State University (2004), las cuales serán detalladas en el anexo A.

Posteriormente se procedió a realizar la mezcla de estiércol con viruta en forma manual, se procuró realizar una mezcla homogénea y evitar la compactación de los residuos, lo cual podría impedir una buena aireación.

### **2.3 Diseño e implementación de las pilas a compostar**

Para cumplir con el objetivo de este proyecto de título y poder evaluar el comportamiento de los desechos, se planteó la construcción de tres pilas sometidas a diferentes métodos de aireación y mezcla, los cuales serán detallados a continuación.

Cabe mencionar que en las todas las pilas se ocupó la misma mezcla de residuos, la cual fue repartida y dispuesta según la geometría de cada sistema, el régimen de volteo se definió procurando mantener una biodegradación aeróbica en todas las pilas.

#### *2.3.1 Compostaje mediante volteo (Pila N° 1).*

Consiste en un sistema de pila con aireación mediante volteo manual (Figura 2), este es un método muy sencillo y con alto grado de eficiencia lo cual a quedado demostrado en experiencias anteriores (Pérez, 2008; Rocha, 2010; Ramírez, 2011), se caracteriza por el hecho de que la pila se remueve periódicamente para homogenizar la mezcla y su temperatura, lo cual controla la humedad y aumenta la porosidad mejorando la ventilación de las pilas.

Para definir el diseño y operación de la pila se utilizaron las recomendaciones realizadas en el manual “El compostaje y su utilización en agricultura” (FIA, 2007), procurando mantener un proceso de biodegradación aeróbico y el control de los parámetros. El volteo de los residuos se realizó periódicamente en forma manual cada tres días en la etapa de compostaje y cinco días en la etapa de maduración. Las características geométricas de la pila al inicio del proceso son: base 0.8 m.; altura 0.4 m. y longitud 1m.



**Figura 2:** Pila con volteo manual.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### 2.3.2 Compostaje con aireación pasiva (Pila N° 2).

El segundo método de compostaje se definió como una pila estática con aireación pasiva (Figura 3a), en este método se favorece la ventilación natural de las pilas, incorporando tuberías al sistema. Las tuberías permiten un mejor flujo de la masa de aire desde la parte inferior hacia la zona superior del sistema, por medio de la convección natural.

Para la construcción de la pila de compostaje, se implementó el sistema de aireación utilizado en experiencias anteriores por Pérez (2008), que consiste básicamente en un sistema de tuberías al cual se le incorpora difusores de aire cada 10 centímetros (Figura 3b), cabe mencionar que este sistema de aireación pasiva es el que presentó la mayor reducción de materia orgánica comparado con otros sistemas de aireación pasiva en la experiencia antes mencionada.

Los detalles de la estructura construida se pueden ver en anexo A. Las dimensiones de ésta pila al inicio del proceso de compostaje son las siguientes: base 0.9 m.; altura 0.35 m.; longitud 1m.



a) Pila N° 2



b) Sistema de tuberías

**Figura 3:** Pila estática con aireación pasiva.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### 2.3.3 Compostaje con mezclador mecánico (Pila N° 3).

Para la tercera pila se construyó un equipo de compostaje de aireación pasiva que incluye un mezclador mecánico, utilizando como base un prototipo diseñado por Ramírez (2011-2013) el cual se puede ver en la figura 4a, este equipo fue diseñado e implementado en la tesis “Evaluación del efecto diferencial del mezclado mecánico en biodegradación de materia orgánica aeróbica en pilas de aireación por difusores” y se consideró como una solución innovadora para el tratamiento de residuos orgánicos.

En esta tesis se utilizó el equipo de mezcla mecánica con paletas en forma de doble espiral descendente en dos partes, lo cual genera una circulación del aire, el mezclador se hace girar manualmente con un movimiento contrario al espiral con el fin de dispersar la menor cantidad de material de la pila a su alrededor, este sistema de paletas es el que presentó el mejor comportamiento en el estudio mencionado en el párrafo anterior.

El equipo consiste básicamente en una estructura metálica con un eje principal dispuesto en forma vertical, que incorpora un sistema de paletas en forma de doble espiral descendente además difusores de aire en la base de la pila, las paletas quedan ubicadas al interior de la pila, y el equipo se hace girar manualmente en sentido contrario al espiral para no dispersar el material, este movimiento permite la aireación y mezcla del compost.

Luego de analizar el comportamiento del sistema diseñado por Ramírez (2011-2013), se procedió a construir un nuevo sistema de aireación por mezcla mecánica (Figura 4b), al equipo original se le realizaron algunas mejoras incorporando dos paletas adicionales en el eje vertical para mejorar el mezclado de los residuos (una en cada nivel), se agregó una caja reductora en el sistema de giro que permite disminuir considerablemente la fuerza necesaria para hacer rotar el equipo y además se modificó la disposición de los difusores de aire para mejorar la oxigenación de los residuos en zona central de la pila.

La incorporación de mejoras se llevo a cabo para mantener la eficiencia del sistema frente al tratamiento del estiércol, ya que este tipo de residuos siempre presenta un gran porcentaje de humedad y un alto grado de compactación. Los detalles del nuevo equipo de aireación por mezcla mecánica implementado en esta tesis se podrán ver en anexo A.



a) Equipo de compostaje original

b) Equipo rediseñado

**Figura 4:** Sistema de aireación pasiva con mezclador mecánico.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Posterior al diseño y construcción del equipo, este instaló en el lugar de trabajo incorporando los desechos (figura 5) y se puso en funcionamiento con un régimen de mezclado de tres días en la etapa de compostaje y cinco días en la etapa de maduración. Producto del eje de giro vertical y la disposición de paletas del sistema, la pila de compostaje generada tiene una forma cónica y sus dimensiones al inicio del proceso son: diámetro 0.9 m.: altura 0.5 m.



**Figura 5:** Pila de aireación pasiva con mezclador mecánico

**Fuente:** Elaboración Propia.

## 2.4 Variables y frecuencia de medición

Para controlar la biodegradación se monitorearon distintos parámetros durante el proceso, se realizó toma de muestras in situ en forma periódica, las que posteriormente eran trasladadas y analizadas en el Laboratorio de Mecánica de suelos de la Universidad del Bio-Bío, Campus Concepción.

### 2.4.1 Temperatura

La temperatura interna de las pilas es uno de los parámetros más importantes en el proceso, ya que es un indicador del nivel de actividad de los microorganismos responsables del proceso de biodegradación.

La temperatura se registró diariamente a las 15:00 hrs. y en el caso de pilas con volteo, la temperatura se midió antes de mezclar el material, en todas las pilas la temperatura se determinó en tres puntos, uno de ellos en el centro de la pila y los otros dos puntos a la mitad de cada extremo.

Para el análisis de los resultados se determinó que el valor más representativo de la temperatura sería el promedio de los valores correspondientes a los tres puntos de medición.

El instrumento utilizado para medir la temperatura fue un termómetro digital con pincho de 15 centímetros, el cual era introducido de forma vertical en la pila y para registrar este valor se esperaba un tiempo hasta que se estabilizará la temperatura.

#### *2.4.2 pH*

Este parámetro es una medida indirecta del control de la aireación en la mezcla, ya que si en algún momento se crean condiciones anaeróbicas se liberan ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH, se considerará un rango ideal si los valores se encuentran entre 6.5 y 8 (FIA, 2007). El pH se midió in situ utilizando un multímetro, el cual era introducido verticalmente en el centro de las pilas, esta medición se realizó en forma periódica cada 6 días durante toda la etapa experimental.

#### *2.4.3 Humedad*

Para la determinación de la humedad interna de las pilas se tomaron muestras correspondientes a 100 grs. aproximadamente y eran recolectadas con una frecuencia de 3 días para posteriormente ser transportadas al laboratorio para su ensayo. El secado de la muestra se lleva a cabo en un horno con temperatura aproximada de 60°C, para la determinación de la humedad se aplicó el procedimiento de la Norma NCh1515.Of79. Y la fórmula aplicada para la obtención de la humedad se muestra con mayor detalle en el anexo B.

#### *2.4.4 Sólidos volátiles y minerales*

Los sólidos volátiles y minerales se determinan cada tres días, utilizando las muestras llevadas a laboratorio, se toman las muestra secas y se depositan en crisoles, posteriormente se procede a calcinar las muestras en un horno tipo mufla a una temperatura de 550° C durante una hora y veinte minutos, según decreto N° 4, 2010, Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

El contenido de sólidos volátiles se considera como la materia orgánica que es capaz de volatilizarse y corresponde a la pérdida de peso durante la calcinación, mientras que las cenizas restantes en el crisol son los sólidos minerales, la fórmula que domina este procedimiento se detalla en el anexo A.

## **2.5 Metodología de análisis**

Con los datos recolectados en el proceso de compostaje de las pilas se procedió a realizar un análisis de los parámetros controlados en la etapa experimental y se estudió su influencia en el desarrollo del proceso, con el objetivo de evaluar la biodegradación de la materia orgánica de los residuos y comparar los tres sistemas de aireación y mezcla implementados.

En primer lugar se realizó una comparación entre las experiencias y se analizó la evolución de cada una, lo que permitió definir claramente los factores que condicionaron el proceso compostaje de los residuos, finalmente se procedió a evaluar la velocidad y el nivel de biodegradación los residuos.

## **CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Para responder a los objetivos de este proyecto de título en este capítulo se expondrán y analizarán los resultados obtenidos durante la etapa experimental, los datos que dan origen a los gráficos de este capítulo se pueden ver en el anexo C.

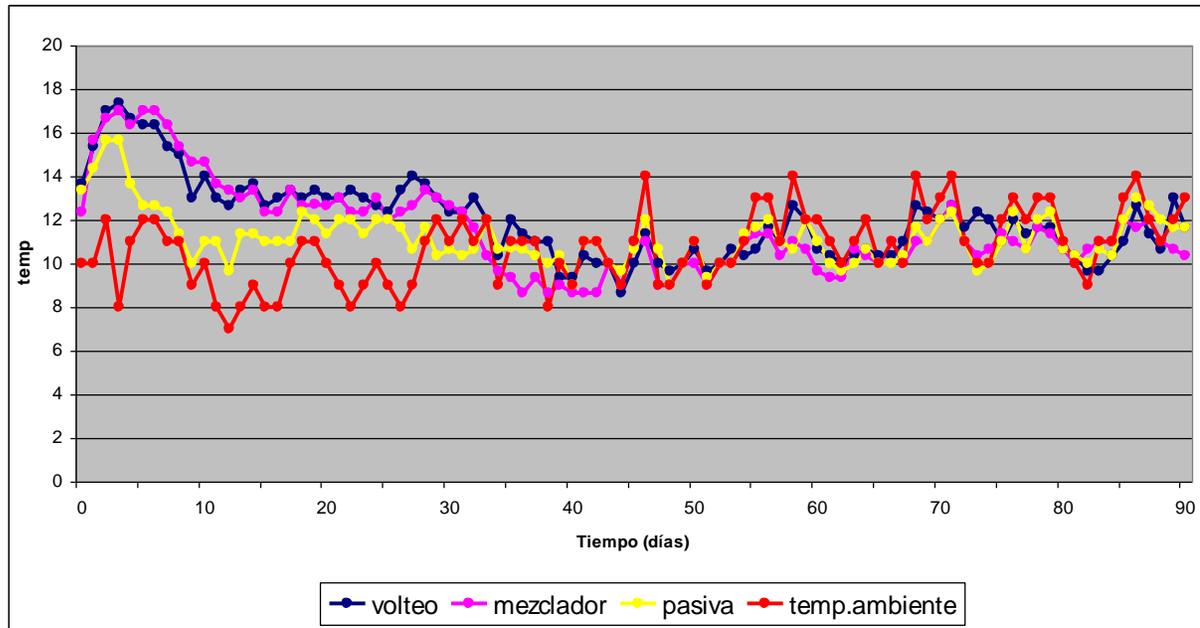
### **3.1 Análisis Comparativo en las Pilas de Compostaje**

#### *3.1.1 Comparación de la Temperatura*

La temperatura en el proceso de compostaje es un parámetro que indica la velocidad de descomposición de la materia, el metabolismo de los microorganismos es exotérmico, por lo tanto en el proceso hay liberación de calor.

La figura 6 nos muestra la evolución de la temperatura interna de las pilas durante la etapa experimental, se da inicio al proceso de compostaje con un aumento gradual de la temperatura producto de la creciente actividad microbiológica en las pilas, entre los días 3 y 4 se lograron las temperaturas más altas, en el caso de la pila por volteo y el equipo de mezcla mecánica se alcanzaron los 17°C, en los días posteriores hasta llegar a la etapa de maduración estos sistemas lograron reactivar la actividad microbiológica debido a sus eficientes sistemas de aireación. En el caso de la pila de aireación pasiva su temperatura máxima es de 16° C y en los días posteriores su temperatura fue evidentemente inferior a los otros dos sistemas, lo cual es consecuencia de la velocidad de descomposición lenta provocada por la compactación de las capas del material en las pilas estáticas y la deficiente aireación.

En el gráfico podemos observar que la pila con volteo manual y la pila con mezclador mecánico tuvieron un comportamiento térmico similar durante los primeros 34 días logrando los perfiles de temperatura más altos, lo cual indica el mayor grado de actividad microbiológica de estas pilas con respecto a la pila de aireación por difusores. La etapa de estabilización o maduración comienza a los 35 días aproximadamente en todas las pilas, en esta fase del compostaje la temperatura en todos los sistemas de aireación y mezcla tiende a ser igual o inferior a la temperatura ambiental hasta el final del proceso.



**Figura 6:** Variación de la temperatura interna en pilas.

**Fuente:** Elaboración Propia.

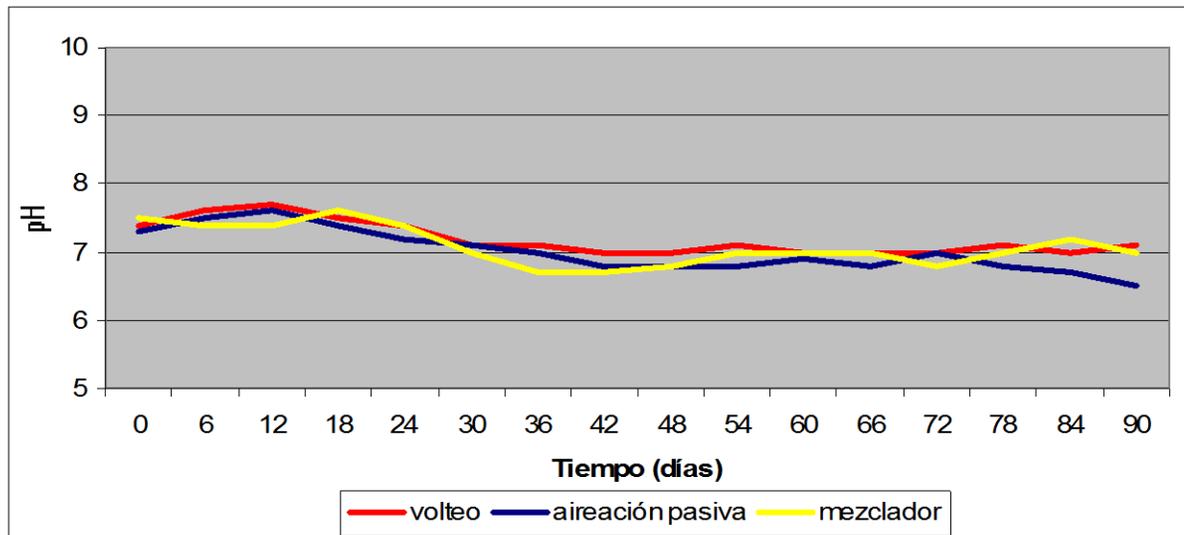
En ninguna de las pilas se lograron rangos de temperaturas superiores a los 17 ° C por lo tanto las pilas solo se desarrollaron en fase mesófila (10-40° C), como no se alcanzan temperaturas correspondientes a la fase termófila (40-75° C), se evita la destrucción de patógenos y semillas de maleza, situación desfavorable para la producción de compost.

Los bajos rangos de temperatura interna alcanzados durante todo el proceso de compostaje en las tres pilas se deben principalmente a la baja temperatura ambiental en la época de ensayos, este comportamiento disminuye la actividad metabólica en las pilas. La baja temperatura ambiental provoca que el calor transferido por conducción desde el centro de la pila hacia la superficie se pierda por convección cuando hace contacto con el ambiente. Este efecto se pudo observar claramente durante toda la etapa experimental donde las capas exteriores de las pilas presentaron bajas temperaturas, este efecto se vio agravado a causa de los fuertes vientos existentes durante el proceso de compostaje.

### 3.1.2 Comparación del pH

En la figura 7, se puede observar que en todas las pilas se da inicio a la etapa de biodegradación con valores levemente alcalinos cercanos a 7.5, durante los primeros 36 días todas las pilas sufren variaciones producidas por la actividad metabólica que eleva la temperatura y produce ácidos orgánicos, posteriormente tienden a la neutralidad debido a la etapa de maduración del compost, exceptuando los últimos 20 días de la pila con aireación pasiva, que tiende a bajar levemente su pH producto del bajo grado de aireación en la pila.

En general podemos ver que todas las pilas mantienen sus valores de pH dentro del rango óptimo (6.5-8) definido para el proceso de compostaje, por lo tanto se deduce que la etapa experimental se desarrolló en forma adecuada, manteniendo condiciones de digestión aeróbicas en todas las pilas.



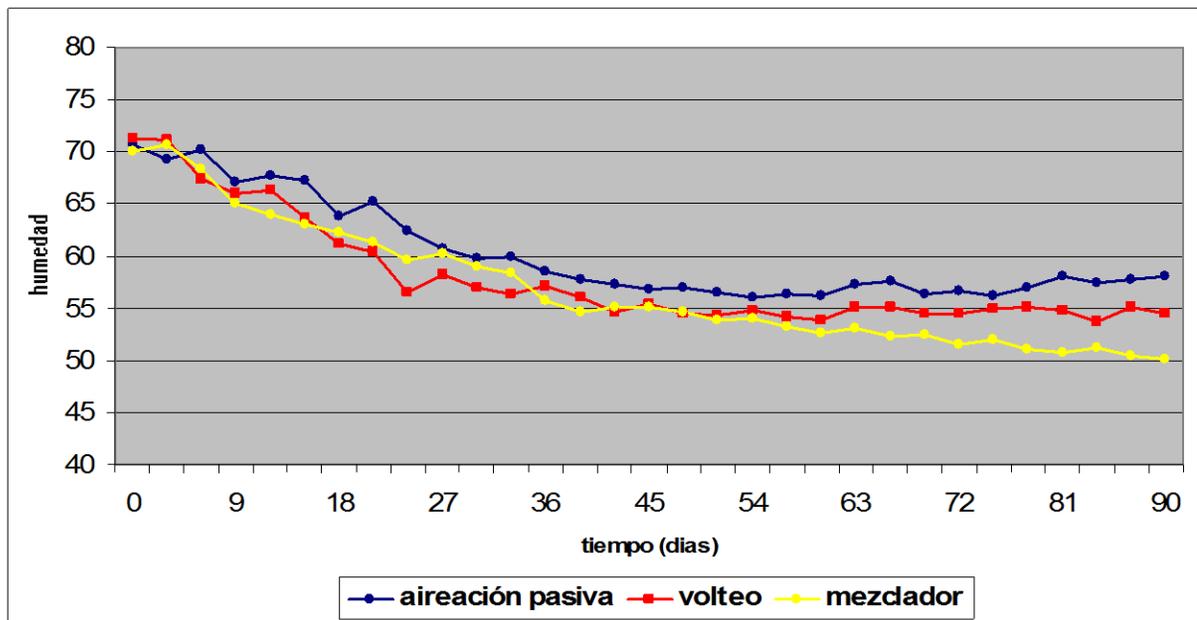
**Figura 7:** Variación del pH en las pilas.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### 3.1.3 Comparación de la Humedad

Como se aprecia claramente en la figura 8, las humedades de las tres pilas fue variada durante el proceso, pero en todas ellas se cumplió con el objetivo de disminuir el grado de humedad del estiércol, lo que se traduce directamente en una reducción de la masa de desechos.

Se puede ver que todas las pilas comienzan el proceso con valores cercanos al 70% de humedad, a partir del día 3 todas ellas comienzan con un descenso gradual de la humedad debido a la actividad de los microorganismos y la inclusión de aire en los desechos, luego a partir del día 45 la humedad tiende a estabilizarse estando ya en la etapa de maduración, en este periodo las pila con volteo manual y la pila de aireación pasiva mantuvieron pequeñas variaciones, en cambio la pila con el mezclador mecánico siguió con descensos en su humedad este fenómeno se debe al sistema de aireación forzada con que cuenta esta pila (aireación por difusores mas mezclador mecánico), lo que permite un mejor secado y separación del los residuos.



**Figura 8:** Variación de la humedad.

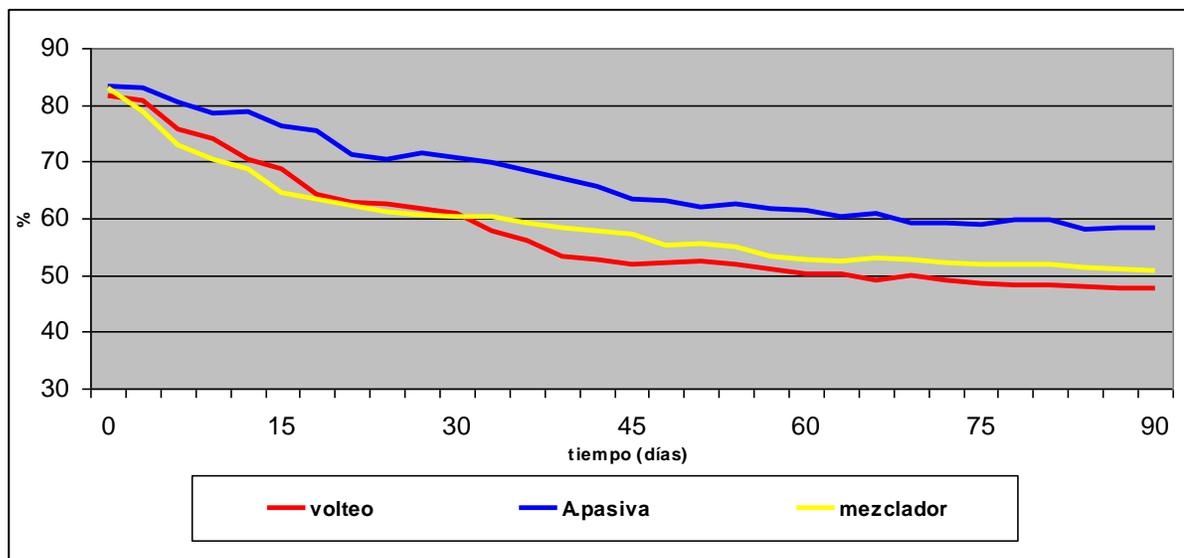
Fuente: Elaboración Propia.

La pila con mezclador mecánico logró la mayor reducción de la humedad correspondiente a un 28.4%, mientras que la pila con volteo y la pila con difusores redujeron su humedad en un 23.5 y 17.7% respectivamente. La humedad promedio de cada una de las pilas se encontró dentro de los rangos aceptables para el tratamiento de estiércoles, este rango está entre el 40 y 70% de humedad, siempre que se pueda mantener una buena aireación en el proceso de compostaje.

El control y la disminución paulatina de la humedad en todas las pilas se logró debido a dos factores, el primero es la instalación de las pilas bajo techo (permite el control de aguas lluvias) y por otro lado se debe a la eficiencia en los sistemas de aireación y mezcla implementados.

### 3.1.4 Comparación de los Sólidos volátiles

En la figura 9 se muestra la disminución de los sólidos volátiles durante el proceso de compostaje, cabe mencionar que los sólidos volátiles representan el contenido de materia orgánica de los residuos, por lo tanto este gráfico representa claramente el proceso de biodegradación de las pilas.



**Figura 9:** Variación de los sólidos volátiles.

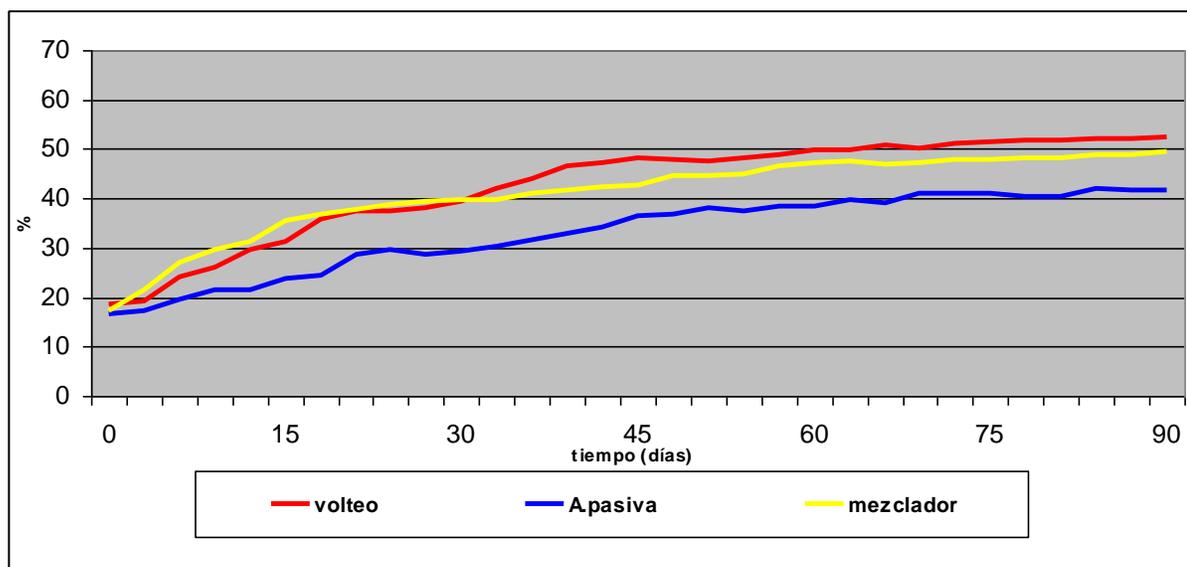
Fuente: Elaboración Propia.

En el gráfico podemos ver que en todas las pilas se da inicio al proceso de compostaje con una concentración de volátiles igual a 83%, durante los primeros días las concentraciones de sólidos volátiles decae rápidamente debido a la gran concentración de microorganismos encargados de consumir la materia orgánica mas fácil de degradar. Desde el día 40 en adelante las pilas disminuyen considerablemente su velocidad de degradación estando en presencia de la etapa de maduración, al final del proceso la concentración de sólidos volátiles alcanzados por las pilas con volteo, aireación pasiva y mezclador mecánico fueron 48, 58, y 51 % respectivamente.

### 3.1.5 Comparación de los Sólidos minerales

La figura 10 muestra la evolución del porcentaje de la fracción mineral (cenizas) que representa la cantidad de materia inerte en las muestras de residuos analizadas en laboratorio.

En el gráfico podemos observar que la proporción de minerales aumenta en todas las pilas a través del tiempo, esto se debe a que los sólidos volátiles disminuyen debido a la degradación de la materia orgánica, la variación en la velocidad de mineralización de cada pila se debe a la diferencia en la actividad microbiológica de cada una de las pilas.



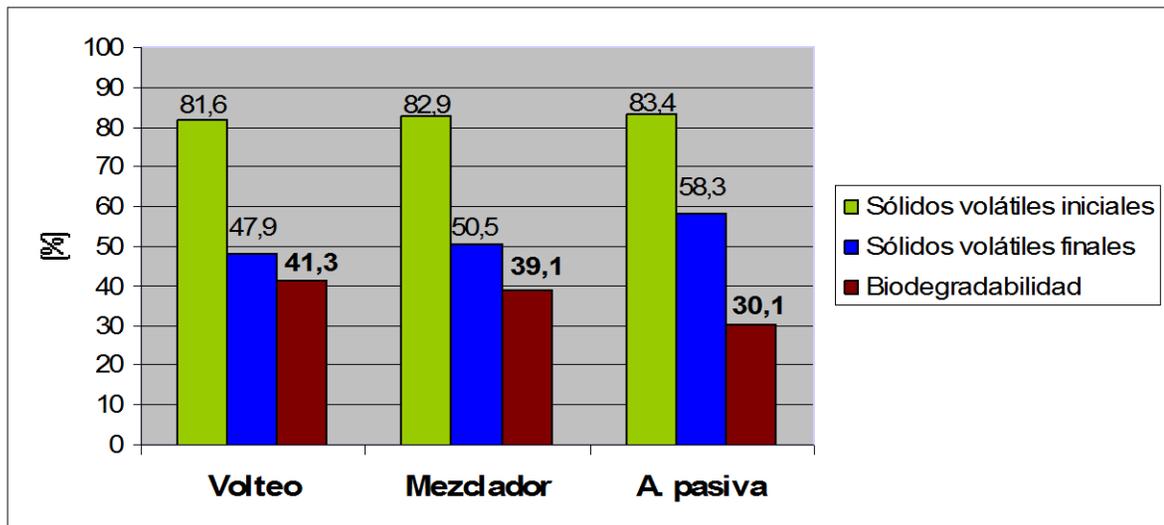
**Figura 10:** Variación de los sólidos minerales.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### 3.1.6 Análisis comparativo de Biodegradabilidad y Constante Endógena

Con el fin de evaluar la biodegradación de los desechos en los tres sistemas de compostaje se procedió a determinar el nivel de biodegradación y la constante endógena en cada una de las pilas, los detalles de cálculo de estas variables se pueden ver en el anexo B.

El nivel de biodegradación corresponde al porcentaje de materia orgánica biodegradada en la etapa experimental, en la figura 11 se puede ver claramente el comportamiento de las pilas, el estudio determino que el sistema de aireación por volteo alcanzo el nivel de biodegradación mas alto correspondiente a un 41.3%, luego con una biodegradación levemente inferior se encuentra el sistema de mezcla mecánica con un 39.1% y finalmente con un proceso menos eficiente el sistema de aireación pasiva logro una biodegradación del 30.1% asociado principalmente a la deficiente aireación. Por otro lado el equipo de mezcla mecánica al complementar volteo mecánico y aireación por difusores en una misma pila incorpora gran cantidad de aire al proceso logrando excelente resultados en el tratamiento del estiércol.

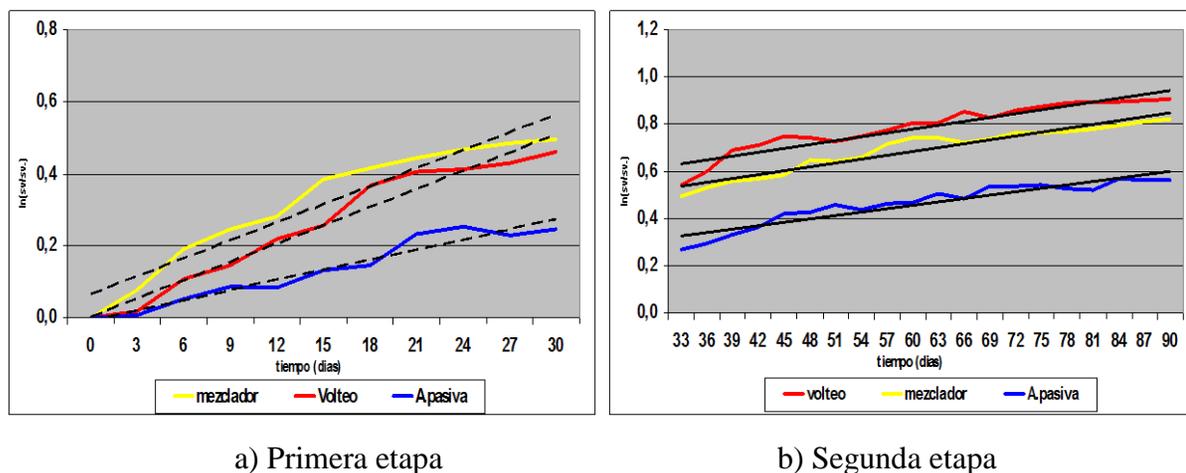


**Figura 11:** Nivel de biodegradación en pilas.

**Fuente:** Elaboración propia.

La constante de reacción o endógena ( $K_d$ ) representa la tasa de reducción de la materia orgánica en el interior de las pilas, para determinar este valor se realizó una linealización de la curva y se dividió el proceso en dos etapas (ver figura 12), la grafica aproxima el comportamiento de las pilas compostaje a un reactor discontinuo donde su pendiente corresponde a la constante de reacción. La primera etapa corresponde a los primeros 30 días (figura 12a), se determinó que la pila con volteo y la pila con mezcla mecánica alcanzaron una tasa de reducción igual correspondiente a 0.05, en la pila de aireación pasiva el valor  $K_d$  es de 0.026. En la segunda etapa (figura 12b) correspondiente a la fase de maduración se muestra que en la pila por volteo el valor de  $K_d$  es de 0.017, en la pila con mezcla mecánica el valor es de 0.016 y en la pila de aireación pasiva es de 0.014.

Con estos resultados nuevamente se comprueba que el sistema de mezcla mecánica tiene un excelente comportamiento durante el proceso, especialmente en los primeros 30 días mantuvo una velocidad de biodegradación igual a lo logrado por el volteo manual, decayendo posteriormente en la etapa de maduración, este comportamiento se podría atribuir a un exceso de aireación en esta etapa (periodos de mezclado muy cortos), provocando una disminución en la actividad microbiológica.



**Figura 12:** Determinación de la constante endógena en la pilas.

**Fuente:** Elaboración propia.

Es importante mencionar que la diferencia existente entre cada una de las pilas con respecto a los dos parámetros anteriores, son producto de las diferentes condiciones de aireación a la cual fueron sometidas las pilas, condicionando en distinta medida la actividad microbiológica de las pilas durante todo el proceso.

### 3.2 Análisis visual de las muestras

El estiércol fresco al inicio del proceso de compostaje (ver figura 13), es de color verde oscuro influenciado principalmente por la dieta del ganado, cuenta con un alto grado de humedad producto de la presencia de orines y las condiciones climáticas, además la muestra tiene un fuerte olor característico del estiércol fresco.



**Figura 13:** Estiércol de bovino al inicio del proceso.

**Fuente:** Elaboración Propia.

En la figura 14 se muestra el compost producido al término del proceso de compostaje de las tres pilas, el producto final adquiere sus características debido al proceso de degradación biológica de la materia orgánica presente en los desechos.

En todas las pilas se obtuvo un producto homogéneo de color café claro, con bajo grado de humedad y de un olor terreo característico de los procesos de descomposición aeróbicos.

Las diferencias que se pueden apreciar corresponden principalmente al tamaño de las partículas generadas, se puede ver que el compost de la pilas con mezclador mecánico y volteo manual tiene las partículas mas pequeñas, por otro lado la pila con aireación pasiva genera un producto de partículas mas grandes, con mayor compactación y una humedad visiblemente más alta.

El menor tamaño de partículas generadas por los sistemas de volteo y mezcla mecánica se explica ya que en estos procesos los residuos se someten periódicamente a volteo y mezcla con lo cual además de remover y mezclar los residuos se generan una fragmentación de los desechos, en cambio en el sistema de aireación pasiva los desechos son depositados en la pila y no son removidos hasta el final del proceso.

Un aspecto importante de mencionar es que en todas las muestras existe la presencia de virutas con bajo grado de degradación debido al alto contenido de lignina y celulosa que posee este material.



**Figura 14:** Compost al final del proceso.

**Fuente:** Elaboración Propia.

## **CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Luego de tres meses de experimentación, donde se monitorearon y evaluaron constantemente distintos parámetros del proceso de compostaje, los cuales fueron analizados en el capítulo anterior, se puede concluir y recomendar lo siguiente.

- El estiércol de bovino mezclado con viruta de madera como material estructurante, demostró ser un material factible de ser tratado mediante compostaje, siempre que se asegure una buena aireación y control de la humedad en el proceso.
- Todas las pilas lograron comportamientos térmicos característicos de la fase mesófila (10-40° C), la pila por volteo y la de mezcla mecánica tuvieron comportamientos térmicos similares, logrando los perfiles de temperatura mas altos, en cambio la pila con difusores desarrollo temperaturas inferiores producto de una velocidad de biodegradación más lenta.
- En todos los sistemas de aireación se logró reducir y controlar el contenido de humedad de los residuos, la pila con mezclador mecánico logro la mayor reducción de la humedad correspondiente a un 28.4%, mientras que la pila con volteo y la pila con difusores redujeron su humedad en un 23.6 y 17.7% respectivamente.
- El estudio determinó que el sistema de aireación por volteo manual (41.3%) y el equipo de aireación por mezcla mecánica (39.1%) lograron los niveles de biodegradabilidad mas altos y se consideraron similares al no presentaron diferencias significativas, en cambio el sistema de aireación por difusores (30.1%) mostró un baja biodegradación de los residuos.
- El sistema de aireación por mezcla mecánica demostró ser un sistema eficiente para el tratamiento biológico de residuos sólidos ganaderos, similar al método de volteo y superior al sistema de aireación por difusores.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ahumada, C. (2005). “Evaluación de los Efectos de la Pluviométrica en las Pilas de Compostaje”, Proyecto de título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.
- Avendaño, Daniella (2003). El proceso de compostaje. Proyecto de título (Ingeniero agrónomo). Santiago, Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile, Depto. de fruticultura y Etnología.
- Cisterna, Pedro. “Gestión de Residuos Sólidos”. Apunte de clase, 2008.
- Cornell State University. “The Science and Engineering of Composting”, USA 2004. Sitio Web: <http://compost.css.cornell.edu>
- Eweis, J. B. Principios de biorecuperación. Tratamiento para contaminación y regeneración de suelos y aguas subterráneas mediante procesos biológicos y fisicoquímicos. McGraw-Hill. España, 1999.
- FIA. Fundación para la Innovación Agraria. 2007. Manual El compostaje y su utilización en agricultura. Santiago. Chile.
- Gutiérrez, P. (2011). “Evaluación de la Biodegradación de Residuos Sólidos Urbanos mediante el Tratamiento Mecánico Biológico durante la Primavera”. Proyecto de Título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.
- Haug, R. T. The practical Handbook of Compost Engineering, Lewis Publishers 1993.
- INTEC. Corporación de Investigación Tecnológica. 1997. Manual de compostaje. P.21-30.Santiago. Chile.
- Labbé, P. (2003) “Acondicionamiento de Residuos Sólidos Mediante Compostaje”, Proyecto de Título de Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.

- Madrid F., López 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.
- Navarro Pedreño y otros. (1995). Residuos orgánicos y agricultura, Compobell, España.
- NCh 1515 Of. 79. Mecánica de Suelos – Determinación de humedad. Santiago, Chile. Instituto Nacional de Normalización, 1979.
- OPS. Organización Panamericana de la Salud.1999. Manual para la elaboración de compost.
- Pérez, C. (2008) “Evaluación de los efectos de la aireación en pilas de compostaje de biosólidos”, Proyecto de Título de Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.
- Ramírez, M. (2011 a 2013). “Evaluación del efecto diferencial del mezclado mecánico en biodegradación de materia orgánica en compostaje aeróbico en pilas de aireación por difusores”. Proyecto de Título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío Bío.
- Rodríguez, C. (2000). Residuos ganaderos. Cursos de introducción a la producción animal. [http://www.produccionbovina.com/sustentabilidad/05-residuos\\_ganaderos.pdf](http://www.produccionbovina.com/sustentabilidad/05-residuos_ganaderos.pdf)
- Rocha, M. (2010). “Evaluación de la biodegradación de los residuos sólidos urbanos en un tratamiento mecánico biológico”. Proyecto de título, Ingeniería Civil, Universidad del Bío-Bío.
- Rodale, J. (1946). Abonos orgánicos: el cultivo de huertas y jardines con compuestos orgánicos. Tres emes. Buenos aires. Argentina.
- Tchobanoglous, George. “Gestión Integral de Residuos Sólidos” Vol. I y II, Editorial McGraw-Hill, 1998.

## ANEXOS

### ANEXO A. DISEÑO DE LAS PILAS

#### *A.1. Mezcla de los residuos a compostar*

La masa de cada uno de los residuos a compostar fue determinada utilizando las expresiones matemáticas recomendadas por Cornell State University (2004).

Para el cálculo de la húmeda teórica de la mezcla se utilizó la ecuación A.1.

#### **Ec.A.1. Humedad teórica.**

$$H_i = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \times H_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$$

Donde:

Ht: Porcentaje de humedad de la mezcla.

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

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

Para el cálculo de la razón carbono-nitrógeno se utilizó la ecuación A.2.

#### **Ec.A.2. Razón (C/N).**

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

Donde:

R: razón carbono-nitrógeno de la mezcla.

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

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

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

Ni: porcentaje de nitrógeno del material i presente en la mezcla.

### A.2. Estructura de aireación por difusores

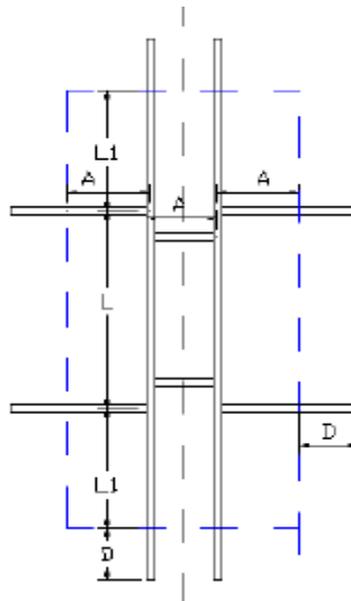
El diseño del sistema de aireación con difusores cada 10 cm. fue desarrollado por Pérez (2008), fue construido con la utilización de los materiales más simples y económicos del mercado.

El sistema de aireación por difusores se construyó para airear una pila de 0.9 metros de ancho y 1 metro de largo, las dimensiones de la red de tuberías se mostraran en la tabla A1, y su distribución se puede ver en la (Figura A1.)

**Tabla A1: Dimensiones sistema de aireación.**

Características geométricas	Dimensión (m)
L	0.38
L1	0.3
D	0.2
A	0.3

Fuente: Elaboración propia



**Figura A1:** Esquema del sistema de aireación.

Fuente: Pérez (2008).

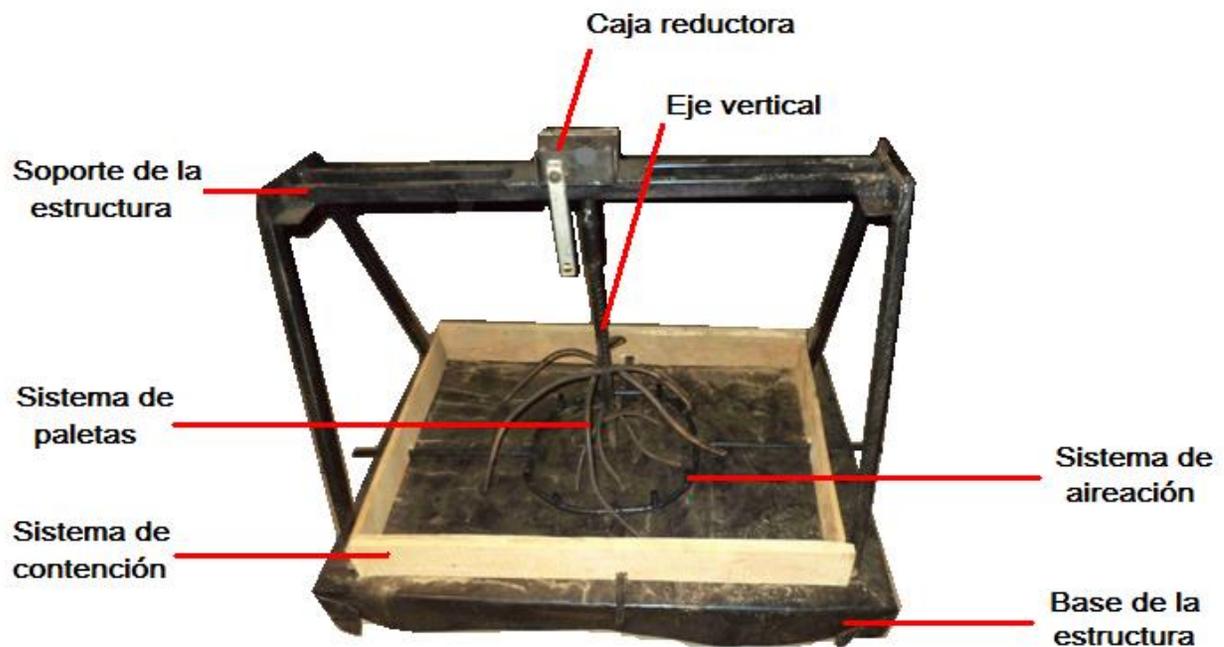
Los materiales utilizados en la construcción, se describen a continuación.

- **Tubo de PVC hidráulico** de 32 milímetros de diámetro, utilizado como tubería principal para la incorporación de aire a la pila.
- **Manguera de 3/8 de pulgada**, utilizada para la confección de los difusores de aire, estos elementos tienen una altura de 13 centímetros.
- **Pegamento de PVC**, para unir todos los elementos del sistema de tuberías.
- **Tee de PVC** de 1 pulgada, que ayuda a la conexión de las tuberías dispuesta en distintas direcciones.

### *A.3. Sistemas de aireación por mezcla mecánica*

Para la construcción del sistema de mezcla mecánica implementado en esta tesis se utilizó el equipo diseñado por Ramírez (2011-2013), se le realizaron modificaciones que mejoran su desempeño, realizando una mejor mezcla de los residuos, hace más efectiva la incorporación de aire por difusores y disminuye considerablemente el esfuerzo necesario para rotar el equipo.

Los componentes del equipo de mezcla mecánica implementado en este estudio serán descritos a continuación y se podrán ver en la Figura A2.



**Figura A2:** Equipo de mezcla mecánica.

**Fuente:** Elaboración propia.

### **Estructura del equipo de aireación por mezcla mecánica:**

- **Base:** Sirve de elemento soportante del equipo de mezcla, esta formado por un palet de madera de 1.2 (m2), cubierto en la parte superior por polietileno de color negro.
- **Sistema de contención:** Este elemento evita la perdida de residuos al mezclarlos, esta formado por tablas de pino insigne de 1x 2.5 pulgadas que cubren los cuatro costados de la pila de compostaje.
- **Soporte de la estructura:** Esta formado por un caballete de 0.9 metros de altura que soporta a la caja reductora y al eje vertical con las paletas.
- **Caja reductora:** Como su nombre lo indica es una caja formada por un sistema de engranajes que trasmite el esfuerzo a un eje vertical, la rotación se realiza en forma manual a través de una manilla y el esfuerzo es transmitido con una reducción de 6:1.
- **Eje vertical:** Transmite el esfuerzo de la caja reductora a las paletas, esta formado por un tubo metálico de 1 pulgada de diámetro.
- **Sistema de aireación por difusores:** Es un sistema de tuberías que introduce aire al compost por medio de la convección natural, esta formado por una red de tuberías que permite ingresar el aire desde los 4 costados hacia el interior de la pila, este es repartido en forma circular en un diámetro de 0.4 metros, los difusores se encuentran a una distancia de 0.1 metros, los difusores y la red de tubería esta construida de manguera de 3/8 de diámetro.
- **Sistema de paletas:** Es un conjunto de elementos que permite la mezcla de los residuos al rotar el sistema, esta formado por 6 paletas dispuestas en dos niveles en torno al eje vertical y tienen una forma de doble espiral descendente.

Las paletas están echas de fierro de construcción de 10 milímetros de diámetro, el primer nivel de paletas cubre un diámetro de 0.3 metros y están soldadas al eje vertical a una altura de 0.15 metros, el segundo nivel de paletas cubre un diámetro de 0.6 metros y están soldadas al eje a una altura de 0.3 metros.

## ANEXO B. ELEMENTOS DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL PROCESO

### ***B.1. Determinación de la humedad***

El secado de la muestra se lleva a cabo en un horno con temperatura aproximada de 60° C, para la determinación de la humedad se aplicó el procedimiento de la Norma NCH1515.Of79.

Para obtener el porcentaje de sequedad de la muestra se utiliza la ecuación B.1.

#### **Ec.B.1. Sequedad de la muestra.**

$$\text{Sequedad (\%)} = \frac{(Mc + ms) - Mc}{(Mc + mh) - Mc} \times 100$$

Donde:

Mc+ms.: Masa del crisol con la muestra seca.

Mc+mh: masa del crisol con la muestra húmeda.

Mc: Masa del crisol.

Luego el porcentaje de húmeda se determina con la ecuación B.2.

#### **Ec.B.2. Humedad de la muestra.**

$$\% \text{ Humedad} = (100 - \% \text{ Sequedad})$$

### ***B.2. Determinación de los sólidos volátiles y minerales***

La temperatura de trabajo es de 550 ° C , que se alcanza en un tiempo aproximado de 1 hora , para luego realizar el ensayo en un periodo de 20 minutos según Decreto N °4, 2010, Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

El contenido de sólidos volátiles se considera como la materia orgánica que es capaz de volatilizarse y corresponde a la pérdida de peso durante la calcinación, mientras que las cenizas que restan en el crisol son los sólidos minerales.

La ecuación que gobierna el cálculo de sólidos minerales es la B.3 y para los sólidos volátiles es la ecuación B.4 que se describe a continuación:

**Ec.B.3. Sólidos volátiles.**

$$\text{Sólidos Volátiles}(\%) = \frac{(Mc + ms) - (Mc + mc)}{(Mc + ms) - Mc} \times 100$$

**Ec.B.4. Sólidos minerales.**

$$\text{Sólidos Minerales} (\%) = 100 - \text{Sólidos Volátiles} (\%)$$

Dónde:

SV = Sólidos volátiles, medido en %.

SM = Sólidos minerales, medido en %.

Mc+ms= masa crisol más masa seca, medida en g.

Mc+mc= masa crisol más masa carbonizada, medida en g.

Mc = masa crisol, medida en g

**B.3. Determinación del nivel de biodegradación**

El nivel de Biodegradación (NB) o biodegradabilidad es una medida directa de la eficiencia del proceso de compostaje, determina el porcentaje de materia orgánica degradada durante el proceso (variación de sólidos volátiles) y se calcula mediante la ecuación B.5.

**Ec.B.5. Nivel de biodegradación**

$$NB (\%) = \frac{SV_i - SV_f}{SV_i}$$

NB = Materia orgánica biodegradada, medido en %.

SV<sub>i</sub> = Sólidos volátiles iniciales, medido en %.

SV<sub>f</sub> = Sólidos volátiles finales, medido en %.

#### ***B.4. Determinación de la constante endógena***

La constante de reacción o endógena (Kd) de la pila representa la tasa de reducción de la materia orgánica en el interior de ella, para determinar este valor se graficaron los puntos utilizando la ecuación B.6, luego se realizó una linealización de la curva generada y su pendiente corresponde a constante de reacción.

#### **Ec.B.6. Constante endógena.**

$$Kd = -\text{Ln} \frac{SSV - SSV_{nb}}{SV_o - SSV_{nb}}$$

$SSV$  = Sólidos volátiles.

$SSV_{nb}$  = Sólidos volátiles no biodegradables.

$SSV_o$  = Sólidos volátiles iniciales.

## ANEXO C. TABLAS DE REGISTRO DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación se presentaran las tablas de datos correspondientes a los datos recolectados in situ y se mostraran los parámetros evaluados durante todo el proceso de compostaje de las tres pilas en estudio.

**Tabla C1. Medición del pH en las pilas**

día	fecha	pH		
		volteo	pasiva	mezclador
0	16/07/2012	7,4	7,3	7,5
6	22/07/2012	7,6	7,5	7,4
12	28/07/2012	7,7	7,6	7,4
18	03/08/2012	7,5	7,4	7,6
24	09/08/2012	7,4	7,2	7,4
30	15/08/2012	7,1	7,1	7
36	21/08/2012	7,1	7	6,7
42	27/08/2012	7	6,8	6,7
48	02/09/2012	7	6,8	6,8
54	08/09/2012	7,1	6,8	7
60	14/09/2012	7	6,9	7
66	20/09/2012	7,3	6,8	7
72	26/09/2012	7	7	6,8
78	02/10/2012	7,1	6,8	7
84	08/10/2012	7	6,7	7,2
90	14/10/2012	7,1	6,5	7

**Tabla C2. Datos temperatura interna de las Pilas**

<b>Nº DIAS</b>	<b>fecha</b>	<b>volteo</b>	<b>pasiva</b>	<b>mezclador</b>
0	16/07/2012	13,7	13,3	12,3
1	17/07/2012	15,3	14,3	15,7
2	18/07/2012	17,0	15,7	16,7
3	19/07/2012	17,3	15,7	17,0
4	20/07/2012	16,7	13,7	16,3
5	21/07/2012	16,3	12,7	17,0
6	22/07/2012	16,3	12,7	17,0
7	23/07/2012	15,3	12,3	16,3
8	24/07/2012	15,0	11,3	15,3
9	25/07/2012	13,0	10,0	14,7
10	26/07/2012	14,0	11,0	14,7
11	27/07/2012	13,0	11,0	13,7
12	28/07/2012	12,7	9,7	13,3
13	29/07/2012	13,3	11,3	13,0
14	30/07/2012	13,7	11,3	13,3
15	31/07/2012	12,7	11,0	12,3
16	01/08/2012	13,0	11,0	12,3
17	02/08/2012	13,3	11,0	13,3
18	03/08/2012	13,0	12,3	12,7
19	04/08/2012	13,3	12,0	12,7
20	05/08/2012	13,0	11,3	12,7
21	06/08/2012	13,0	12,0	13,0
22	07/08/2012	13,3	12,0	12,3
23	08/08/2012	13,0	11,3	12,3
24	09/08/2012	12,7	12,0	13,0
25	10/08/2012	12,3	12,0	12,0
26	11/08/2012	13,3	11,7	12,3
27	12/08/2012	14,0	10,7	12,7
28	13/08/2012	13,7	11,7	13,3
29	14/08/2012	13,0	10,3	13,0
30	15/08/2012	12,3	10,7	12,7
31	16/08/2012	12,3	10,3	12,3
32	17/08/2012	13,0	10,7	11,7
33	18/08/2012	12,0	12,0	10,3
34	19/08/2012	10,3	10,7	9,7
35	20/08/2012	12,0	10,7	9,3
36	21/08/2012	11,3	10,7	8,7
37	22/08/2012	11,0	10,3	9,3
38	23/08/2012	11,0	10,0	8,7
39	24/08/2012	9,3	10,3	9,0
40	25/08/2012	9,3	9,0	8,7
41	26/08/2012	10,3	11,0	8,7
42	27/08/2012	10,0	11,0	8,7
43	28/08/2012	10,0	10,0	10,0
44	29/08/2012	8,7	9,7	9,0
45	30/08/2012	10,0	10,7	11,0
46	31/08/2012	11,3	12,0	11,0

47	01/09/2012	10,0	10,7	9,0
48	02/09/2012	9,7	9,0	9,0
49	03/09/2012	10,0	10,0	10,0
50	04/09/2012	10,7	11,0	10,0
51	05/09/2012	9,7	9,3	9,0
52	06/09/2012	10,0	10,0	10,0
53	07/09/2012	10,7	10,0	10,0
54	08/09/2012	10,3	11,3	11,0
55	09/09/2012	10,7	11,7	11,3
56	10/09/2012	11,7	12,0	11,3
57	11/09/2012	11,0	11,0	10,3
58	12/09/2012	12,7	10,7	11,0
59	13/09/2012	12,0	12,0	10,7
60	14/09/2012	10,7	11,0	9,7
61	15/09/2012	10,3	10,0	9,3
62	16/09/2012	10,0	9,7	9,3
63	17/09/2012	10,3	10,0	10,7
64	18/09/2012	10,7	10,7	10,3
65	19/09/2012	10,3	10,0	10,0
66	20/09/2012	10,3	10,0	11,0
67	21/09/2012	11,0	10,3	10,0
68	22/09/2012	12,7	11,7	11,0
69	23/09/2012	12,3	11,0	11,0
70	24/09/2012	12,0	12,0	12,0
71	25/09/2012	12,7	12,3	12,7
72	26/09/2012	11,7	11,0	11,0
73	27/09/2012	12,3	9,7	10,3
74	28/09/2012	12,0	10,0	10,7
75	29/09/2012	11,0	11,0	11,3
76	30/09/2012	12,0	12,3	11,0
77	01/10/2012	11,3	10,7	10,7
78	02/10/2012	11,7	12,0	11,7
79	03/10/2012	11,7	12,3	11,3
80	04/10/2012	10,7	10,7	10,7
81	05/10/2012	10,3	10,3	10,0
82	06/10/2012	9,7	10,0	10,7
83	07/10/2012	9,7	10,7	11,0
84	08/10/2012	10,3	10,3	11,0
85	09/10/2012	11,0	12,0	12,0
86	10/10/2012	12,7	13,0	11,7
87	11/10/2012	11,3	12,7	12,0
88	12/10/2012	10,7	12,0	11,0
89	13/10/2012	13,0	11,7	10,7
90	14/10/2012	11,7	11,7	10,3

**Tabla C3. Análisis de laboratorio Pila por volteo**

<b>Día</b>	<b>Mc (g)</b>	<b>Mc+mh (g)</b>	<b>Mc+ms (g)</b>	<b>Sequedad (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>
0	5,75	30,74	12,92	28,7	71,3
3	5,75	22,91	10,70	28,8	71,2
6	5,73	22,11	11,06	32,6	67,4
9	5,74	19,52	10,42	34,0	66,0
12	5,72	19,23	10,28	33,8	66,3
15	5,72	32,39	15,41	36,3	63,7
18	5,71	33,87	16,64	38,8	61,2
21	5,73	36,06	17,75	39,6	60,4
24	5,74	35,18	18,56	43,6	56,5
27	5,72	41,37	20,61	41,8	58,2
30	5,74	36,74	19,06	43,0	57,0
33	5,74	20,17	12,05	43,7	56,3
36	5,73	32,78	17,33	42,9	57,1
39	5,72	32,48	17,49	44,0	56,0
42	5,74	35,64	19,30	45,4	54,7
45	5,73	36,55	19,48	44,6	55,4
48	5,73	40,12	21,36	45,5	54,6
51	5,73	41,56	22,12	45,7	54,3
54	5,72	32,73	17,93	45,2	54,8
57	5,72	30,75	17,18	45,8	54,2
60	5,74	22,55	13,49	46,1	53,9
63	5,73	19,89	12,08	44,8	55,2
66	5,73	19,56	11,95	45,0	55,0
69	5,73	33,05	18,15	45,5	54,5
72	5,73	32,84	18,05	45,5	54,6
75	5,75	35,47	19,16	45,1	54,9
78	5,74	36,55	19,58	44,9	55,1
81	5,75	40,33	21,40	45,3	54,8
84	5,73	39,55	21,41	46,4	53,7
87	5,73	33,62	18,27	45,0	55,0
90	5,74	39,85	21,28	45,6	54,5

**Tabla C4. Análisis de laboratorio Pila con aireación pasiva**

<b>Día</b>	<b>Mc (g)</b>	<b>Mc+mh (g)</b>	<b>Mc+ms (g)</b>	<b>Sequedad (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>
0	5,75	23,35	10,92	29,4	70,6
3	5,75	24,06	11,38	30,8	69,3
6	5,76	22,88	10,87	29,8	70,2
9	5,72	20,09	10,46	33,0	67,0
12	5,76	17,23	9,46	32,3	67,7
15	5,74	31,62	14,21	32,7	67,3
18	5,74	29,84	14,44	36,1	63,9
21	5,76	33,16	15,31	34,8	65,2
24	5,72	39,34	18,33	37,5	62,5
27	5,77	40,79	19,52	39,3	60,7
30	5,75	38,66	18,99	40,2	59,8
33	5,73	23,10	12,70	40,1	59,9
36	5,73	22,76	12,81	41,6	58,5
39	5,75	31,56	16,66	42,3	57,7
42	5,75	28,31	15,38	42,7	57,3
45	5,74	35,61	18,63	43,1	56,9
48	5,73	35,47	18,51	43,0	57,0
51	5,76	24,69	14,00	43,5	56,5
54	5,76	22,58	13,15	44,0	56,1
57	5,74	21,05	12,42	43,6	56,4
60	5,73	19,22	11,63	43,7	56,3
63	5,73	33,60	17,66	42,8	57,2
66	5,73	28,94	15,58	42,5	57,5
69	5,74	33,32	17,80	43,7	56,3
72	5,75	31,15	16,74	43,3	56,7
75	5,75	29,53	16,17	43,8	56,2
78	5,75	33,48	17,67	43,0	57,0
81	5,74	38,91	19,64	41,9	58,1
84	5,73	25,53	14,16	42,6	57,4
87	5,76	22,76	12,94	42,2	57,8
90	5,76	20,72	12,03	41,9	58,1

**Tabla C5. Análisis de laboratorio Pila con mezclador mecánico**

<b>Día</b>	<b>Mc (g)</b>	<b>Mc+mh (g)</b>	<b>Mc+ms (g)</b>	<b>Sequedad (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>
0	5,75	31,56	12,90	27,7	70,0
3	5,75	23,5	9,27	19,8	70,7
6	5,74	21,67	9,06	20,8	68,4
9	5,75	19,14	8,72	22,2	65,0
12	5,75	22,32	9,61	23,3	64,0
15	5,75	31,39	11,81	23,6	63,1
18	5,74	34,3	12,45	23,5	62,2
21	5,73	31,18	12,51	26,6	61,4
24	5,75	38,73	13,92	24,8	59,5
27	5,75	43,38	15,46	25,8	60,2
30	5,73	34,73	12,77	24,3	59,0
33	5,73	31,64	16,53	41,7	58,3
36	5,74	36,78	19,47	44,2	55,8
39	5,74	33,45	18,33	45,4	54,6
42	5,75	25,96	14,84	45,0	55,0
45	5,75	26,78	15,20	44,9	55,1
48	5,74	41,23	21,82	45,3	54,7
51	5,73	46,12	24,36	46,1	53,9
54	5,75	36,96	20,10	46,0	54,0
57	5,73	38,25	20,95	46,8	53,2
60	5,74	45,47	24,59	47,5	52,6
63	5,73	34,69	19,34	47,0	53,0
66	5,75	33,56	19,02	47,7	52,3
69	5,75	43,02	23,46	47,5	52,5
72	5,75	23,12	14,16	48,4	51,6
75	5,74	22,09	13,58	48,0	52,0
78	5,73	23,92	14,62	48,9	51,1
81	5,75	34,45	19,91	49,3	50,7
84	5,75	34,78	19,89	48,7	51,3
87	5,74	33,08	19,31	49,6	50,4
90	5,74	37,73	21,69	49,9	50,1

**Tabla C6. Parámetros Pila por volteo**

<b>Día</b>	<b>SV (%)</b>	<b>SM (%)</b>	<b>SVb (%)</b>	<b>Kd</b>
0	81,6	18,4	56,6	0,00
3	80,7	19,3	55,7	0,02
6	75,8	24,2	50,8	0,11
9	74,0	26,0	49,0	0,14
12	70,5	29,5	45,5	0,22
15	68,8	31,2	43,8	0,26
18	64,1	35,9	39,1	0,37
21	62,7	37,3	37,7	0,41
24	62,5	37,5	37,5	0,41
27	61,8	38,2	36,8	0,43
30	60,7	39,3	35,7	0,46
33	57,9	42,1	32,9	0,54
36	56,1	43,9	31,1	0,60
39	53,4	46,6	28,4	0,69
42	52,8	47,2	27,8	0,71
45	51,9	48,1	26,9	0,75
48	52,0	48,0	27,0	0,74
51	52,3	47,7	27,3	0,73
54	51,8	48,2	26,8	0,75
57	51,1	48,9	26,1	0,77
60	50,2	49,8	25,2	0,81
63	50,3	49,7	25,3	0,80
66	49,1	50,9	24,1	0,85
69	49,8	50,2	24,8	0,83
72	49,0	51,0	24,0	0,86
75	48,6	51,4	23,6	0,87
78	48,3	51,7	23,3	0,89
81	48,2	51,8	23,2	0,89
84	48,1	52,1	22,9	0,90
87	48,0	52,2	22,8	0,90
90	47,9	52,3	22,7	0,90

**Tabla C7. Parámetros Pila con aireación pasiva**

<b>Día</b>	<b>SV (%)</b>	<b>SM (%)</b>	<b>SVb (%)</b>	<b>Kd</b>
0	83,4	16,6	58,4	0,00
3	82,9	17,1	57,9	0,01
6	80,5	19,5	55,5	0,05
9	78,5	21,5	53,5	0,09
12	78,7	21,3	53,7	0,08
15	76,2	23,8	51,2	0,13
18	75,6	24,4	50,6	0,14
21	71,4	28,6	46,4	0,23
24	70,3	29,7	45,3	0,25
27	71,4	28,6	46,4	0,23
30	70,6	29,4	45,6	0,25
33	69,8	30,2	44,8	0,27
36	68,4	31,6	43,4	0,30
39	67,0	33,0	42,0	0,33
42	65,7	34,3	40,7	0,36
45	63,4	36,6	38,4	0,42
48	63,1	36,9	38,1	0,43
51	61,9	38,2	36,9	0,46
54	62,7	37,4	37,7	0,44
57	61,7	38,3	36,7	0,46
60	61,5	38,5	36,5	0,47
63	60,3	39,7	35,3	0,50
66	60,9	39,1	35,9	0,49
69	59,1	40,9	34,1	0,54
72	59,1	40,9	34,1	0,54
75	59,0	41,0	34,0	0,54
78	59,6	40,4	34,6	0,52
81	59,7	40,3	34,7	0,52
84	58,1	41,9	33,1	0,57
87	58,2	41,8	33,2	0,56
90	58,3	41,7	33,3	0,56

**Tabla C8. Parámetros Pila con mezclador mecánico**

<b>Día</b>	<b>SV (%)</b>	<b>SM (%)</b>	<b>SVb (%)</b>	<b>Kd</b>
0	82,9	17,1	57,9	0,00
3	78,7	21,3	53,7	0,08
6	72,9	27,1	47,9	0,19
9	70,3	29,7	45,3	0,24
12	68,7	31,3	43,7	0,28
15	64,4	35,6	39,4	0,38
18	63,3	36,7	38,3	0,41
21	62,2	37,9	37,2	0,44
24	61,3	38,7	36,3	0,47
27	60,7	39,3	35,7	0,48
30	60,2	39,8	35,2	0,50
33	60,4	39,6	35,4	0,49
36	59,1	40,9	34,1	0,53
39	58,2	41,8	33,2	0,56
42	57,8	42,2	32,8	0,57
45	57,3	42,7	32,3	0,58
48	55,3	44,7	30,3	0,65
51	55,4	44,6	30,4	0,64
54	55,0	45,0	30,0	0,66
57	53,3	46,7	28,3	0,71
60	52,6	47,4	27,6	0,74
63	52,5	47,5	27,5	0,74
66	53,1	46,9	28,1	0,72
69	52,7	47,3	27,7	0,74
72	52,1	48,0	27,1	0,76
75	52,0	48,0	27,0	0,76
78	51,8	48,1	26,9	0,77
81	51,5	48,2	26,8	0,78
84	51,2	48,8	26,2	0,79
87	50,8	48,9	26,1	0,81
90	50,5	49,4	25,7	0,82