

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPOSTAJE PARA EL  
TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN LA VEREDA BETANIA  
MUNICIPIO DE TOTORÓ, CAUCA**



**JHON ALBERTO DORADO SANTA  
JAMES ELIAS MUÑOZ GALLEGO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
POPAYÁN  
2017**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPOSTAJE PARA EL  
TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN LA VEREDA BETANIA  
MUNICIPIO DE TOTORÓ, CAUCA**

**JHON ALBERTO DORADO SANTA  
JAMES ELIAS MUÑOZ GALLEGO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Químico**

**Director: Ph.D. EDIER HUMBERTO PEREZ  
Asesora: MSc. ISABEL BRAVO REALPE**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
POPAYÁN  
2017**

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

Director \_\_\_\_\_  
Edier Humberto Pérez Ph.D.

Jurado \_\_\_\_\_  
Claudia Ximena Martínez MSc.

Jurado \_\_\_\_\_  
Iván Enrique Paz MSc.

Fecha de sustentación: 3 de octubre de 2016

## **DEDICATORIA**

*A mi madre y a la memoria de mi padre ya que sin su apoyo no hubiese sido posible la culminación de este trabajo*

**JHON**

*A Dios quien es la luz de mi vida y quien guía mi camino, por darme la vida, el conocimiento y la sabiduría para seguir creciendo día a día*

*A mis padres que con su amor, esfuerzo y apoyo incondicional siempre supieron estar en cada momento de mi vida*

*A mis hermanos que siempre estuvieron para apoyarme y darme su consejo*

**JAMES**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios, por darme esperanza en los momentos difíciles. A la profesora Isabel bravo Realpe ya que fue un pilar invaluable en la consecución de este trabajo  
Al profesor Edier Humberto Pérez por la paciencia y colaboración prestada en la finalización del documento escrito. A los jurados por la revisión de este documento.*

*A la Universidad del Cauca, al departamento de química y los profesores por sus enseñanzas y conocimientos transmitidos*

*A mi esposa Andrea Cabrera por su paciencia e incondicional apoyo en todos los momentos difíciles.*

*A mi Madre, Hermana y sobrino por ser un gran aliciente para la culminación de este trabajo.*

*A mi compañero de Tesis James Muñoz por toda la paciencia durante toda la realización de este proyecto y a mis compañeros de carrera, Raul Gutierrez, Fabian Muñoz, Alejandra Padilla, Diego Bolaños, y Diana Gomez por sus consejos y su incondicional amistad.*

**JHON**

*A Dios, cada oportunidad, logro y meta cumplida son gracias a Él  
A mi madre por su cariño su apoyo y por ser ejemplo de lucha y perseverancia  
A mi papá por enseñarme la honestidad, la humildad y la paciencia  
A la profesora Isabel Bravo Realpe por darme la oportunidad de emprender este proyecto, por su orientación, paciencia, entrega y profesionalismo  
A mi director: Edier Humberto Pérez por su tiempo y dedicación en la culminación de este proyecto  
A los jurados por su dedicación a la revisión de este documento  
A mis hermanos Socorro, Ernesto, Libia, Amparo, Mireya, Betty y a la memoria de Samuel y Laura, sin su ayuda el camino hubiera sido muy difícil  
A la Universidad del Cauca, al Departamento de química y sus profesores  
Al cabildo indígena del pueblo Totoró y la alcaldía del municipio por su apoyo  
A mi compañero de tesis Jhon Dorado por creer en este proyecto  
A mis amigos y compañeros de carrera por sus consejos y amistad*

**JAMES**

## CONTENIDO

pág.

### RESUMEN

### INTRODUCCIÓN

<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>2</b>
<b>2.1 OBJETIVO GENERAL</b>	<b>2</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	<b>2</b>
<b>3. MARCO TEORICO</b>	<b>3</b>
<b>3.1 RESIDUOS SÓLIDOS</b>	<b>3</b>
<b>3.2 CLASIFICACION DE LOS RESIDUOS</b>	<b>3</b>
3.2.1 Residuos Municipales	3
3.2.2 Residuos pecuarios	4
3.2.3 Residuos de cosecha	4
3.2.4 Residuos Hospitalarios	4
<b>3.3 COMPOSTAJE</b>	<b>4</b>
3.3.1 Materia prima	5
3.3.2 Proceso de compostaje	5
3.3.2.1 Fase mesofílica	5
3.3.2.2 Fase termofílica	6
3.3.2.3 Enfriamiento	6
3.3.2.4 Maduración	6

3.3.3 Factores que condicionan el proceso de compostaje	6
3.3.3.1 Tamaño de partícula	6
3.3.3.2 Relación carbono/nitrógeno	6
3.3.3.3 Contenido de humedad	7
3.3.3.4 Volteo/aireación	7
3.3.3.5 Temperatura	7
3.3.3.6 pH	8
3.3.3.7 Tamaño de la pila	8
<b>3.4 TECNOLOGIAS DE COMPOSTAJE</b>	8
3.4.1 Sistema abierto	8
3.4.1.1 Pilas con Volteo	9
3.4.1.2 Pilas Estaticas	9
3.4.2 Sistema semiabierto	9
3.4.3 Sistema cerrado	9
3.4.3.1 Reactores verticales	9
3.4.3.2 Reactores horizontales	10
<b>3.5 MICROBIOLOGÍA DEL COMPOSTAJE</b>	10
3.5.1 Bacterias	10
3.5.2 Actinomicetos	10
3.5.3 Hongos	11
3.5.4 Protozoos	11
<b>3.6. LOMBRICOMPOSTAJE</b>	11
3.6.1 Tipos de lombrices	11
3.6.2 Tipos de sustrato	12
<b>4. METODOLOGIA</b>	13

<b>4.1 UBICACIÓN GEOGRAFICA</b>	13
<b>4.2 ADECUACION Y ADAPTACIÓN DEL SITIO DE TRABAJO</b>	13
4.2.1 Infraestructura	13
4.2.1.1 Terreno	13
4.2.1.2 Construcción de la planta	13
4.2.1.3 Construcción cajones	14
4.2.1.4 Construcción cajones compost	14
4.2.1.5 Construcción cajones lombricompost	14
<b>4.3 DESCRIPCION DEL PROCESO DE COMPOSTAJE</b>	15
4.3.1 Recolección de la materia prima	15
4.3.2 Recepción de la materia prima	15
4.3.3 Clasificación de la materia prima	16
4.3.4 Trituración	16
4.3.5 Conformación de los cajones	16
4.3.6 Volteo	17
4.3.7 Control de humedad y aireación	17
4.3.8 Maduración	18
4.3.9 Tamizaje	18
4.3.10 Empacado	18
<b>4.4 SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE</b>	18
4.4.1 Toma y preparación de las muestras	18
4.4.2 Evaluación de parámetros físicos y químicos del proceso de compostaje	19
4.4.2.1 Análisis físicos	19

4.4.2.2	Análisis químicos	19
<b>4.5 DESCRIPCION DEL PROCESO DE LOMBRICOMPOSTAJE</b>		22
4.5.1	Recolección de la materia prima	22
4.5.2	Cultivo lombriz	22
4.5.3	Formación de los cajones	22
4.5.4	Alimentación de la lombriz	22
4.5.5	Maduración	23
4.5.6	Extracción lombricompost del cajón	23
4.5.7	Tamizaje	23
4.5.8	Empacado	23
<b>4.6 SEGUIMIENTO Y EVALUACION DEL PROCESO DE LOMBRICOMPOSTAJE</b>		23
4.6.1	Toma y preparación de las muestras	23
4.6.2	Evaluación de parámetros físicos y químicos del proceso de lombricompostaje	23
<b>4.7 EVALUACION DE LA CALIDAD Y GRADO DE MADUREZ EN EL COMPOST Y EL LOMBRICOMPOST</b>		23
4.7.1	Análisis Físicos	24
4.7.1.1	Humedad de campo	24
4.7.1.2	Humedad higroscópica	24
4.7.1.3	Densidad Real	24
4.7.1.4	Capacidad de retención de humedad.	24
4.7.1.5	Cenizas y pérdidas por volatilización	25
4.7.2	Análisis químicos	25
4.7.2.1	Contenido de carbono orgánico oxidable total y la materia orgánica	25
4.7.2.2	Contenido de nitrógeno total	25

4.7.2.3	Relación C/N	25
4.7.2.4	Determinación de la capacidad de intercambio catiónico	25
4.7.2.5	Determinación de fósforo total, potasio, calcio, magnesio, sodio, hierro, cobre, manganeso, zinc, azufre y los metales pesados cadmio, mercurio, plomo, níquel y cromo.	25
	Residuo insoluble en ácido	26
4.7.2.6	4.7.2.7 Fósforo asimilable	26
4.7.2.8	Carbonatos	26
	<b>4.8 EVALUACIÓN DEL GRADO DE CONDENSACIÓN DE LAS SUSTANCIAS HÚMICAS EN EL COMPOST Y LOMBRICOMPOST</b>	27
	<b>4.9 ANALISIS ESTADISTICO</b>	27
	<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	29
	<b>5.1 COMPOSICIÓN PORCENTUAL DE LA MEZCLA DE MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DEL COMPOST Y RELACIÓN C/N TEÓRICA</b>	29
	<b>5.2 SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE</b>	29
5.2.1	Análisis físicos	30
5.2.1.1	Temperatura	30
5.2.1.2	Humedad	34
5.2.2	Análisis químicos	36
5.2.2.1	pH	36
5.2.2.2	Materia orgánica	37
5.2.2.3	Relacion carbono nitrógeno(C/N)	38
5.2.3	Evaluación de la calidad y grado de madurez en el compost	40
	<b>5.3. SEGUIMIENTO Y EVALUACION DEL PROCESO DE LOMBRICOMPOSTAJE</b>	42
5.3.1	Evaluación de parámetros físicos y químicos del proceso de lombricompostaje	42

5.3.2 Evaluación de la calidad y grado de madurez en el lombricompost	44
<b>5.4 EVALUACION DEL GRADO DE CONDENSACION DE LAS SUSTANCIAS HUMICAS</b>	46
<b>5.5 COMPARACION ENTRE COMPOST Y LOMBRICOMPOST</b>	47
<b>6. CONCLUSIONES</b>	55
<b>7. RECOMENDACIONES</b>	57
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	58
<b>ANEXOS</b>	67

## LISTA DE ACRÓNIMOS

- ACODAL:** Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
- ANOVA:** Análisis de varianza
- C/N:** Relación carbono/nitrógeno
- Ca:** Calcio
- CAF:** Carbono de ácidos fúlvicos
- CAH:** Carbono de ácidos húmicos
- CEHT:** Carbono del extracto húmico total
- CaO:** Oxido de calcio
- CIC:** Capacidad de intercambio catiónico
- Cd:** Cadmio
- CO:** Carbono orgánico
- Cr:** Cromo
- Cu:** Cobre
- EAA:** Espectroscopia de Absorción Atómica
- FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura
- Fe:** Hierro
- FORPROT:** Asociación para el fortalecimiento de los productos orgánicos
- Hg:** Mercurio
- HR<sub>2</sub>:** Índice de humificación
- K:** Potasio
- K<sub>2</sub>O:** Óxido de Potasio
- L1:** Tratamiento de Lombricompost número 1
- L2:** Tratamiento de Lombricompost número 2

**Mg:** Magnesio

**Mn:** Manganeso

**MgO:** Óxido de magnesio

**MO:** Materia orgánica

**N:** Nitrógeno

**Ni:** Níquel

**Na:** Sodio

**P:** Fósforo

**Pb:** Plomo

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:** Óxido de fósforo (V)

**RSM:** Residuos sólidos municipales

**RSO:** Residuos sólidos orgánicos

**S:** Azufre

**T1:** Tratamiento de compost número 1

**T2:** Tratamiento de compost número 2

**T3:** Tratamiento de compost número 3

**T4:** Tratamiento de compost número 4

**Zn:** Zinc

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Composición de los residuos sólidos	17
<b>Tabla 2.</b> Parámetros de calidad y madurez de los tratamientos T1 a T4	41
<b>Tabla 3.</b> Caracterización inicial del sustrato y final del producto obtenido en el lombricompost (L1)	42
<b>Tabla 4.</b> Caracterización inicial del sustrato y final del producto obtenido en el lombricompost (L2)	43
<b>Tabla 5.</b> Parámetros de calidad y madurez del lombricompost (L1 y L2).	45
<b>Tabla 6.</b> Grado de condensación de las sustancias húmicas en todos los tratamientos.	47

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Ubicación de la planta de compostaje	13
<b>Figura 2.</b> Fotos de la construcción de la planta de compostaje	14
<b>Figura 3.</b> Fotos de la construcción de los cajones de compostaje, cajones iniciales (a), cajones finales (b).	15
<b>Figura 4.</b> Foto del cajón de lombricompostaje	15
<b>Figura 5.</b> Foto de la galería del municipio de Totoró	16
<b>Figura 6.</b> Foto de la composición de las capas de materiales para el llenado del cajón	17
<b>Figura 7.</b> Foto del termómetro bimetálico	19
<b>Figura 8.</b> Foto del cultivo de lombriz	22
<b>Figura 9.</b> Esquema para la determinación de carbono en las sustancias húmicas	28
<b>Figura 10.</b> Variación de la temperatura respecto al tiempo del tratamiento T1	31
<b>Figura 11.</b> Variación de la temperatura respecto al tiempo del tratamiento T2	31
<b>Figura 12.</b> Variación de la temperatura respecto al tiempo del tratamiento T3	32
<b>Figura 13.</b> Variación de la temperatura respecto al tiempo del tratamiento T4	32
<b>Figura 14.</b> Foto de la distribución de los huecos en el cajón de compost	34
<b>Figura 15.</b> Variación de la humedad respecto al tiempo en los tratamientos T1 a T4.	35
<b>Figura 16.</b> Variación del pH respecto al tiempo en los tratamientos T1 a T4.	37
<b>Figura 17.</b> Variación del contenido de materia orgánica respecto al tiempo de los tratamientos T1 a T4.	38
<b>Figura 18.</b> Evolucion de la relación C/N de los diferentes tratamientos respecto al tiempo.	39
<b>Figura 19.</b> Densidad, cenizas, carbonatos, CEHT, CAH, y CAF de la muestra final de compost y lombricompost	48

<b>Figura 20.</b> Fosforo total y asimilable, azufre, residuo insoluble en acido, níquel y cromo muestra final de compost y lombricompost	50
<b>Figura 21.</b> CO, MO, N, relación C/N, pH y CIC muestra final de compost y lombricompost	51
<b>Figura 22.</b> Contenido de CaO, MgO, Na y K <sub>2</sub> O (%) muestra final de compost y lombricompost	52
<b>Figura 23.</b> Fe, Cu, Mn y Zn (ppm) muestra final de compost y lombricompost	53

## RESUMEN

La creciente producción de residuos de toda índole compromete la disponibilidad de sitios de vertido en condiciones ambientales aceptables. Siendo la gestión de residuos sólidos uno de los mayores problemas que enfrenta la sociedad actual. En el municipio de Totoró se producen semanalmente alrededor de 2 toneladas de residuos orgánicos las cuales no se disponen adecuadamente. Las tecnologías de tratamiento de residuos orgánicos tales como el compostaje y lombricompostaje son ampliamente consideradas como un método limpio y sostenible para la gestión de estos residuos con el fin de aprovechar este recurso y evitar problemas ambientales. Este trabajo pretende realizar el aprovechamiento técnicamente viable de los residuos orgánicos generados en el municipio de Totoró por medio de la producción y evaluación del proceso de compostaje y lombricompostaje y la evaluación de la calidad del producto final.

Para ello se implementó la compostación en 4 cajones (T1, T2, T3, T4) con capacidad de 500 Kg de residuos orgánicos de galería cada uno y 2 para lombricompostaje (L1 y L2), se controló la temperatura 3 veces al día durante 3 meses y se tomó muestras cada 15 días desde el inicio del proceso y hasta los 3 meses. Durante el proceso se determinó: humedad, pH, materia orgánica (MO), nitrógeno (N) y relación C/N, al final del proceso tanto para el compostaje como para el lombricompostaje se evaluó los parámetros, capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad, fracción húmica, macro y micronutrientes (P, Ca, Mg, Na, K, Fe, Cu, Mn, Zn, S), cenizas, carbonatos y metales pesados (Cd, Cr, Hg, Ni y Pb).

Las características finales de los compost T1, T2, T3, T4, L1 y L2 fueron: pH: 8.62, 8.78, 8.67, 9.19, 8.29, 8.68, MO: 25.18, 26.92, 30.12, 45.38, 41.83, 38.25 %, N: 0.43, 1.23, 1.47, 1.47, 1.71, 1.89 %, C/N: 31.87, 10.96, 10.28, 15.61, 12.22, 10.13, CIC: 11.95, 15.22, 13.11, 14.95, 43.83, 49.43 meq/100g respectivamente.

Los resultados mostraron que la aireación permitió realizar un mejor control de la temperatura y afectó positivamente las propiedades del producto final, encontrándose que T4 presentó adecuadas propiedades físicas y químicas y T1 por el contrario presenta deficiencia en dichas propiedades. T2 y T3 se encuentran en un rango intermedio.

El proceso de compostaje podría ser una herramienta para estabilizar los residuos de galería minimizando su impacto en el medio ambiente.

## INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos pueden definirse como todo material que ha sido destinado al abandono por su productor o poseedor, pudiendo resultar de un proceso de fabricación, transformación, utilización, consumo o limpieza (Barradas, 2009). En Colombia del total de los desechos generados cerca de un 70% lo constituyen los residuos sólidos orgánicos urbanos, por tal motivo se constituye en una prioridad ambiental buscar un manejo adecuado de los mismos, potenciando así los productos finales y minimizando un gran número de impactos ambientales que podrían ser generados por ellos, sin una disposición seria y responsable en cuanto a la normatividad vigente (Jaramillo y Zapata, 2008).

En el departamento del Cauca, municipio de Totoró, se genera una alta cantidad de residuos o desechos sólidos provenientes del casco urbano y las zonas rurales que de manera tradicional son quemados y/o arrojados sobre fuentes hídricas, o al suelo, produciendo contaminación en todas las fases ambientales. Estos residuos, contienen Materia Orgánica biodegradable, la cual mediante condiciones físicas y químicas apropiadas, puede ser transformada enzimáticamente para obtener recursos útiles para el sector agropecuario y a su vez contribuir a la descontaminación ambiental.

Una opción viable en el manejo de los residuos sólidos urbanos es el proceso de compostaje, en cuyo proceso intervienen numerosos y variados microorganismos que requieren humedad, aireación, relación C/N, pH y otros parámetros químicos adecuados. Implica el paso por una etapa termofílica y una producción natural de fitotoxinas y bajo condiciones controladas origina productos como CO<sub>2</sub>, agua y minerales, así como una MO estabilizada, libre de fitotoxinas y dispuesta para su empleo en agricultura sin que provoque fenómenos adversos cuando es aplicada al suelo (Mathur *et al.*, 1993).

Finalmente, los residuos inorgánicos inertes o minerales generados durante el proceso de compostaje y lombricompostaje se pueden incorporar a la estructura del suelo, de los microorganismos y de las plantas produciendo beneficios ambientales, sociales, económicos y de salubridad al entorno (Jaramillo y Zapata, 2008). Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario la implementación de un sistema de compostaje en el municipio de Totoró para así contribuir con una solución en la problemática del manejo de los residuos sólidos urbanos

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El manejo de los residuos municipales, Agroindustriales, Pecuarios y de Cosechas, constituye uno de los problemas ambientales y sociales en el municipio de Totoró, estos residuos tradicionalmente llamados basuras han sido arrojadas indiscriminadamente sobre las fuentes hídricas, huertas e incluso botaderos sobre lotes adyacentes a los centros poblados. El 74% de las veredas quema basura y la entierran, el 5% la arrojan al río o quebrada, el 77% arrojan la basura biodegradable a la huerta, generando serios problemas ambientales, mientras que solo el 13% de la basura es utilizada en el proceso de compostaje, pero sin ningún control técnico científico que permita ajustarse a la norma ICONTEC NTC 5167 segunda actualización, para obtener un producto sano y estable física y químicamente. El uso de compost inmaduros pueden generar riesgos tales como: disminución de la concentración de oxígeno en la zona radical; residuos con elevada relación C/N que produce inmovilización del nitrógeno, generando una competencia por éste en el suelo entre los microorganismos y las plantas; aumento de la temperatura del suelo, lo que es incompatible con el desarrollo vegetal; acumulación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular y de otros metabolitos orgánicos que son fitotóxicos; destrucción incompleta de organismos patógenos, como consecuencia de una compactación o una mala aireación de los residuos durante el compostaje.

En el municipio de Totoró, la producción de residuos sólidos es de 2,32 Ton/semana y la recolección se hace una vez por semana, y son transportados a la ciudad de Popayán, trasladando parte del problema a esta ciudad. El aprovechamiento de estos residuos dentro del municipio mediante el proceso de compostaje sería una estrategia adecuada para contribuir a la seguridad alimentaria de la región, con la obtención de abonos orgánicos, los cuales además pueden ser comercializados generando una fuente de empleo directo e indirecto para los habitantes de este municipio.

Con este proyecto se pretende implementar una planta de compostaje para la producción de abono orgánico, con el fin de contribuir con una forma eficiente en el manejo de residuos sólidos municipales, aportando así a la mitigación de la contaminación ambiental y al desarrollo rural.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Implementar, optimizar y evaluar el proceso de compostaje, de diferentes residuos orgánicos generados en la vereda Betania municipio de Totoró, con el propósito de contribuir a la minimización de riesgos ambientales y obtener un abono maduro debidamente formulado útil para los suelos de la región.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Implementar la infraestructura necesaria para desarrollar el proceso de compostaje y lombricompostaje en la vereda Betania, municipio de Totoró, mediante la integración de la comunidad del Cabildo Indígena de Totoró.
- Evaluar el proceso de compostaje mediante los diferentes parámetros físicos y químicos requeridos para tal fin.
- Evaluar el compost obtenido de acuerdo a la norma Técnica Colombiana ICONTEC NTC 5167 segunda actualización y parámetros establecidos por la sociedad internacional de sustancias húmicas.
- Evaluar la calidad del compost de acuerdo a la norma NTC 5167 para asegurar que su aplicación mejore las condiciones edáficas del suelo.

### **3. MARCO TEÓRICO**

Los residuos sólidos municipales representan un porcentaje importante en la generación de residuos especialmente en países desarrollados. En Colombia un primer cálculo realizado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACODAL), indica que en el país se producen al día unas 31 mil toneladas de residuos sólidos, de los cuales un 85% que pueden ser aprovechables están teniendo como destino los rellenos sanitarios, es decir que de las 11'315.000 toneladas al año que genera Colombia 9'617.750 están siendo tirados a la basura. Además, un 60% de los residuos sólidos son orgánicos con lo cual se está desaprovechando la posibilidad de transformarlos en abonos (LATINPYME, 2014).

Por otra parte, estos volúmenes destacan la importancia de una adecuada gestión de los Residuos Sólidos Municipales (RSM) en el país. La mejor manera de reducir el impacto real de los RSM y de los residuos en general, es minimizar su generación y para esto se deben encontrar alternativas para la gestión de los residuos, especialmente para el tratamiento de los residuos biodegradables donde los métodos biológicos son ambientalmente los más eficientes para el tratamiento de residuos orgánicos.

#### **3.1. RESIDUOS SÓLIDOS.**

Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final (Riascos,1998).

#### **3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS.**

Los residuos sólidos se pueden clasificar de acuerdo a su composición, fuente generadora y por el impacto en el medio ambiente (Riascos,1998).

##### **3.2.1 Residuos municipales**

También llamados residuos urbanos, son los generados en las viviendas, comercio, oficina, establecimientos, escuelas hospitales, mantenimiento de vías y espacios públicos.

### **3.2.2 Residuos pecuarios**

Los desechos de las explotaciones pecuarias que incluyen las excretas fecales y urinarias de animales, desperdicios de alimento y las aguas de lavado más las pérdidas involuntarias de ésta y otros materiales como pajas y aserrines usados como cama. Los residuos pecuarios constituyen una fuente importante de carbono, nitrógeno y microorganismos por lo que su uso correcto constituye una fuente de potencial riqueza.

### **3.2.3 Residuos de cosecha**

Son los materiales que quedan después de recoger el producto principal del cultivo. Entre los más abundantes se encuentran: Los residuos de cosecha del maíz como: cascarrón, capacho y mata seca o rastrojo, de la yuca como: hojas tallos, del frijón como: hojas, vainas y tallos tiernos, del café como: la cascarrilla.

Los residuos de cosecha son generados en grandes volúmenes y generalmente se acumulan o lanzan a los ríos causando contaminación originada por la materia orgánica (MO) que no ha sido transformada adecuadamente.

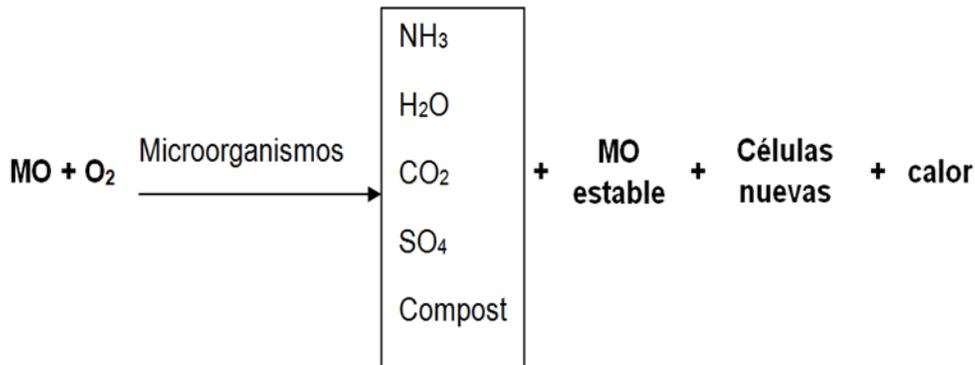
### **3.2.4 Residuos hospitalarios**

Restos del trabajo clínico o de investigación. El manejo de estos residuos actualmente no es el más adecuado debido a que no se aplica el debido reglamento. La composición de los residuos hospitalarios varía desde el residuo tipo residencial y comercial, a residuos de tipo médico que contienen sustancias peligrosas.

## **3.3. COMPOSTAJE**

El compostaje es un proceso biológico controlado que permite la degradación y estabilización de la MO por parte de microorganismos aerobios (Haug, 1993). Con una adecuada humedad y sustratos orgánicos heterogéneos, se asegura una transformación higiénica de los restos orgánicos en un material homogéneo, biológicamente estable como el humus, libre de agentes patógenos y asimilables por las plantas (Mathur ; *et al*,1993).

Es un proceso muy versátil que puede aplicarse a muchos tipos de materiales y mezclas, a diferentes escalas de trabajo empleando o no equipos especializados. El proceso de compostaje se puede describir por medio de la ecuación 1 Planas (2003).



Ecuación 1

Bacterias y hongos se encargan de la **fase mesofílica**, estos microorganismos inician la degradación de fuentes sencillas de carbono y nitrógeno como fuentes de energía expulsando  $\text{CO}_2$  y generando calor (Amner *et al.*, 1988). El calor generado aumenta la temperatura por encima de los  $40\text{ }^\circ\text{C}$  iniciando la **fase termofílica**, la cual alcanza su actividad máxima entre  $60$  y  $65\text{ }^\circ\text{C}$  y donde la MO alcanza su bioestabilización a través de reacciones bioquímicas de oxidación llevadas a cabo por los microorganismos termofílicos, hay un incremento del pH debido a la liberación de amonio proveniente de la degradación de proteínas (Sharp *et al.*, 1991). La fase termofílica es importante porque en ella se inactivan e inviabilizan semillas, hierbas y microorganismos patógenos. Al agotarse las fuentes de alimento disminuyen las comunidades de microorganismos y comienza un descenso en la temperatura. A partir de ese momento inicia la fase de enfriamiento y los microorganismos mesofílicos se reactivan por debajo de  $50\text{ }^\circ\text{C}$ . Bacterias y hongos degradan celulosa, lignina y lignoproteína, el pH vuelve a descender. La **fase de maduración** es la etapa final del proceso, en esta etapa la temperatura baja hasta alcanzar la temperatura ambiente actuando mohos y actinomicetos que contribuyen a la estabilización del compost (Grossi, 1993).

### 3.3.1. Materia prima

Los residuos orgánicos contienen gran variedad de materiales que pueden ser compostados y susceptibles de ser degradados por una amplia variedad de microorganismos que pueden hacer más rápido el proceso, entre las fuentes más tradicionales se tienen: estiércoles, desechos de galería, desechos agrícolas y residuos orgánicos urbanos. (Bongcam, 2003).

### 3.3.2. Proceso de compostaje

#### 3.3.2.1 Fase mesofílica

Es la primera fase del compostaje e inicia a temperatura ambiente, se consumen rápidamente azúcares, almidón, proteínas y grasas, liberando gran cantidad de energía lo que ocasiona el aumento de la temperatura hasta los  $40\text{ }^\circ\text{C}$ , predominan

principalmente bacterias, levaduras, mohos y actinomicetos mesofílicos, el pH baja un poco debido a la producción de ácidos orgánicos, el aumento de la temperatura produce un aumento de organismos termófilos (Soto y Meléndez, 2003).

### **3.3.2.2 Fase termofílica**

En la segunda fase del proceso la temperatura se incrementa de 40 a 70 °C, alcanzando una actividad termofila máxima. Estas temperaturas se deben mantener por 6 días para asegurar que el compostaje quede libre de patógenos. Más tiempo o temperaturas más altas causan muerte de microorganismos importantes y la degradación de ceras, proteínas y hemicelulosa. Igualmente asegura la muerte de malas hierbas y microorganismos patógenos (Jaramillo y Zapata, 2008). El pH sube debido a la degradación de ácidos orgánicos y a la liberación de amoníaco proveniente de la descomposición de las proteínas.

### **3.3.2.3 Enfriamiento**

Una vez se agota la MO biodegradable, se inicia una etapa de enfriamiento reaparecen los microorganismos mesófilos; moléculas complejas como lignina y lignoproteína son degradadas por enzimas extracelulares y el pH desciende levemente (Palmisano y Barlaz, 1996)

### **3.3.2.4 Maduración**

En la última fase del proceso la temperatura continúa descendiendo hasta alcanzar la temperatura ambiente. La mayor parte del alimento ha sido consumido por los microorganismos e inicia su disminución poblacional y se producen complejas reacciones de condensación que estabilizan la MO dando como resultado complejos conocidos como humus o ácidos húmicos. (Cegarra, 1994).

## **3.3.3. Factores que condicionan el proceso de compostaje**

### **3.3.3.1 Tamaño de partícula**

El tamaño de partícula debe ser óptimo, ya que si es muy fino formara una pasta compacta que impide la entrada y circulación de aire, resultando esto en condiciones anaeróbicas. Por otra parte, si las partículas tienen un tamaño muy grande se disminuye la superficie de ataque de los microorganismos y la descomposición es más lenta (Corominas y Pérez, 1984).

### **3.3.3.2 Relación carbono/nitrógeno (C/N)**

La eficiencia del compostaje puede variar en un amplio intervalo, dependiendo del tipo de residuos orgánicos y sus características. Se sabe que uno de los factores cruciales para lograr un proceso de compostaje eficaz es la relación C/N de la

materia prima. El Carbono Orgánico (CO) es fuente de energía en los procesos metabólicos y el N hace parte del material básico para la síntesis de material celular, la relación C/N es muy importante y deseable que este entre 25:1 a 50:1. Cegarra (1994) reporta que los microorganismos generalmente utilizan 30 partes de carbono por cada parte de nitrógeno, una alta concentración de CO limita la síntesis de material celular, por otra parte una baja relación C/N ocasiona pérdidas de nitrógeno como amonio y toxicidad para las plantas (Ciavatta, 2001).

### **3.3.3.3 Contenido de Humedad**

El contenido de humedad está relacionado con el contenido de aire en el interior del compost y con el crecimiento microbiano, es importante evitar un exceso de humedad ya que el agua desplaza el aire y se producen condiciones anaeróbicas y malos olores. Por otra parte, un contenido bajo de humedad disminuye la actividad de los microorganismos. Un nivel óptimo de humedad está en un rango entre 40 y 60% (Silva *et al.*, 2003).

### **3.3.3.4 Volteo/aireación**

El oxígeno es esencial para el metabolismo de los microorganismos y es necesario que se encuentre homogéneamente distribuido por todo el cajón. Para conseguir una correcta distribución del oxígeno es necesario agregar un material (como el aserrín), que proporcione estructura y porosidad a los sustratos a compostar. La aireación tiene un doble sentido, por una parte, suministrar oxígeno a los microorganismos y por otra evacuar el CO<sub>2</sub> producido. El volteo mecánico es la manera convencional de airear el compostaje además de conseguir la homogeneización del material. La frecuencia de volteo depende de las necesidades del sistema y puede realizarse cada 15 días. (Muñoz, 2005).

### **3.3.3.5 Temperatura**

La variación de la temperatura es la primera manifestación del proceso oxidativo que ocurre al compost y la forma más conveniente y significativa de monitorear el progreso del compostaje (Fogiel, 2003). En cada fase de temperatura se presentan diferentes grupos de microorganismos. Al principio el proceso inicia a temperatura ambiente ascendiendo hasta alcanzar temperaturas por encima de los 60 °C, según Coyne (1999), entre mayor sea la diversidad biológica de los materiales, más rápido será la variación de la temperatura. Si la temperatura excede los 71°C debe voltearse para liberar calor ya que de otro modo se mueren los microorganismos que descomponen la MO. Por otra parte, la temperatura es un indicador del grado de madurez del compost como indica García *et al.*, (1992).

### 3.3.3.6 pH

El pH del material inicial debe estar cercano a la neutralidad, en un rango óptimo entre 5,5 y 7,7 (Jaramillo y Zapata, 2008). Los valores de pH varían de acuerdo a la composición de los materiales iniciales y a los productos de la degradación de la MO. Al inicio del proceso el pH disminuye debido a la producción de ácidos orgánicos. En una segunda etapa esos mismos ácidos son consumidos por otras poblaciones de microorganismos y además se genera  $\text{NH}_4^+$  que contribuye a aumentar el pH. La determinación del pH puede ser un buen indicativo del grado de evolución del compostaje, puesto que como se dijo antes al principio baja levemente, para luego subir a medida que el material se estabiliza. (Tchobanglous *et al.*, 1996).

### 3.3.3.7 Tamaño de la pila

Las dimensiones de la pila dependen principalmente de la cantidad y tipo de materiales a compostar, del espacio con que se cuenta y el tipo de proceso de compostaje. Según Cooperband (2002) la altura y ancho de una pila de compostaje dependen de la porosidad y el contenido de humedad. Pilas pequeñas pueden mantener saturaciones de oxígeno más altas que una pila grande, pero por otra parte, pilas grandes pueden mantener mejor altas temperaturas.

## 3.4. TECNOLOGÍAS DE COMPOSTAJE

La clasificación más común se realiza en función del asilamiento del material a compostar con respecto al exterior, en cuyo caso se tendrían sistemas abiertos, semi-cerrados, y cerrados. En ellos la variable que más incide es el suministro de oxígeno mediante diferentes métodos de aireación. (Moreno, 2008).

Las técnicas de compostaje generalmente se dividen en sistemas cerrados y sistemas abiertos. Los primeros se hacen al aire libre y los segundos se hacen bajo techo. A la hora de decidir cuál sistema emplear es necesario tener en cuenta los siguientes factores: tiempo de compostaje, requisitos de espacio, material de partida y condiciones climáticas del lugar (FAO, 2013).

**3.4.1 Sistema abierto.** Los sistemas abiertos suelen ser de bajo costo y tecnología sencilla fácil de aplicar, principalmente a pequeñas o medianas comunidades de zonas en las que la disponibilidad de terreno sea elevada. El compostaje en pilas es la forma más simple de disponer los residuos orgánicos. (Moreno, 2008).

#### **3.4.1.1 Pilas con volteo.**

En este tipo de compostaje el material es oxigenado periódicamente por medio del volteo con el objetivo de controlar la temperatura y aireación. Para mantener altas temperaturas es necesario que se tengan grandes volúmenes de MO para compensar el calor perdido por las superficies expuestas. En estos sistemas las dimensiones de la pila suelen ser de entre 1,5 y 2 m de alto de altura y base de entre 2,5 y 3 m, (Stoffella y Kahn, 2003).

#### **3.4.1.2 Pilas estáticas**

*Aireación natural:* La ventilación es natural a través de los espacios del material a compostar.

*Aireación forzada:* en este sistema se proporciona aire a través de canales o tubos instalados en la base de la pila los cuales se encuentran perforados y conectados a un soplador o una bomba de vacío que proporcionan el aire necesario. Se puede realizar con aire por succión, con aire soplado controlando la temperatura, con ventilación alternante (succión y soplado) y control de temperatura. (Stoffella y Kahn, 2003).

#### **3.4.2 Sistema semiabierto**

Se trata de un sistema similar a las pilas volteadas pero la principal diferencia es que, en el compostaje en canal el material a tratar es colocado entre dos paredes. Estos se denominan, canales, calles o trincheras y suelen medir entre 2 y 5 metros de ancho, las paredes pueden variar entre 1 y 3 metros de altura. Dichos canales pueden llegar a medir hasta 50 m de largo. (Chica y García, 2008).

#### **3.4.3. Sistema cerrado**

Este método favorece su replicación y evita que esté en contacto con los elementos. Protege de lluvias, vientos, facilita labores de volteo y recolección de lixiviados. Según Ward (2002), estos sistemas son los más usados para el tratamiento de cantidades a pequeña y a mediana escala.

##### **3.4.3.1 Reactores verticales**

Los reactores de flujo vertical suelen tener alturas superiores a los 4 m. Pueden ser continuos o discontinuos. Los reactores discontinuos contienen, a diferentes alturas pilas de entre 2 a 3 m con aireación forzada o volteando el material a pisos inferiores. En este sistema el reactor descansa sobre su base. El material a compostar se introduce por la parte superior y el material compostado se extrae generalmente por la parte inferior. Este sistema permite una fácil manipulación y es adecuado para volúmenes pequeños. (Muñoz, 2005).

### **3.4.3.2 Reactores horizontales**

Es un dispositivo discontinuo debido a que es un proceso por cargas. Una vez cargado con los residuos a compostar, se deja que el proceso termine para sacar el material compostado e iniciar nuevamente el proceso. Los reactores de flujo horizontal se dividen entre aquellos que poseen un depósito rotatorio, los que poseen un depósito de geometría variable con un dispositivo de agitación o los que no poseen un sistema de agitación y permanecen estáticos (Muñoz, 2005).

## **3.5. MICROBIOLOGÍA DEL PROCESO**

El proceso de compostaje implica la degradación de los materiales por parte de los microorganismos dando como resultado un producto final estable. Los microorganismos que intervienen en el proceso de compostaje pertenecen a diversas categorías. Las más importantes son bacterias, actinomicetos y hongos, aunque también intervienen protozoos (Laich, 2011).

### **3.5.1 Bacterias**

Las bacterias son los organismos vivos más pequeños y los más numerosos en el procesos de compostaje, de manera que constituyen del 80% al 90% de los microorganismos existentes en un gramo de compost y son los responsables de la mayoría de los procesos de descomposición así como de la producción de energía calorífica. Se trata de un grupo de gran diversidad metabólica, usando un amplio rango de enzimas que degradan químicamente una gran variedad de materiales orgánicos.

Las bacterias que participan en el compostaje son mesófilas y termófilas. Las primeras son las que normalmente se encuentran en el suelo vegetal y producen ácidos. Las segundas son las responsables de la degradación de proteínas, lípidos y grasas. (Luque,1997).

### **3.5.2 Actinomicetos**

Son organismos que se asemejan a hongos pero son realmente bacterias filamentosas. Carecen de núcleo pero crecen formando filamentos multicelulares como los hongos. En el compostaje desempeñan un papel importante ya que degradan compuestos orgánicos complejos, tales como la celulosa, lignina, quitina y proteínas. Sus enzimas les permiten degradar químicamente los desechos duros como por ejemplo: cortezas, tallos, troncos, raíces y papeles. Ciertas especies aparecen durante la fase termofílica y otras llegan a ser importantes durante la fase de enfriamiento, cuando solamente quedan los compuestos resistentes no degradados en fases anteriores a la formación del compost. Los actinomicetos tienen forma alargada, se extienden a modo de tela de araña por toda la masa de compostaje. Asumen la dirección durante las etapas finales de descomposición, y

son frecuentemente productores de antibióticos que inhiben crecimiento bacteriológico (Luque, 1997).

### **3.5.3 Hongos**

Son organismos eucariotas, osmótrofos, unicelulares o multicelulares, carecen de clorofila y tienen una pared celular rígida (formada por quitina y celulosa). Son los responsables de la descomposición de muchos polímeros complejos de la planta, tanto en el suelo como en el proceso de compostaje. En el compost los hongos son importantes porque degradan los desechos resistentes, permitiendo a las bacterias continuar el proceso de descomposición una vez que la mayoría de la celulosa ha sido degradada, estos se separan y crecen produciendo muchas células y filamentos, y pueden atacar los residuos orgánicos que son demasiado secos, ácidos o tienen bajo contenido de nitrógeno para la descomposición bacteriana. Los hongos son numerosos durante las fases mesofílica y termofílica. Cuando las temperaturas son altas gran parte de ellos se encontrarán en la capa externa del compost (Luque, 1997).

### **3.5.4 Protozoos**

Los protozoos son animales microscópicos unicelulares, eucariotas y heterótrofos. Los encontramos en la fracción del agua del compost. Su papel en la descomposición es de menor importancia. Obtienen su alimento de la misma forma que las bacterias, pero además actúan como consumidores secundarios ingiriendo bacterias y hongos. (Soto y Meléndez, 2003).

## **3.6 LOMBRICOMPOSTAJE**

Entre las definiciones de lombricomposta se ha encontrado que: es la excreta de la lombriz, material también conocido como vermicomposta o humus de lombriz (Martínez, 1996). Así mismo la lombricomposta es un sustrato estabilizado de gran uniformidad, contenido nutricional y excelente estructura física, porosidad y capacidad de retención de humedad (Abad *et al.*, 1993).

### **3.6.1 Tipos de lombrices**

Las lombrices utilizadas durante el proceso de lombricompostaje deben cumplir con ciertos requisitos como son la tasa de reproducción alta (Schuldt, 2008), baja tendencia a la migración (Chacón y Blanco, 1999), capacidad de vivir en poblaciones altas de entre 40 a 50 mil individuos por m<sup>2</sup> (Guerrero, 1993) y no ser vectores de enfermedades (Bollo, 1999). Entre los diferentes tipos de lombrices se encuentran la *Eisenia foetida* o lombriz roja californiana, la *Eisenia andrei*, la

*Eudrilus eugeniae* y la *Helodrilus caliginosus* de acuerdo a Ferruzzi (1986) y a Bollo(1999),entre las que destaca la *Eisenia foetida* de gran uso a nivel mundial.

### **3.6.2 Tipos de sustrato**

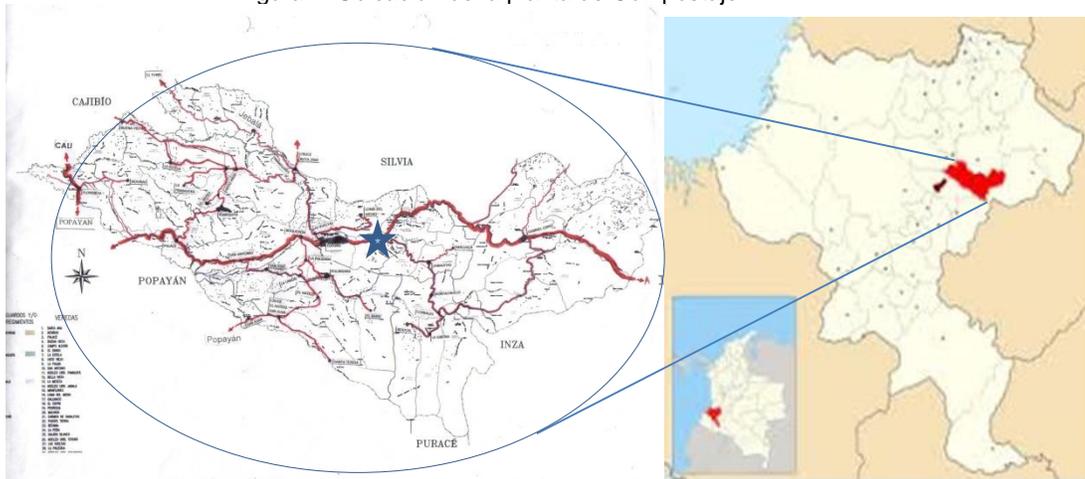
Entre los sustratos utilizados se encuentran los desechos de animales como las excretas vacunas, gallinaza, porcinaza y equinaza (Morales-Mungia *et al*, 2009); los sólidos municipales y residuos domésticos (Duran y Henriquez, 2009);los residuos agroforestales como la broza de café, residuos de banano, restos de follaje ornamentales, aserrín y residuos de pastos(Duran y Henriquez,2009).

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La planta de compostaje se encuentra ubicada en la Vereda Betania del municipio de Totoró en el Km 26 de la vía Popayán-Inzá (Figura 1). Las coordenadas son 2° 30' 39.733" N 76° 22' 33.499" W a una temperatura media de 14 °C, teniendo en cuenta como distancia de referencia 2,55 Km a la Cabecera del municipio de Totoró y a 32,55 Km aproximadamente de la ciudad de Popayán, con una altura aproximada de 2750 m.s.n.m.

Figura 1. Ubicación de la planta de Compostaje



### 4.2. ADECUACIÓN Y ADAPTACIÓN DEL SITIO DE TRABAJO

**4.2.1. Infraestructura.** Se llevó a cabo la construcción de la planta de compostaje, los cajones de compost y de lombricompost.

#### 4.2.1.1 Terreno

Inicialmente se explanó un área de 20 m de largo por 10 m de ancho donde se construyó la planta de compostaje.

#### 4.2.1.2 Construcción de la Planta

La planta de compostaje se construyó con guaduas, orillos de pino, tablas y palos de eucalipto, materiales estos amigables con el ambiente de bajo costo y fácil consecución en la región (Cruz, 1994). En el área seleccionada se clavaron palos de eucalipto y pino para dar la forma a la planta y la guadua se utilizó como sostén

para el techo (Figura 2). Además, se utilizó polisombra verde y esterilla para recubrir las paredes de la planta. El techo se construyó con guadua y láminas de zinc.

Figura 2. Foto de la construcción de la planta de compostaje



#### **4.2.1.3 Construcción Cajones**

Los cajones se construyeron con orillos de madera para favorecer la movilidad en caso de necesitar trasladar los cajones.

#### **4.2.1.4 Construcción Cajones Compost**

Inicialmente se construyeron 2 cajones clavando pilares de eucalipto que formaron 2 cajas cada una de 1 m de ancho por 2 m de largo y 1 m de alto y se recubrieron con orillos de pino como se observa en la figura 3a. Posteriormente se aumentó la cantidad de cajones uno al lado del otro (figura 3b).

#### **4.2.1.5 Construcción Cajones Lombricompost**

Se usaron tablas con los que se construyen cajones de 2 m largo, 1 m de ancho y 40 cm de alto, la cual se inclina para favorecer la depuración de los lixiviados generados durante el proceso (figura 4).

Figura 3. Fotos de la construcción de los cajones de compostaje, cajones iniciales (a) y cajones finales (b).



(a) Cajones iniciales

(b) Cajones finales

Figura 4. Foto del Cajón de lombricompostaje



## 4.3 DESCRIPCION DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

### 4.3.1 Recolección de la Materia Prima

Los residuos orgánicos fueron recolectados en la galería del municipio de Totoró por personal de la Asociación para el Fortalecimiento de los Productos Orgánicos (FORPROT) los días martes (figura 5).

### 4.3.2. Recepción de la Materia Prima

Los residuos sólidos orgánicos fueron transportados todos los martes a la planta por personal de FORPROT. Se recibió en promedio entre 500 y 700 Kg de residuos por semana. Los residuos de la primera entrega (primer martes del mes) se extienden y se dejan secar un poco. Los residuos de la segunda entrega (segundo martes), se mezclan con los anteriores para ya tener los residuos necesarios para la formación del primer cajón. Para el segundo cajón se repite el proceso el tercer y cuarto martes del mes, para así obtener un total de 2 cajones de compost

mensualmente. Este proceso continua hasta obtener un total de 4 cajones los cuales fueron denominados como T1, T2, T3 y T4 respectivamente.

Figura 5. Foto de la Galería del municipio de Totoró



#### **4.3.3. Clasificación de la materia prima**

La alcaldía de Totoró mediante educación y concientización con los vendedores y comerciantes de la galería municipal se encargó de que ellos separaran los residuos sólidos orgánicos (RSO) generados de hortalizas, frutas y verduras, además que fueran recogidos y transportados a la planta de compostaje donde se pesan y se determina la composición porcentual para conocer la relación C/N (teórica) antes de iniciar el proceso de compostaje.

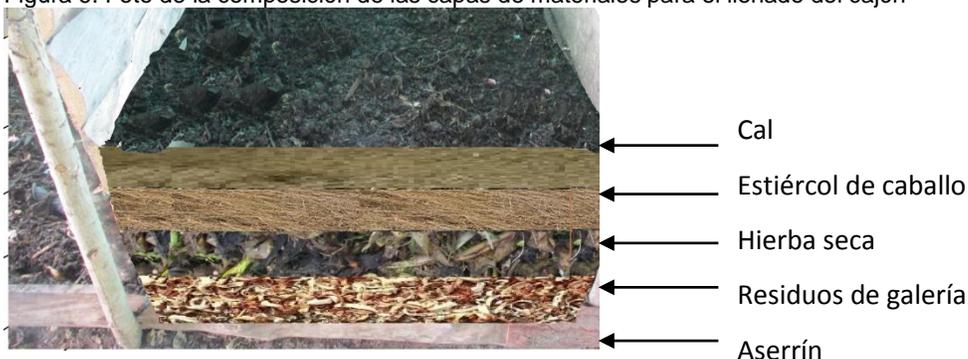
#### **4.3.4. Trituración**

Los materiales (ya clasificados) antes de ser adicionados en los cajones de compostaje son llevados a un tamaño de partícula entre los 2 y 3 cm con una máquina picadora de forraje marca NOGUEIRA PN plus 2000.

#### **4.3.5. Conformación de los Cajones**

La conformación del contenido del cajón de compost se realizó mediante capas sucesivas de 5 cm de los materiales clasificados y picados en el siguiente orden (de abajo hacia arriba): aserrín (seco y rico en carbono), residuos orgánicos (aporta humedad y nitrógeno), hierba seca (aporta carbono), estiércol seco de caballo (aporta nitrógeno y microorganismos) y finalmente 1 cm de cal (regula el pH), como se muestra en la figura 6. Este proceso se repitió hasta completar la altura del cajón.

Figura 6. Foto de la composición de las capas de materiales para el llenado del cajón



#### 4.3.6. Volteo

El volteo se realizó para garantizar la presencia de oxígeno, además de mejorar la homogenización de la mezcla y favorecer la uniformidad de la temperatura en todas las zonas de la pila. El volteo se realizó cada 15 días, pasando el material de cajón a cajón hasta completar el cajón 6 (corresponde a 3 meses de proceso de compostaje) donde se obtiene el producto final. En caso de alcanzarse temperaturas mayores a 70°C se realiza un volteo adicional.

La composición de los residuos sólidos se muestra en la tabla 1

Tabla 1. Composición de los residuos sólidos

Tratamiento	Frutas (%)	Leguminosas (%)	Verduras (%)
T1	16,52	48,05	35,43
T2	6,21	59,01	34,78
T3	9,79	40,56	49,65
T4	9,83	28,56	61,61

#### 4.3.7. Control de humedad y aireación

Semanalmente se realizó la prueba del puño para saber el contenido de humedad. La adición de agua se realizó generalmente cuando se hizo el volteo ya que se facilita humedecer de forma homogénea todo el material.

Para controlar la aireación se realizó volteos y/o se hicieron agujeros verticales desde la superficie del cajón hasta el fondo.

#### **4.3.8. Maduración**

El proceso de maduración completo fue de 3 meses durante los cuales se estabilizó la descomposición de residuos orgánicos. Durante todo el proceso de maduración se controló la humedad de campo mediante la prueba del puño, la cual se realizó cada semana. El control de la temperatura es un parámetro que permitió saber cuándo el proceso ha terminado y el compost ha conseguido madurez, ya que en esta última fase se alcanzan temperaturas cercanas a la temperatura ambiente.

Al final del proceso cuando la temperatura alcanzó valores cercanos a la temperatura ambiente (25 °C), el material se extendió sobre un plástico negro y se tapó con el mismo hasta obtener una humedad inferior al 20 % de acuerdo a la NTC 5167 segunda actualización.

#### **4.3.9. Tamizaje**

Se realizó el tamizaje con el fin de separar las partículas que al finalizar el proceso eran demasiado grandes y no han cumplido la compostación total para ser reutilizadas en un nuevo proceso.

#### **4.3.10. Empacado**

El producto final obtenido durante el proceso de compostaje se empacó en estopas de 50 Kg.

### **4.4. SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE**

**4.4.1. Toma y preparación de las muestras.** Con el fin de evaluar los parámetros físicos y químicos del proceso de compostaje, se toman muestras compuestas de la parte alta, media y baja de cada cajón desde el inicio del proceso y en adelante cada quince días durante 2 meses y una muestra final cuando se han completado tres meses de compostaje. Las muestras se secan al aire para tamizaje (Tamiz #35) según la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 segunda actualización.

Por cada cajón se seleccionaron tres unidades de muestreo (parte alta, parte media y parte baja), en cada caso las muestras fueron tomadas a una profundidad de un tercio de la altura total del cajón y cada 20 cm a lo largo y ancho tomando aproximadamente 500 g de material orgánico para un total de 40 submuestras, las cuales fueron mezcladas de forma homogénea para obtener una muestra compuesta de 1 Kg. Posteriormente las muestras se secaron al aire y se molieron en un molino de martillos para tamizaje (Tamiz #35) según la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 segunda actualización. A cada muestra tomada de la parte alta, media y baja se realizó un triplicado para cada análisis a realizar. El tiempo de muestreo en días fue 0, 15, 30, 45, 60 y 90, una vez empezado el proceso.

**4.4.2. Evaluación de parámetros físicos y químicos del proceso de compostaje.** La evaluación de los parámetros físicos y químicos se realizó mediante la metodología establecida por la NTC 5167 segunda actualización y el manual de laboratorio de Agroquímica del Departamento de Química de la Universidad del Cauca.

#### **4.4.2.1 Análisis físicos**

##### **➤ Temperatura**

La temperatura se midió con un termómetro bimetálico marca Mengte (Figura 7) 3 veces al día durante la etapa inicial del proceso. Posteriormente en las etapas de enfriamiento y maduración se mide 3 veces por semana.

Figura 7. Foto del Termómetro bimetálico



##### **➤ Humedad de Campo**

Se determinó mediante el método gravimétrico, en el cual la muestra se pesa antes y después del calentamiento a 105°C por 24 horas en una estufa con circulación de aire forzado, con el objetivo de eliminar el agua superficial (Bravo y Giraldo, 2003).

##### **➤ Humedad Higroscópica**

La muestra se seca al aire para posteriormente determinar la humedad higroscópica mediante el método gravimétrico sometiendo la muestra a 70° C por 24 horas (NTC 5167, segunda actualización).

#### **4.4.2.2 Análisis químicos**

Para tomar la muestra requerida en cada procedimiento se realizó el método del cuarteo.

➤ **pH**

El pH se determina por medio de un potenciómetro, formando una pasta saturada con agua destilada. Posteriormente se deja reposar durante 2 horas y se mide el pH (NTC 5167).

➤ **Determinación del Carbono Orgánico Oxidable Total y de la Materia Orgánica**

Para determinar el contenido de carbono orgánico oxidable total en las muestras se utilizó el método de Walkley Black. El cual consiste en oxidar el carbono orgánico presente en la muestra con dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) usado como agente oxidante y ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) concentrado el cual favorece el medio ácido en la reacción. Primero se pesa 0.1 g de muestra y se adiciona 10 mL de  $K_2Cr_2O_7$  1.0 N y 20 mL de  $H_2SO_4$  concentrado. Se agita y se deja enfriar por 30 minutos. Una vez frío se adiciona 150 mL de agua destilada, 10 mL de ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), tres gotas de ferroína como indicador y se valora con solución ferrosa 0.5 N llevando un blanco de muestra y un patrón de 0.01 g de glucosa (Bravo y Giraldo, 2003). El cambio de color es de amarillo pasando por diferentes tonos de verde, hasta terminar en un color marrón. La reacción se muestra en la ecuación 2.



La materia orgánica se determina multiplicando el %  $C_{org}$  por 2 (NTC 5167).

➤ **Determinación de Nitrógeno Total por el Método de Kjeldahl**

El método consta de 3 etapas de acuerdo con Bravo y Giraldo (2003):

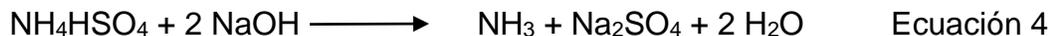
1) Oxidación de la muestra

En la primera etapa se toman 0.1 g de muestra que ha sido tamizada por el tamiz de malla 80 y se adiciona 1 g de mezcla catalizadora. Posteriormente se pasa a un tubo de digestión y se adicionan 10 mL de ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ) para oxidar la materia orgánica y convertir el nitrógeno en sulfato ácido de amonio ( $NH_4HSO_4$ ). También se lleva un blanco de muestra con 1g de mezcla catalizadora y un patrón de 0,1 g de glicina. La reacción descrita en la ecuación 3:



## 2) Descomposición del sulfato ácido de amonio

Una vez completada la digestión se deja enfriar y se adicionan 50 mL de agua destilada. El sulfato ácido de amonio ( $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ ) se descompone por medio de la adición de 40 mL de NaOH al 32 % para liberar el amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) el cual se recoge por destilación sobre 100 mL de ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_4$ ) al 2 %, formando el borato de amonio. Las reacciones son las siguientes:



## 3) Titulación del borato de amonio

El borato de amonio formado en el paso anterior se valora con ácido clorhídrico (HCl) 0.1N utilizando 3 gotas de indicador mixto. La reacción es la siguiente:



### ➤ **Relación C/N**

Se calculó mediante la relación entre el % de carbono orgánico total y % de nitrógeno total de acuerdo a Bravo y Giraldo (2003).

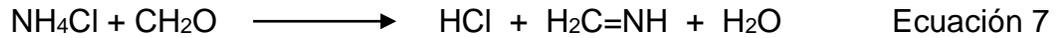
### ➤ **Capacidad de intercambio Catiónico**

Se determinó en los tratamientos T1 y T4 al inicio y al final del proceso, y en los tratamientos T2 y T3 a los 15 días y a los 3 meses (muestra final).

El método utiliza una solución de acetato de amonio 1N a pH 7 en el cual las posiciones de intercambio de la muestra son reemplazadas por el ion amonio y su posterior desplazamiento con una solución de cloruro de sodio (NaCl) produce cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) el cual en presencia de formaldehído forma un complejo nitrogenado y ácido clorhídrico el cual es valorado con hidróxido de sodio (NTC 5167).

Inicialmente se pesaron 2,5 g de muestra en un Erlenmeyer de 250 mL. Posteriormente se adicionó 100 mL de acetato de amonio 1 N y se agitó durante 2 horas a 170 rpm y se dejó en contacto durante toda la noche. A continuación, se filtró al vacío y se realizó lavados del residuo sobre el embudo con 5 porciones de 10mL de acetato de amonio 1 N. Luego se lavó con 5 porciones de 10mL de etanol al 95 %. Finalmente se lavó con 5 porciones de cloruro de sodio al 10% y se adicionó

20mL de formaldehído al 37% para dar la reacción que se muestra en la ecuación 7:



El HCl generado se valoró con NaOH 0.2N en presencia de fenolftaleína.

## 4.5. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LOMBRICOMPOSTAJE

**4.5.1. Recolección de la Materia Prima.** La materia prima utilizada en el proceso de lombricompostaje fué estiércol fresco. Este se recolectó directamente del potrero cercano a la compostera.

**4.5.2. Cultivo de Lombriz.** Por cada cajón se utilizó aproximadamente 4 Kg de lombriz roja californiana *Eisenia Foetida* adquirida en la granja integral “Mamá Lombriz” (Figura 8) la cual se encarga junto con los microorganismos del suelo de la degradación de la materia orgánica.

Figura 8. Foto del cultivo de lombriz



### 4.5.3. Formación de los Cajones

Sobre la superficie de los cajones L1 y L2 se puso un plástico negro, donde se distribuyen uniformemente las lombrices y encima se adiciona una capa de estiércol fresco de bovino de 5 cm de alto. Para evitar que le llegue la luz del sol y evitar pérdidas de humedad, se cubre el cajón con un plástico negro.

### 4.5.4. Alimentación de la lombriz

Después de 3 meses de iniciado el proceso se retira el material lombricompostado y se adiciona estiércol de ganado fresco iniciando un nuevo proceso.

**4.5.5. Maduración:** El proceso de maduración se completó en un período de 3 meses durante los cuales se estabiliza la descomposición del sustrato.

#### **4.5.6. Extracción lombricompost del cajón**

Para retirar el lombricompost se quita el plástico permitiendo que se seque la capa superficial obligando a las lombrices a retirarse a una capa más profunda procediendo así a retirar el material seco ya degradado.

#### **4.5.7. Tamizaje**

Se realizó el proceso de tamizaje con el fin de separar las partículas que al finalizar el proceso aún son demasiado grandes, así como las que no han cumplido el proceso de lombricompostaje, para ser incorporadas en otros cajones.

#### **4.5.8. Empacado**

El producto final se secó a temperatura ambiente sobre un plástico negro hasta conseguir una humedad inferior al 20 % de acuerdo a la NTC 5167 segunda actualización. Finalmente, el compost se empacó en estopas de 50 Kg.

### **4.6. SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DEL PROCESO DE LOMBRICOMPOSTAJE**

**4.6.1. Toma y preparación de las muestras.** Inicialmente se diseñó un muestreo tipo cuadrícula con posterior homogenización y cuarteo hasta obtener aproximadamente 1Kg de muestra. Posteriormente se secó al aire para tamizaje (Tamiz # 35) según Norma Técnica Colombiana NTC 5167 segunda actualización. Para cada análisis se realizó un triplicado. Los tiempos de muestreo en días fueron a los 0 y 90.

**4.6.2. Evaluación de parámetros físicos y químicos del proceso de lombricompostaje.** Estos se evalúan de igual forma que en el apartado 4.4.2 para compost

### **4.7. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD Y GRADO DE MADUREZ EN EL COMPOST Y EL LOMBRICOMPOST**

Se evalúa la calidad y madurez del compost y lombricompost obtenido, practicando todos los análisis físicos y químicos establecidos en la norma técnica colombiana 5167 del 2004.

**4.7.1. Análisis Físicos.** Los análisis físicos comprenden las siguientes determinaciones:

**4.7.1.1 Humedad de Campo.** Se determina de igual forma que en el numeral 4.4.2

**4.7.1.2 Humedad Higroscópica.** Se determina de igual forma que en el numeral 4.4.2

**4.7.1.3 Densidad Real.** Se pesa una probeta limpia y seca de 50mL, luego se deja caer libremente muestra seca (tamiz N° 35 malla 0,5 mm) hasta completar un volumen cercano a 30mL y se determina el peso de la probeta más la muestra, así como el volumen. La densidad del material orgánico se expresa en g/cm<sup>3</sup> y se calcula según la ecuación 8:

$$DR = (W_2 - W_1) / V \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde

$W_1$  = Masa de la probeta vacía y seca expresada en g.

$W_2$  = Masa del material colocado en la probeta más la masa de la probeta expresada en g.

$V$  = Volumen ocupado por el material en la probeta expresado en cm<sup>3</sup>.

#### **4.7.1.4 Capacidad de Retención de Humedad**

Se determina de acuerdo a la pasta saturada formada en el numeral 4.4.2 teniendo en cuenta la ecuación 9:

$$\%CRH = V \times (100 + P_w) / P_m \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$V$  = Volumen de agua adicionado.

$P_w$  = humedad higroscópica.

$P_m$  = Peso de la muestra.

#### 4.7.1.5 Cenizas y Pérdidas por Volatilización

Se seca en la estufa un crisol con tapa a 100°C durante 30 minutos, se deja enfriar en el desecador y se pesa. Luego se pesa en el crisol 5g de la muestra seca (tamiz N° 35 malla 0,5 mm), posteriormente se lleva a la mufla y se aumenta la temperatura gradualmente hasta 650°C y se deja durante 4 horas hasta obtener cenizas blancas o grisáceas. Se deja enfriar en el desecador y se pesa. El contenido de cenizas y las pérdidas por volatilización se calcula de acuerdo con las ecuaciones 10 y 11, respectivamente:

$$\% \text{Cenizas} = (\text{peso final} / \text{peso inicial} * 100) / ((100 - \text{humedad higroscópica}) / 100) \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\% \text{Pérdidas por volatilización} = 100 - \% \text{Cenizas} \quad \text{Ecuación 11}$$

**4.7.2. Análisis Químicos.** Los análisis químicos comprenden las siguientes determinaciones:

##### 4.7.2.1 El contenido de Carbono Orgánico Oxidable Total y la Materia Orgánica

Se determina igual que en el numeral 4.4.2

##### 4.7.2.2 Contenido de nitrógeno total

Se determina igual que en el numeral 4.4.2

##### 4.7.2.2 Relación C/N

Se determina igual que en el numeral 4.4.2

##### 4.7.2.4 Determinación de la capacidad de intercambio catiónico

Se determina igual que en el numeral 4.4.2

##### 4.7.2.5 Fósforo Total, Potasio, Calcio, Magnesio, Sodio, Hierro, Cobre, Manganeso, Zinc, Azufre y los Metales Pesados Cadmio, Mercurio, Plomo, Níquel y Cromo

Se determinan como se describe a continuación:

Se realizó una digestión con ácido perclórico-nítrico en un equipo de digestión tipo Kjeldahl para lo cual se pesó 0.5g de muestra en un tubo de digestión al cual se adicionó 5mL de ácido nítrico, se llevó a ebullición hasta oxidar toda la materia orgánica. Se dejó enfriar la solución y se adicionó 3mL de ácido perclórico (HClO<sub>4</sub>) y se calentó hasta que la solución fué incolora. Posteriormente se enfrió ligeramente y se adicionó 10mL de agua destilada y se calentó hasta ebullición por unos pocos minutos. A continuación se enfrió, se llevó a un volumen de 100mL y se filtró. El papel filtro junto con el residuo se secó en la estufa a 80 °C hasta peso constante (el peso del residuo constituye el residuo insoluble en ácido). El fósforo y el azufre se determinaron por espectroscopia UV visible de acuerdo con Bravo y Giraldo (2003) y los restantes elementos mediante Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA).

#### 4.7.2.6 Residuo insoluble en ácido

El residuo obtenido en el numeral 4.7.2.5 constituye el residuo insoluble en ácido.

#### 4.7.2.7 Fósforo Asimilable

Se determinó de acuerdo con la norma técnica colombiana (NTC 234) realizando una extracción con Citrato-EDTA y posterior cuantificación por UV visible. El EDTA se usó para acomplejar los iones Calcio y Magnesio presentes en la muestra. Inicialmente se pesó 0.5g de muestra en un erlenmeyer de 500mL y se adicionó 100mL de Citrato de Amonio-EDTA (calentada previamente a 65 °C). A continuación se tapó herméticamente y se agitó dentro de un baño a 65°C durante 1 hora (se remueve el tapón momentáneamente para liberar la presión). Finalmente se sacó el recipiente con la muestra del baño, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se aforó a 100mL. La cuantificación por UV visible se realizó de acuerdo a Bravo y Giraldo (2003).

#### 4.7.2.8 Carbonatos

Se tomó 0.5g de muestra seca y tamizada por tamiz de N° 35 y se adicionó 25mL de ácido clorhídrico 0.5N, se llevó a ebullición durante 5 minutos. Se dejó enfriar y se tituló con NaOH 0.5N en presencia de fenolftaleína. Se determinó de acuerdo a la ecuación 12:

$$\%CO_3^{2-} = \frac{[(V_{HCl} * N_{HCl}) - (V_{NaOH} * N_{NaOH})] * 0,03 * 100}{W_m} * \left( \frac{100}{100 - P_m} \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde

$V_{HCl}$  = Volumen de ácido clorhídrico

$N_{HCl}$  = Normalidad de ácido clorhídrico

$V_{NaOH}$  = Volumen de Hidróxido de sodio

$N_{NaOH}$  = Normalidad de Hidróxido de sodio

$W_m$  = Peso de la muestra

$P_m$  = Humedad Higroscópica

#### **4.8. EVALUACIÓN DEL GRADO DE CONDENSACIÓN DE LAS SUSTANCIAS HÚMICAS EN EL COMPOST Y LOMBRICOMPOST**

Para evaluar el grado de condensación al producto obtenido, se determinó el porcentaje de carbono de los extractos húmicos totales (%CEHT), el porcentaje de carbono de los ácidos húmicos (%CAH) y el porcentaje de carbono de los ácidos fúlvicos (%CAF) conforme a la norma NTC 5167 de acuerdo a la marcha analítica esquematizada en la figura 9.

El % de CEHT y el % de CAH se determinaron de acuerdo con el numeral 4.4.2 y el % de CAF se determinó de acuerdo a la ecuación 13:

$$\%CAF = \%CEHT - \%CAH \qquad \text{Ecuación 13}$$

El grado de condensación de las sustancias húmicas se determina usando la ecuación 14:

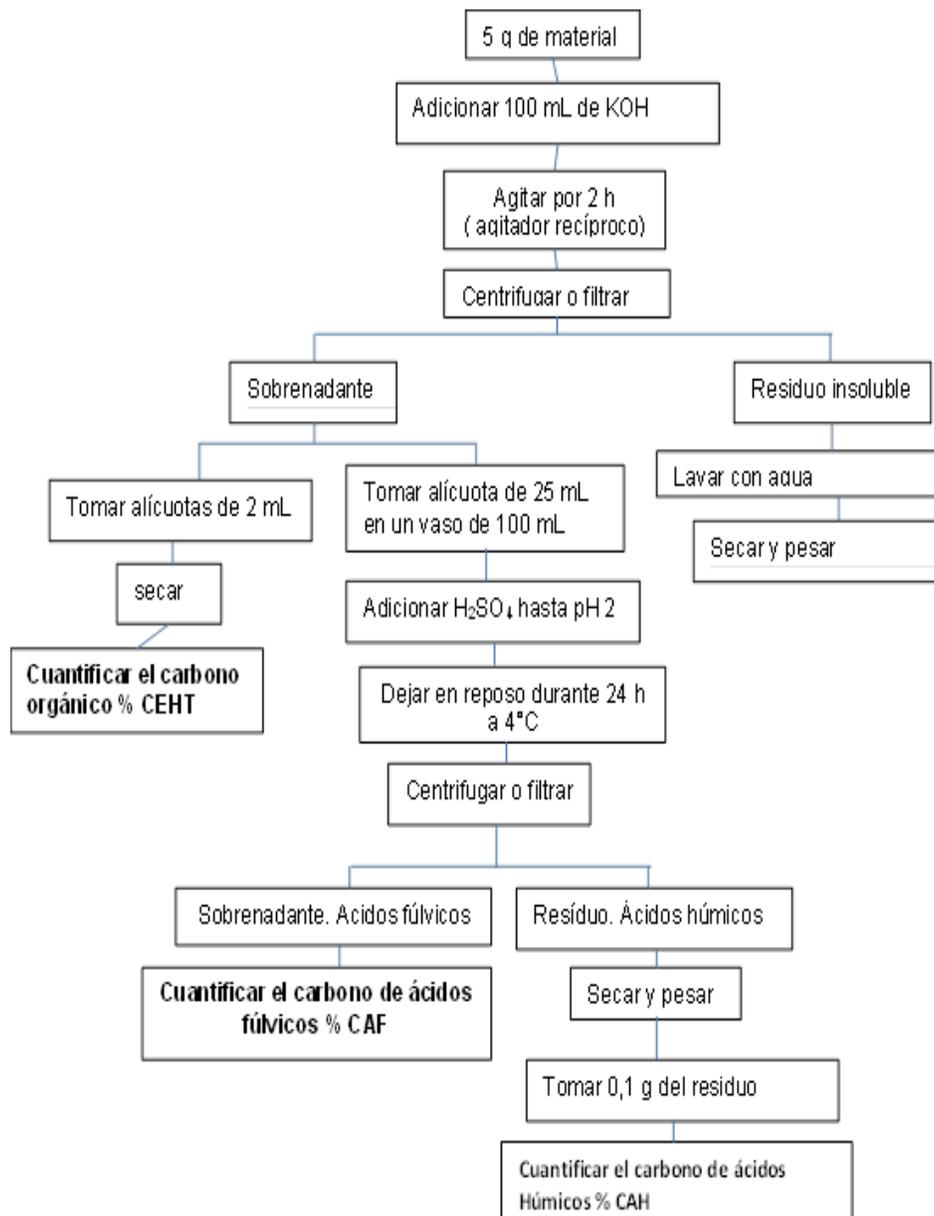
$$HR_2 = \%CAH / \%CAF \qquad \text{Ecuación 14}$$

Donde  $HR_2$  representa el índice de humificación, el cual si es superior a 1 implica que hay prevalencia de los ácidos húmicos sobre los ácidos fúlvicos y por lo tanto implica que el material está maduro y estable.

#### **4.9. ANALISIS ESTADISTICO**

A los datos obtenidos de cada variable se realizó inicialmente pruebas de normalidad y homogeneidad varianza. Una vez se estableció la normalidad de los datos, se procedió a realizar la prueba de anova de un factor ( $P \leq 0,05$ ) y comparación de medias utilizando el test de Tukey ( $P \leq 0,05$ ), donde se establecieron las diferencias en las variables analizadas. Adicionalmente se determinó si había correlación entre las variables de estudio mediante la Correlación de Pearson. Todas las pruebas estadísticas se realizaron con el programa SPSS 15.0.

Figura 9. . Esquema para la determinación de carbono en las sustancias húmicas



## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. COMPOSICIÓN PORCENTUAL DE LA MEZCLA DE MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DEL COMPOST Y RELACIÓN C/N TEÓRICA

Se determinó la composición porcentual y la relación C/N teórica para cada tratamiento (Anexo A, tablas 1-4), donde la relación C/N óptima inicial en un proceso de compostaje debe estar entre 25 y 40 (Tuomela *et al.*, 2000). De acuerdo con las tablas el tratamiento 1 es el único que no se encuentra en este rango, aunque está cerca del límite inferior. Teniendo en cuenta que el aserrín es el material con la relación C/N más alta se debe aumentar la cantidad de este material como corrección en cajones de compost posteriores. Sin embargo, cabe aclarar que el cálculo teórico de la relación C/N inicial puede ser muy diferente a los valores encontrados experimentalmente en la figura 18, debido a que, aunque todo el nitrógeno está disponible, o sea biodegradable, solamente una fracción del carbono puede serlo (Gálvez, 2012).

### 5.2. SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

Se toman muestras de la parte alta, media y baja de cada cajón con el fin de evaluar el proceso de compostaje desde que inicia y cada 15 días durante 2 meses y una muestra final al completar 3 meses.

Para comparar las propiedades de cada tratamiento en las diferentes zonas de muestreo se realizó la prueba estadística de ANOVA y la comparación estadística de medias. Los resultados se reportan en el Anexo B (tablas 1, 2, 3 y 8), donde no se observan diferencias significativas respecto a la humedad, pH, materia orgánica, nitrógeno, y relación carbono-nitrógeno, lo que indica que la mezcla es uniforme y bien distribuida para los tratamientos T1, T2 y T4. No obstante, para el tratamiento T3 se aprecia que respecto al contenido de MO y C/N existe diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) (Anexo B, tabla 3). Para saber en que sitio se encuentra la diferencia se realiza la prueba de Tukey (Anexo B, tablas 4 y 5). encontrando que el contenido de MO de la parte alta es significativamente menor al de la parte baja. Dado que la parte alta de T3 alcanza mayores valores de temperatura que la parte baja, se espera que esto contribuya a la oxidación de los compuestos de carbono en la capa superficial (Jiang *et al.*, 2015). Igualmente se observa (Anexo B tabla 5) que respecto a la relación C/N existe diferencia significativa entre la parte alta y baja del cajón, conociendo que la parte baja tiene una relación C/N superior a la parte alta. Adicionalmente se realizó un estudio de correlación de Pearson de las variables implicadas (pH, MO, N y C/N) en el proceso de compostaje. En el anexo C se muestran los resultados de estas correlaciones para los tratamientos T1 a T4 (tablas 1 a 4 respectivamente).

Para el tratamiento T1 se puede apreciar que debido a la mineralización alta que se produjo, se oxidaron y volatilizaron tanto compuestos de carbono como de nitrógeno lo que puede apreciarse por la correlación alta y positiva (0,645\*\*) entre la MO y el N, además que no hay una correlación entre la MO y la relación C/N, sin embargo se encontró una correlación alta y negativa (-0,601\*\*) entre el N y la relación C/N, esto implica que el compost no ha alcanzado su madurez y que se siguen mineralizando compuestos de N, también se aprecia una correlación alta y negativa de la MO con respecto al tiempo (-0,381\*\*) ya que a medida que este transcurre la MO se va mineralizando, igualmente ocurre con el pH (-0,792\*\*), en este caso a medida que se mineraliza la materia orgánica el pH del medio se vuelve más alcalino debido a la degradación de compuestos orgánicos ácidos y a la liberación de compuestos amoniacales.

Con respecto a T2 se observa (Anexo C, tabla 2) que la MO presenta una correlación altamente significativa con respecto al tiempo (-0,596\*\*) como era de esperarse debido al proceso de mineralización, y una correlación altamente significativa y positiva con respecto al N. Por otra parte el pH solo correlaciona positivamente con el tiempo indicando que el proceso de compostaje alcanza un grado de estabilización mejor que en T1.

En la tabla 3 del anexo C se muestra la correlación de Pearson para T3, como se puede observar la MO presenta una correlación altamente significativa con respecto al pH, N, C/N y sitio de muestreo (0,421\*\*, 0,413\*\*, 0,633\*\* y 0,457\*\* respectivamente). La relación existente entre la MO y los parámetros de N y C/N se explican igual que para T2 y en cuanto al sitio de muestreo teniendo en cuenta la prueba de Tukey (Anexo B, tabla 4) se observa que la parte baja del cajón presenta un contenido significativamente mayor de MO que la parte alta indicando que en la parte alta ocurrió una tasa de mineralización mayor.

Por último para T4 (Anexo C, tabla 4) la MO presenta una correlación altamente significativa y negativa respecto al pH y al tiempo de compostaje, en tanto que presenta una correlación altamente significativa y positiva con respecto a N como ocurrió para T3. También se observa que el pH correlaciona alta y positivamente con respecto al tiempo (0,591\*\*) indicando que se presentaron pérdidas de nitrógeno por volatilización como indica la correlación altamente significativa y negativa entre el N y el tiempo de compostaje (-0,666\*\*).

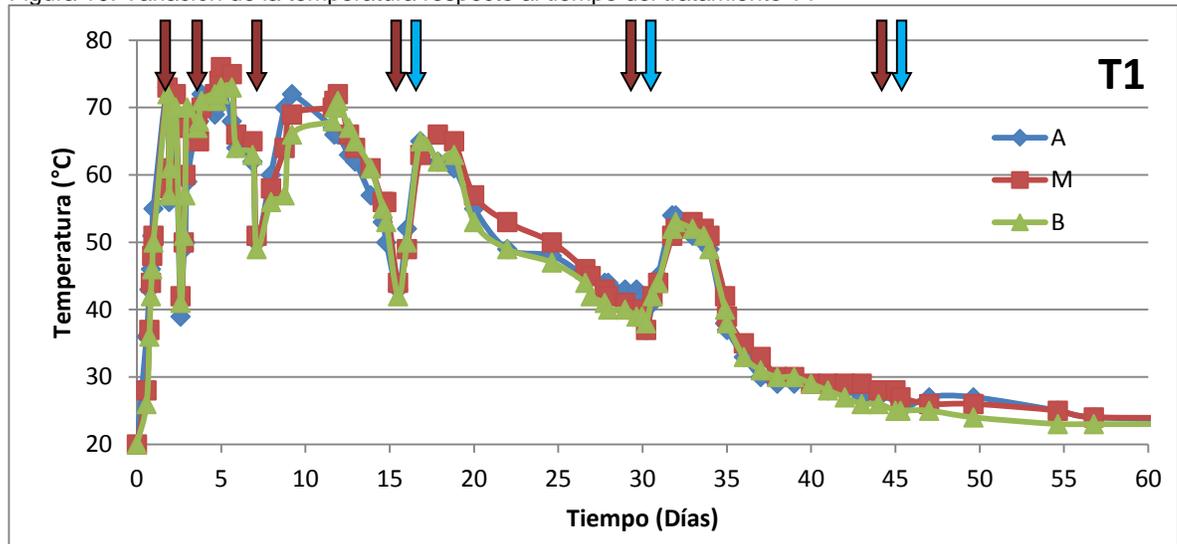
## **5.2.1. Análisis físicos**

### **5.2.1.1 Temperatura**

En las figuras 10 a 13 se muestran las curvas de temperatura para los tratamientos T1 a T4 de la parte alta, media y baja de cada cajón y donde se muestran las diferentes fases del compostaje: en cada caso se observa una curva clásica de temperatura que inicia entre 18 y 23°C (T ambiente) y aumentó rápidamente hasta alcanzar 50°C. En este período de tiempo se presenta la etapa mesofílica que duró aproximadamente 24 horas. El incremento continuó, alcanzando temperaturas de

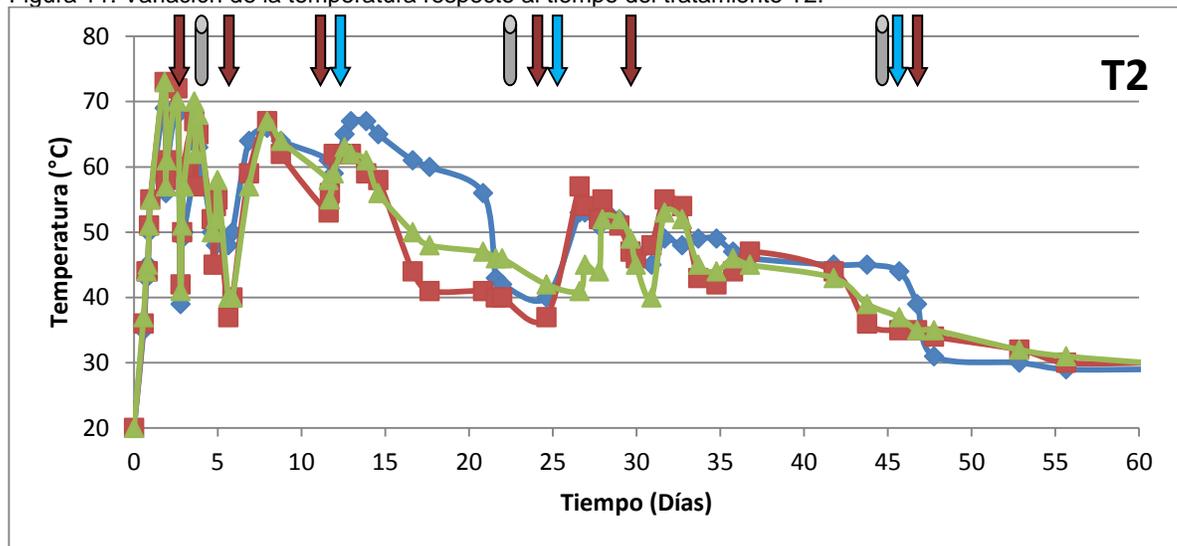
hasta 77°C y cerca de 15 días después se obtienen nuevamente temperaturas de 50°C culminando así la etapa termofílica; en este período de tiempo se observan variaciones de temperatura debido a los volteos y en menor proporción a la adición de agua. Después de cada volteo hay un aumento de temperatura, ya que se consigue una mejor homogeneización de los residuos y saturación de oxígeno.

Figura 10. Variación de la temperatura respecto al tiempo del tratamiento T1



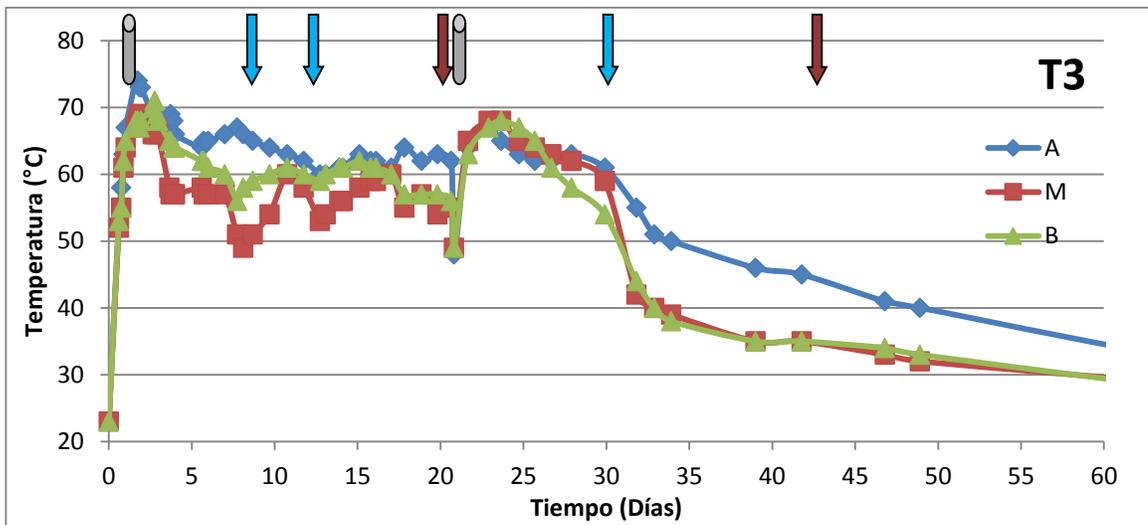
Donde A= Parte alta, M= Parte media, B= Parte baja, ↓ = Volteo, ↓ = adición de agua

Figura 11. Variación de la temperatura respecto al tiempo del tratamiento T2.



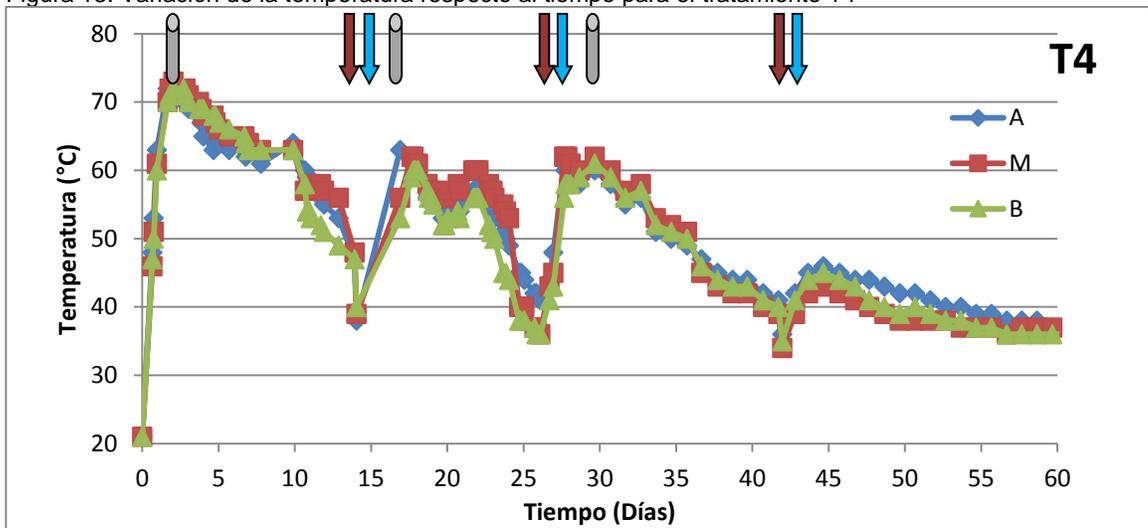
Donde A= Parte alta, M= Parte media, B= Parte baja, ↓ = Volteo, ⊔ = Hueco, ↓ = adición de agua

Figura 12. Variación de la temperatura respecto al tiempo para el tratamiento T3



Donde A= Parte alta, M= Parte media, B= Parte baja, ↓ = Volteo, ◯ = Hueco, ↓ = adición de agua

Figura 13. Variación de la temperatura respecto al tiempo para el tratamiento T4



Donde A= Parte alta, M= Parte media, B= Parte baja, ↓ = Volteo, ◯ = Hueco, ↓ = adición de agua

Por debajo de 50°C se da inicio a la fase de enfriamiento que duró entre 15 y 20 días. La temperatura de los tratamientos aumentó rápidamente durante los primeros días del proceso, de tal manera que a las 42 horas de iniciado, ya se alcanzaron temperaturas de 75 °C (figura 10) coincidiendo con lo reportado por Solano *et al.*, (2001). El rápido incremento de la temperatura denota una alta actividad microbiana, debido en parte al porcentaje de residuos vegetales verdes, ya que según Van Heerden *et al.*, (2002), la fase termofílica del compostaje de residuos frescos vegetales se caracteriza por un incremento del grupo de microorganismos

dominantes durante esta etapa, principalmente bacterias termofílicas. Por otra parte, la adición de estiércol de caballo también ocasiona un incremento en la temperatura puesto que el estiércol sirve para introducir microorganismos muy activos para la descomposición y posee reservas de sustancias energéticas.

La temperatura es un indicador de la actividad microbiana durante el proceso de compostaje y es la forma más conveniente de monitorear el progreso, por encima de los 70°C puede ocasionar la inactividad de los microorganismos y el proceso se convierte en ignición con la consecuente pérdida de MO (Dalzell *et al.*, 1991).

Con el fin de disminuir la temperatura de la pila se hace necesario realizar un volteo (Fogiel, 2003) y adicionar agua a los 2 días de iniciado el proceso consiguiendo disminuir la temperatura hasta 58°C, sin embargo en pocas horas nuevamente se alcanzan temperaturas de más de 70°C lo cual indica que el volteo no es suficiente para disminuir la temperatura y por otra parte la adición excesiva de agua puede ocasionar un ambiente anaeróbico.

Teniendo en cuenta la alta temperatura alcanzada en el tratamiento T1, para T2 se aumentó la cantidad de aserrín como agente de carga con el fin de hacer más lento el proceso y evitar altas temperaturas. Pese a esto nuevamente se consiguen temperaturas por encima de 70°C, razón por la cual se realiza el volteo de la pila y se agrega agua en forma de rocío, pero igual que en T1 nuevamente se alcanzan altas temperaturas en menos de 12 horas (figura 11). Dado que realizar volteos solo baja la temperatura por un corto período de tiempo y que resulta inconveniente y poco práctico realizar volteos muy frecuentemente, se opta por hacer huecos verticales a lo largo del cajón a partir de las 66 horas con el fin de conseguir una aireación pasiva. Los huecos realizados se distribuyen uniformemente a lo largo y ancho de la superficie de cada cajón como se muestra en la figura 14. A lo ancho se realizan 3 huecos separados cada 25 cm y a lo largo 5 huecos separados aproximadamente cada 33 cm para un total de 15 huecos. El tamaño y número de huecos es determinante para mantener una temperatura óptima la cual se consigue a una velocidad de aireación de moderada a baja para maximizar la degradación y obtener un producto estable durante el compostaje (Cabeza *et al.*, 2013). Hay que resaltar que a T1 no se le hicieron huecos y de este tratamiento se compara su evolución con los demás tratamientos.

Como se aprecia en la figura 11, para T2 a partir del día 4 se consigue un mejor control de la aireación evitando que se alcancen temperaturas por encima de 70°C. A partir de los 15 días se inicia un descenso de la temperatura y a los 20 días aproximadamente se alcanza una temperatura entre 40 y 50°C. En este punto se observa una disminución de la temperatura debido a un volteo y a la adición de agua; luego nuevamente aumenta hasta los 53°C ya que con el volteo se consigue una homogeneización de los residuos y un óptimo porcentaje de humedad reactivando así la actividad microbiana. Después de los 32 días la temperatura de la

pila disminuye constantemente hasta llegar a valores cercanos a la temperatura ambiente indicando que el proceso de compostaje está llegando a su fase final.

Figura 14. Foto de la distribución de los huecos en el cajón de compostaje



En los tratamientos T3 y T4 (Figuras 12 y 13) la temperatura máxima alcanzada es de 75 y 73 °C respectivamente. A partir del día 3 la temperatura oscila entre 50 y 69°C para T3, y entre 40 y 67 °C para T4. Este periodo dura aproximadamente un mes, tiempo en el cual se produce la mayor transformación de la MO. Las variaciones que se observan son debidas al volteo y la adición de agua que se realizan esta vez para homogeneizar los residuos orgánicos, mantener un nivel óptimo de humedad y hacer el respectivo traslado a un nuevo cajón para iniciar un nuevo ciclo.

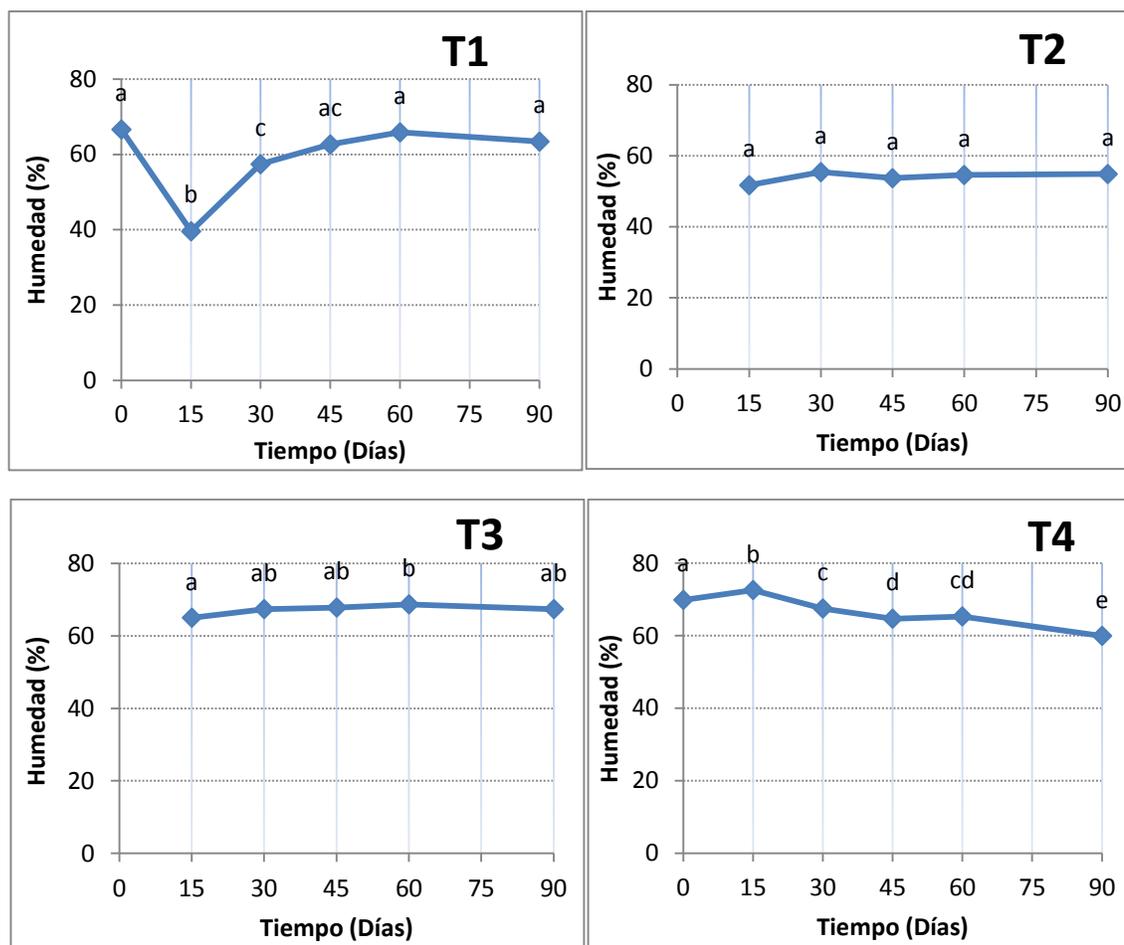
### 5.2.1.2 Humedad

En la figura 15 se presenta los resultados de la humedad a lo largo del proceso de compostaje para los cuatro tratamientos.

La humedad al inicio del proceso se encontró entre 60 y 70% (T1 y T4), este porcentaje de humedad fué apropiado para iniciar el proceso de compostaje, debido a que la humedad óptima para el crecimiento microbiano se encuentra en un rango entre 50 y 60 % (Castro ,1995). Por debajo de 30%, la actividad biológica disminuye y por encima de 70% el agua desplaza el aire en los espacios libres entre las partículas llevando a procesos anaeróbicos por la falta de oxígeno (Haug, 1993).

En la mayoría de los tratamientos (T2, T3 y T4) se observa una distribución uniforme del porcentaje de humedad en el proceso de compostaje, esto implica que se tiene un control del contenido de humedad. Es de resaltar no obstante que para T2 la humedad se encuentra por debajo de 60°C presentándose una disminución de la actividad microbiana.

Figura 15. Variación de la humedad respecto al tiempo en los tratamientos T1 a T4.



Prueba de Tukey para la humedad en función del tiempo. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

En T1 se observa una disminución de la humedad a los 15 días de compostaje llegando a un porcentaje de 40%. Este resultado implica que se ha perdido agua principalmente por evaporación debido a la alta temperatura que se alcanzó en los primeros días de compostaje, esto demuestra además que hay una relación directa entre la temperatura y el porcentaje de humedad, ya que por una parte en este tiempo (fase termofílica) es donde se alcanzan las mayores temperaturas; por otro lado la disminución de la humedad inhibe la actividad de los microorganismos y como se puede apreciar en la figura 10 a partir de los 15 días ocurre un descenso de la temperatura, razón por la cual se adiciona agua y 1 día después se observa nuevamente un incremento de la temperatura que alcanza un máximo de 67°C.

## 5.2.2. Análisis químicos

### 5.2.2.1 pH

El pH es un parámetro que informa acerca de la maduración o grado de humificación del compost, de ahí que su determinación sea importante. En la figura 16 se presentan los resultados de la evolución del pH en función del tiempo para cada tratamiento.

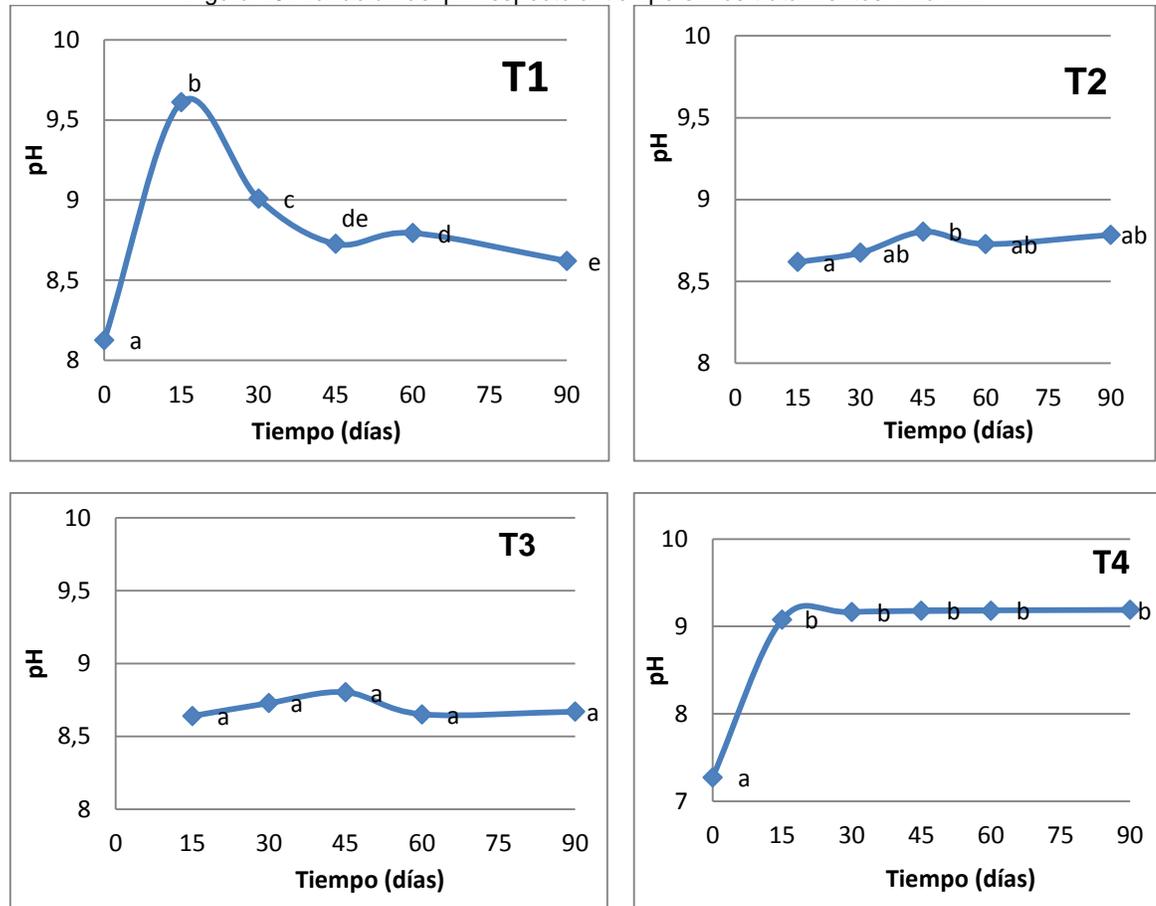
Al inicio del proceso de compostaje, los tratamientos (T1,T2, T3 y T4) tuvieron valores de pH mayores a 7. Aunque el pH de los materiales no es un parámetro crítico en el proceso (Christian *et al.*, 2009), es importante que no se alcancen niveles ácidos que puedan llevar a procesos anaeróbicos.

El pH de T1 esta una unidad (pH=8,1) por encima del pH de T4, esta diferencia se atribuye a que inicialmente al primer tratamiento (T1) se agrega una cantidad más alta de cal dolomita. También se puede observar que la variación más notable ocurre durante los primeros 15 a 20 días de compostaje coincidiendo con el comportamiento de la curva de temperatura donde se muestra que la mayor actividad ocurre en la fase termofílica. Aún cuando se aplicó cal al inicio ésta no reacciona de forma inmediata sino que se va descomponiendo a medida que ocurre el proceso de compostaje. Se considera que la cal modifica la velocidad de descomposición así como una reducción de malos olores. El incremento en la velocidad de descomposición ocurre porque la cal neutraliza los ácidos orgánicos producidos durante la primera fase del compostaje. A los 15 días de iniciado el proceso se obtuvo el máximo valor de pH (9,6) indicando que la cal ha reaccionado completamente liberando Calcio y Magnesio bases que elevan el valor del pH. Después de los treinta días se puede observar una estabilización del pH.

En los tratamientos posteriores (T2, T3 y T4) se disminuyó la cantidad de cal observandose una reducción del pH a los 15 días, sin embargo en los días posteriores se observó un comportamiento semejante del pH el cual se mantiene en un rango entre 8,5 y 9,2. El valor de pH del tratamiento T4 es ligeramente superior a los demás tratamientos debido a la producción de amoníaco producto de la degradación de compuestos orgánicos nitrogenados que se producen en la fase termofílica (Menoyo, 1995). Normalmente en el proceso de compostaje se da una caída del pH en la fase inicial, debido a la liberación de ácidos orgánicos de la MO. Conforme el proceso de descomposición continúa, estos ácidos son descompuestos liberandose bases y altos contenidos de amoníaco que ayudan a elevar el pH (Blandon *et al*, 1999). Después de los 30 días T4 muestra el valor de pH más alto comparado con los demás tratamientos. El aumento del pH es debido al nitrógeno liberado ya que como se plantea en la FAO (1997), la pila de compost es un almacén de nitrógeno. Por lo anterior se puede afirmar que el amoníaco liberado puede causar el aumento del pH sobre todo en las zonas baja y media de cada cajón donde el amoníaco puede ser retenido por la MO. De la misma manera

Cegarra (1994) encontró que un pH elevado y temperaturas elevadas pueden originar pérdida de nitrógeno en forma de amoniaco.

Figura 16. Variación del pH respecto al tiempo en los tratamientos T1 a T4.



Prueba de Tukey. Letras diferentes indican diferencia significativa. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

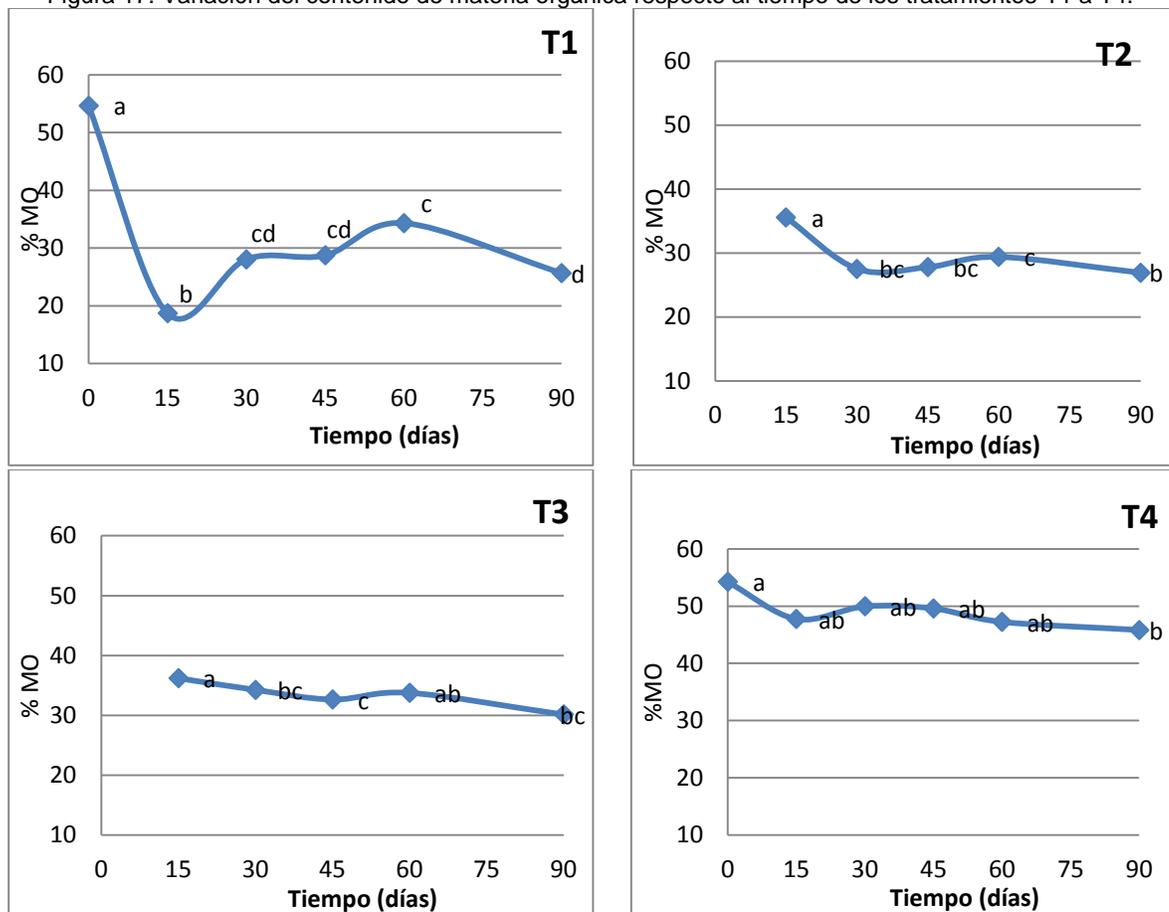
Teniendo en cuenta los valores de pH que se obtuvieron y los reportados por la FAO (1997), podemos decir que en el proceso de compostaje el producto final obtenido se encuentra estabilizado y es adecuado para aplicar al suelo sin que ello impliquen posibles riesgos de acidificación al mismo.

### 5.2.2.2 Materia orgánica

En la figura 17 se presentan los resultados de la evolución del contenido de MO donde el tratamiento T1 inicia con un 55% de MO y a los 15 días del proceso este porcentaje ha disminuido significativamente hasta un 19%. Respecto a los demás

tratamientos, T1 presentó la mayor disminución de MO debido a que no se realiza un buen control de la aireación ocasionando una mineralización rápida de la MO. Por otra parte, hay que tener en cuenta que a T1 se le adiciona una cantidad mayor de cal dolomita comparada con los demás tratamientos. Esta cantidad de cal resulta en un aumento del pH contribuyendo a la mineralización de la MO.

Figura 17. Variación del contenido de materia orgánica respecto al tiempo de los tratamientos T1 a T4.



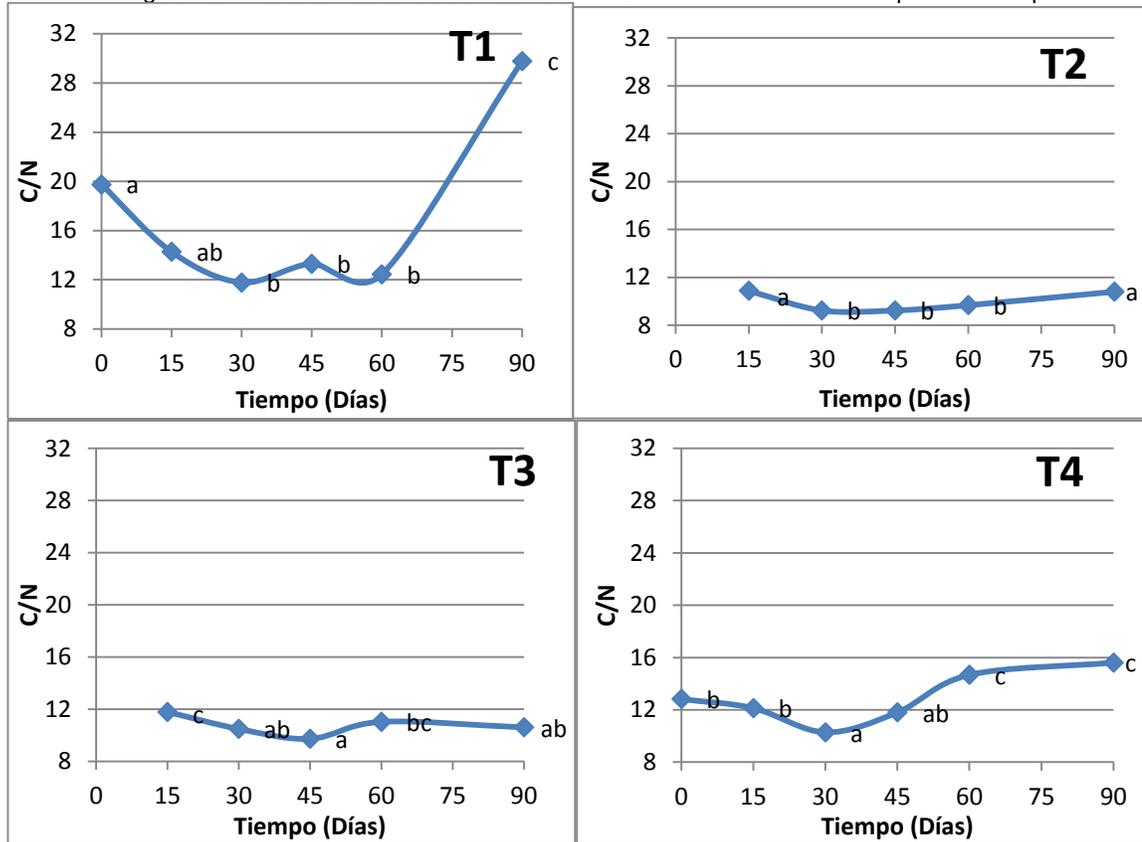
Prueba de Tukey. Letras diferentes indican diferencia significativa. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

### 5.2.2.3 Relación carbono nitrógeno (C/N)

En la figura 18 se muestra la evolución de la relación C/N durante la fase bio-oxidativa del proceso de compostaje para los 4 tratamientos. Uno de los principales inconvenientes a la hora de realizar un proceso de compostaje es establecer una adecuada relación C/N inicial que permita asegurar un buen proceso de compostaje.

Teniendo en cuenta que se utilizaron los residuos provenientes de galería y que estos presentan una composición muy heterogénea, se dificulta realizar un cálculo preciso de este parámetro. Estudios realizados muestran que una relación C/N óptima inicial debe estar en un rango entre 26 y 35 de acuerdo con Mote y Griffis (1980).

Figura 18. Evolución de la relación C/N de los diferentes tratamientos respecto al tiempo.



Prueba de Tukey. Letras diferentes indican diferencia significativa. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa.

La relación C/N inicial de los tratamientos estudiados muestra que se encuentra por debajo de este rango, lo cual implica como ya se mencionó pérdidas de nitrógeno en forma de amoníaco, por lo tanto es necesario aumentar el contenido de aserrín en los materiales de partida ya que este material presenta una elevada relación C/N (500-800). Por otra parte la relación C/N es un índice que se utiliza para establecer el grado de madurez de un compost, siendo un valor inferior a 20 un indicativo aceptable de madurez (Poincelot, 1974), aunque este parámetro no es un índice absoluto.

La relación C/N de los compost en los tratamientos T1-T4 disminuyó constantemente durante los primeros 30 días de compostaje tendiendo a

estabilizarse por un período de 30 días, tiempo después del cual aumentó progresivamente hasta finalizar el proceso, excepto para T4 donde se observó un aumento a partir de los 45 días. En T1 se puede observar que la relación C/N al final del proceso aumenta progresivamente hasta los 90 días alcanzando un valor de 30 lo cual indica que este compost no tiene un buen grado de madurez. Así mismo ocurre en el tratamiento T2, aunque en este caso el valor de la relación C/N es menor (10,9). Esto puede ser explicado teniendo en cuenta que los materiales inician con una relación C/N baja ocasionando que en la fase final del proceso de compostaje haya una mineralización de compuestos nitrogenados y se siga perdiendo nitrógeno. En T3 y T4 se observa que al final del proceso la relación C/N es menor a 20, indicando esto un grado de madurez aceptable (Poincelot, 1974), aunque la relación C/N no puede ser utilizado como un indicativo absoluto del grado de madurez.

### **5.2.3. Evaluación de la calidad y grado de madurez en el compost**

En la tabla 2 se registran los parámetros de calidad y madurez de acuerdo a la norma NTC 5167 segunda actualización. En la tabla se puede apreciar que el contenido de cenizas para los tratamientos T1 a T3 se encuentran por encima del 60% indicando una alta mineralización de la materia orgánica (Himanen y Hänninen, 2009; Wang *et al.*, 2004). En cambio para T4 se puede apreciar que este contenido es de 44,57% lo que indica que para este tratamiento se realizó un mejor control. Además de acuerdo con Dimambro *et al.*, (2007) el contenido de cenizas esta asociado con el contenido de potasio y nitrógeno y como se observa en la tabla estos valores también son altos (>1%), excepto para T1 donde el contenido de nitrógeno es muy inferior y no cumple con la norma (NTC 5167).

Respecto al contenido de materia orgánica se aprecia que T1 y T2 presentan deficiencia (<30%), como ya mencionó por la alta mineralización que ocurrió sobre todo en los primeros tratamientos donde no se ha logrado aún optimizar la aireación y por lo tanto temperaturas mayores a 75°C permanecen por más tiempo contribuyendo a dicha mineralización. En cambio para T3 y T4 se aprecia que el contenido de MO es considerablemente mayor y cumplen con la norma.

Es de resaltar que el contenido de metales pesados es bajo o no detectado (Hg, Pb y As) y cumple con la norma (NTC 5167) en todos los tratamientos, lo cual favorece la calidad del producto final.

De acuerdo a los resultados se aprecia que de los 4 tratamientos, T4 es el que presenta las mejores propiedades y que cumple en su mayoría con los requisitos de la NTC.

Tabla 2. Parámetros de calidad y madurez de los tratamientos T1 a T4

Propiedad	Tratamiento				Requisito	Tratamiento			
	T1	T2	T3	T4		NTC 5167	T1	T2	T3
D R (g/cm <sup>3</sup> )	0.78 <sup>b</sup>	0.65 <sup>a</sup>	0.68 <sup>a</sup>	0.64 <sup>a</sup>	Máximo 0.6	NC	NC	NC	NC
(%CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	10.36 <sup>c</sup>	10.19 <sup>c</sup>	7.75 <sup>b</sup>	4.48 <sup>a</sup>	NA				
Cenizas (%)	67,22 <sup>c</sup>	63,56 <sup>b</sup>	61,84 <sup>b</sup>	44,57 <sup>a</sup>	Máximo 60	NC	NC	NC	C
P V (%)	32.78 <sup>c</sup>	36.44 <sup>b</sup>	38.16 <sup>b</sup>	55.43 <sup>a</sup>	Mínimo 40	NC	NC	NC	C
C R H (%)	118.17 <sup>a</sup>	138.48 <sup>b</sup>	145.57 <sup>c</sup>	202.83 <sup>d</sup>	Mínimo 100%	C	C	C	C
pH	8.62 <sup>a</sup>	8.78 <sup>a</sup>	8.67 <sup>a</sup>	9.19 <sup>b</sup>	4-9	C	C	C	NC
CO (%)	12.59 <sup>a</sup>	13.46 <sup>a,b</sup>	15.06 <sup>b</sup>	22.91 <sup>c</sup>	Mínimo 15	NC	NC	C	C
MO (%)	25.18 <sup>a</sup>	26.92 <sup>a,b</sup>	30.12 <sup>b</sup>	45.83 <sup>c</sup>	Mínimo 30	NC	NC	C	C
N (%)	0.43 <sup>a</sup>	1.23 <sup>b</sup>	1.47 <sup>c</sup>	1.47 <sup>c</sup>	Declarar>1%	NC	C	C	C
Relación C/N	31.87 <sup>b</sup>	10.96 <sup>a</sup>	10.28 <sup>a</sup>	15.61 <sup>a</sup>	NA				
CIC (meq/100g)	11.95 <sup>a</sup>	15.22 <sup>a</sup>	13.11 <sup>a</sup>	14.95 <sup>a</sup>	Mínimo 30	NC	NC	NC	NC
F T (%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1.58 <sup>b</sup>	1.69 <sup>b</sup>	1.47 <sup>b</sup>	1.09 <sup>a</sup>	Declarar>1%	C	C	C	C
F A (%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0.08 <sup>a</sup>	0.08 <sup>a</sup>	0.07 <sup>a</sup>	0.07 <sup>a</sup>	NA				
Azufre (%)	0.42 <sup>b</sup>	0.46 <sup>b</sup>	0.40 <sup>b</sup>	0.30 <sup>a</sup>	Declarar>1%				
R I A (%)	23.87 <sup>b,c</sup>	26.41 <sup>c</sup>	20.03 <sup>a</sup>	22.28 <sup>a,b</sup>	NA				
CaO (%)	6.66 <sup>c</sup>	4.80 <sup>b</sup>	4.60 <sup>b</sup>	2.08 <sup>a</sup>	Declarar>1%				
MgO (%)	2.86 <sup>b</sup>	2.93 <sup>b</sup>	3.33 <sup>c</sup>	1.57 <sup>a</sup>	Declarar>1%				
Na (%)	0.13 <sup>a</sup>	1.63 <sup>b</sup>	0.26 <sup>a</sup>	0.14 <sup>a</sup>	NA				
K <sub>2</sub> O (%)	4.46 <sup>a</sup>	6.40 <sup>b</sup>	4.65 <sup>a</sup>	6.04 <sup>b</sup>	Declarar>1%	C	C	C	C
Fe (ppm)	10283.15 <sup>c</sup>	10146.61 <sup>c</sup>	6939.73 <sup>b</sup>	4438.71 <sup>a</sup>	NA				
Cu (ppm)	82.41 <sup>b</sup>	69.25 <sup>a</sup>	89.15 <sup>b</sup>	70.09 <sup>a</sup>	NA				
Mn (ppm)	116.38 <sup>c</sup>	81.35 <sup>b</sup>	52.34 <sup>a</sup>	38.11 <sup>a</sup>	NA				
Zn (ppm)	882.37 <sup>a</sup>	958.50 <sup>a</sup>	893.15 <sup>a</sup>	953.81 <sup>a</sup>	NA				
Ni (ppm)	137.67 <sup>b</sup>	131.17 <sup>b</sup>	178.29 <sup>c</sup>	65.34 <sup>a</sup>	Máximo 420	C	C	C	C
Cr (ppm)	94.78 <sup>c</sup>	73.11 <sup>b</sup>	95.34 <sup>c</sup>	13.59 <sup>a</sup>	Máximo 1200	C	C	C	C
Hg (ppm)	Nd	Nd	Nd	Nd	Máximo 17	C	C	C	C
Cd (ppm)	Nd	Nd	Nd	Nd	Máximo 39	C	C	C	C
Pb (ppm)	Nd	Nd	Nd	Nd	Máximo 300	C	C	C	C

Letras diferentes implican diferencia significativa, Prueba Anova ( $p < 0,05$ ). Dónde: Nd: No detectado, NA: No Aplica, C: Cumple, NC: No Cumple, CRH: capacidad de retención de humedad, PV: pérdidas por volatilización, DR: Densidad real, FT: Fosforo total, FA: fósforo asimilable, RIA: Residuo insoluble en ácido

### 5.3. SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DEL PROCESO DE LOMBRICOMPOSTAJE

Se evaluó el proceso durante el tiempo, la correlación de las variables, la calidad y el grado de madurez de acuerdo con la NTC 5167 segunda actualización.

#### 5.3.1. Evaluación de parámetros físicos y químicos del proceso de lombricompostaje

La degradación de los ácidos orgánicos causa un incremento en el valor del pH de acuerdo a lo observado en las tablas 3 y 4. Igualmente en la mineralización de las proteínas se producen compuestos amoniacales que contribuyen al aumento del valor del pH (Albuquerque *et al.*, 2006, 2009; Días *et al.*, 2010; Moreno y Mormeneo, 2008). Un pH inicial del sustrato (estiércol bovino) entre 6,5 y 7,5 sería el óptimo para iniciar el proceso de lombricompostaje. Sin embargo, el pH inicial en L1 no se encuentra en este rango a diferencia de lo observado en L2. El valor del pH no es un indicador tan importante de la madurez en un lombricompost, pero si es importante para un desarrollo normal de las lombrices dentro del sustrato. También se ha encontrado que una fracción de la materia orgánica durante el proceso sufre una mineralización originada por la acción combinada de las lombrices y los microorganismos causando una disminución en el contenido de carbono orgánico. Esta disminución varía de acuerdo a la naturaleza del residuo, la densidad de la población de las lombrices, su biodegradabilidad y la duración del proceso (Domínguez, 2004; Nogales *et al.*, 2008).

El porcentaje de Nitrógeno se incrementó en L1 y L2. Una posible explicación de este incremento podría ser un efecto de concentración del mismo, causado por la mineralización de la materia orgánica (Elvira, 1998).

Tabla 3. Caracterización inicial del sustrato y final del producto obtenido en el lombricompost (L1)

Lombricompost (L1) Parámetro	Tiempo	
	Día 0	Día 90
Humedad Higroscópica (%)	8,56 <sup>a</sup>	6,27 <sup>b</sup>
pH	7,67 <sup>a</sup>	8,29 <sup>b</sup>
Carbono (%)	22,34 <sup>a</sup>	20,91 <sup>b</sup>
MO (%)	44,67 <sup>a</sup>	41,83 <sup>b</sup>
Nitrógeno (%)	1,61 <sup>a</sup>	1,71 <sup>b</sup>
Relación C/N	13,88 <sup>a</sup>	12,22 <sup>b</sup>
Capacidad de intercambio catiónico (mEq/100g)	32,85 <sup>a</sup>	43,83 <sup>b</sup>

Letras diferentes implican diferencia significativa, Prueba Anova ( $p < 0,05$ )

La Capacidad de intercambio catiónico aumenta en L1 y L2 debido a la humificación de la materia orgánica, que genera la acumulación de compuestos con carga negativa (como restos de lignina) e incrementa los grupos carboxílicos y fenólicos causando este aumento, igual efecto lo registran Benito *et al.*, (2009); Harada e Inoko (1980); Lax *et al.*, (1986) y Sánchez-Monedero *et al.*, (2002). Cuando ocurre

el proceso de mineralización de la materia orgánica, el carbono orgánico disminuye mientras que el nitrógeno se conserva, ocasionando por consiguiente una disminución en la relación C/N (Navarro y Navarro, 2003).

Tabla 4. Caracterización inicial del sustrato y final del producto obtenido en el lombricompost (L2)

Lombricompost (L2) Parámetro	Tiempo	
	Día 0	Día 90
Humedad Higroscópica (%)	9,96 <sup>a</sup>	8,40 <sup>b</sup>
pH	7,26 <sup>a</sup>	8,68 <sup>b</sup>
Carbono (%)	21,06 <sup>a</sup>	19,12 <sup>b</sup>
MO (%)	42,12 <sup>a</sup>	38,25 <sup>b</sup>
Nitrógeno (%)	1,70 <sup>a</sup>	1,89 <sup>b</sup>
Relación C/N	12,42 <sup>a</sup>	10,13 <sup>b</sup>
Capacidad de intercambio catiónico (mEq/100g)	37,71 <sup>a</sup>	49,43 <sup>b</sup>

Letras diferentes implican diferencia significativa, Prueba Anova ( $p < 0,05$ )

La relación C/N es un criterio de gran importancia en la estimación de la madurez del lombricompost. La relación C/N de un lombricompost maduro debe estar cercana a 10 (Duran y Henriquez, 2009; Jimenez, 2008; Salazar *et al.* 2003). Por lo tanto, para L1 indicaría que el lombricompost aún no ha completado el proceso de maduración. Por lo tanto, sería necesario mantener el proceso durante un periodo de tiempo más prolongado para mejorar la relación C/N. La relación C/N tan baja también podría implicar que el proceso de lombricompostaje podría hacerse con una mayor rapidez (Zhu, 2006). Sin embargo, la relación C/N en L2 es 10 con lo cual podríamos afirmar que el lombricompost ya está maduro.

La correlación de Pearson se determinó a las variables estudiadas (Anexo E). Se encontraron resultados similares para L1 y L2 en todas las correlaciones. Se encontró que a medida que el pH aumenta, la CIC también lo hace debido a la acumulación en las cargas negativas generadas en la humificación de la materia orgánica (disminución del carbono orgánico y la relación C/N) y aumento de los grupos carboxílico y fenólicos.

La capacidad de intercambio catiónico aumenta teniendo en cuenta que la materia orgánica está sufriendo un proceso de humificación (disminuye al igual que el carbono orgánico y así mismo por ende la relación C/N) con la respectiva producción de sustancias húmicas las cuales poseen una alta CIC. La CIC puede aumentar en tanto aumente la estabilidad de la materia orgánica. Las cargas negativas originadas en el lombricompost, provenientes de las disociaciones de los grupos funcionales de las estructuras carbonadas de la materia orgánica (OH Y COOH) son dependientes del pH; si el pH aumenta, las cargas negativas también lo hacen

ocasionando el incremento de la capacidad de intercambio catiónico (Moreno y Moral, 2007).

### **5.3.2. Evaluación de la calidad y grado de madurez en el lombricompost**

En la tabla 5 se muestran los resultados del grado de madurez y calidad del producto final respecto al contenido de cenizas para el lombricompost, se puede observar que tanto para L1 como para L2 cumplen con la norma (<60%).

De acuerdo con la NTC 5167 el contenido de carbonatos no es un parámetro a garantizar ni a caracterizar. Sin embargo, se ha encontrado que los carbonatos pueden ser provenientes de la degradación del estiércol bovino por medio de las glándulas calcíferas que están presentes en el tracto digestivo de la lombriz (Canti y Pierce, 2003; Shipitalo y Le Bayon, 2004), además de los originados a partir del CO<sub>2</sub> liberado en la degradación de la materia orgánica que realizan los microorganismos sobre el estiércol bovino (Roig *et al.*, 2004). Así mismo esta norma especifica que se debe declarar el fósforo total si es mayor del 1%. Por otra parte, se ha encontrado que este debe ser mayor a 0,4% de acuerdo con Sharma *et al.* (1997). En este caso ambos lombricompost presentan un contenido de fósforo mayor del 1%, debido a que la disminución de la masa de materia orgánica en la estabilización y biodegradación, no genera pérdidas de fósforo por volatilización o lixiviación; por tanto, era de esperar una concentración de fósforo durante el proceso de lombricompostaje (Felton *et al.*, 2004; Gálvez-Solá *et al.*, 2010). Cabe resaltar que un alto contenido de fósforo en el lombricompost es favorable debido a que al ser aplicado al suelo después del tercer mes empieza a favorecer el crecimiento de las plantas (Hargreaves *et al.*, 2008).

En la norma NTC 5167 los contenidos de azufre, calcio, magnesio, sodio, cobre, hierro, manganeso y zinc no son parámetros a garantizar ni a caracterizar. Sin embargo, se considera un bajo contenido de azufre el cual podría ser explicado por la incorporación del azufre en los tejidos de la lombriz y con pérdidas por lixiviación durante el proceso de lombricompostaje (Chaudhuri *et al.*, 2000; Elvira *et al.*, 1996). De igual forma el contenido de residuo insoluble encontrado es inferior de acuerdo a lo encontrado por Castillo (2010) para un lombricompost con estiércol de bovino, el cual reporta un 35,4%. En cuanto al contenido de calcio se ha encontrado valores cercanos al 1% (Hargreaves *et al.*, 2008) y de 1 a 1,5% de acuerdo a Fajardo (2002). Así mismo para el magnesio Fajardo (2002) encontró un 0,55%. En este estudio se encontraron contenidos superiores de calcio y magnesio a los anteriormente reportados, lo cual podría influir positivamente al acondicionar un suelo neutralizando parte de la acidez del mismo.

Tabla 5. Parámetros de calidad y madurez del lombricompost (L1 y L2).

Propiedad	Tratamiento		REQUISITOS	Tratamiento	
	L1	L2	NTC 5167 2004	L1	L2
D R (g/cm <sup>3</sup> )	0,67 <sup>a</sup>	0,66 <sup>a</sup>	Máximo 0.6	NC	NC
%CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	11,68 <sup>a</sup>	9,74 <sup>b</sup>	NA		
Cenizas (%)	42,62 <sup>a</sup>	48,82 <sup>b</sup>	Máximo 60	C	C
P V (%)	57,38 <sup>a</sup>	51,18 <sup>b</sup>	Mínimo 40	C	C
C R H (%)	141,35 <sup>a</sup>	128,28 <sup>b</sup>	Mínimo 100%	C	C
pH	8,29 <sup>a</sup>	8,68 <sup>b</sup>	4 - 9	C	C
CO (%)	20,91 <sup>a</sup>	19,12 <sup>b</sup>	Mínimo 15	C	C
MO (%)	41,83 <sup>a</sup>	38,25 <sup>b</sup>	Mínimo 30	C	C
N (%)	1,71 <sup>a</sup>	1,89 <sup>b</sup>	(Declarar)> 1	C	C
Relación C/N	12,22 <sup>a</sup>	10,13 <sup>b</sup>	NA		
CIC (meq/100g)	43,83 <sup>a</sup>	49,43 <sup>b</sup>	Mínimo 30	C	C
F T (%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1,32 <sup>a</sup>	1,25 <sup>b</sup>	(Declarar)> 1	C	C
F A (%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,05 <sup>a</sup>	0,04 <sup>a</sup>	NA		
Azufre (%)	0,24 <sup>a</sup>	0,28 <sup>b</sup>	NA		
R I A (%)	24,14 <sup>a</sup>	19,72 <sup>b</sup>	NA		
CaO (%)	2,49 <sup>a</sup>	2,40 <sup>a</sup>	NA		
MgO (%)	1,17 <sup>a</sup>	1,06 <sup>b</sup>	NA		
Na (%)	0,25 <sup>a</sup>	0,76 <sup>b</sup>	NA		
K <sub>2</sub> O (%)	2,15 <sup>a</sup>	2,74 <sup>b</sup>	(Declarar)> 1	C	C
Fe (ppm)	8118,74 <sup>a</sup>	7125,73 <sup>b</sup>	NA		
Cu (ppm)	41,68 <sup>a</sup>	36,08 <sup>b</sup>	NA		
Mn (ppm)	405,90 <sup>a</sup>	407,05 <sup>a</sup>	NA		
Zn (ppm)	87,77 <sup>a</sup>	75,56 <sup>b</sup>	NA		
Ni (ppm)	27,55 <sup>a</sup>	33,17 <sup>b</sup>	Máximo 420	C	C
Cr (ppm)	23,36 <sup>a</sup>	26,11 <sup>a</sup>	Máximo 1200	C	C
Hg (ppm)	Nd	Nd	Máximo 17	C	C
Cd (ppm)	Nd	Nd	Máximo 39	C	C
Pb (ppm)	Nd	Nd	Máximo 300	C	C

Letras diferentes implican diferencia significativa, Prueba Anova ( $p < 0,05$ ). Dónde: Nd: No detectado, NA: No Aplica, C: Cumple, NC: No Cumple, DR: Densidad real, PV: Pérdidas por volatilización, CRH: Capacidad de retención de humedad, FT: Fósforo total, FD: Fosforo disponible, RIA: Residuo insoluble en ácido.

El sodio en un lombricompost reportado por Hargreaves *et al.*, (2008) está entre el 0,35 y el 2,1%. En L1 y L2 se observa que está en este rango. Se encontró valores bajos en el contenido de sodio en ambos cajones lo cual es favorable teniendo en cuenta que un alto contenido de este elemento aumentaría la conductividad eléctrica, lo que podría generar inhibición en el crecimiento de las plantas al ser adicionado el lombricompost en el suelo (Bustamante *et al.*, 2008).

Respecto al contenido de potasio (2,15 y 2,74% K<sub>2</sub>O para L1 y L2 respectivamente) se encontró que es mayor al establecido por la NTC 5167 (1%). De acuerdo a Fajardo (2002) debe estar entre 1 y 1,5%.

En cuanto a los contenidos de Cu, Mn y Zn la norma no establece su caracterización, sin embargo, Castillo (2010) ha encontrado que para lombricompost de estiércol los contenidos de estos metales son 43 ppm, 428 ppm y 31 ppm respectivamente, los cuales son valores semejantes a los encontrados en este estudio, excepto para Zinc cuyo valor es aproximadamente el doble al encontrado por este autor.

Respecto a los metales pesados la norma establece que son parámetros a caracterizar y se determinó bajas concentraciones en cuanto a cromo y níquel, y no se detectó concentraciones de mercurio cadmio y plomo.

De acuerdo a la NTC 5167 el contenido de nitrógeno debe declararse si es mayor del 1%. En ambos tratamientos se encontró que el contenido de este parámetro está por encima de este valor. Como se mencionó para el compost, se ha encontrado que lombricompost con contenidos medios de cenizas (como en este lombricompost) tienen altos contenidos de nitrógeno (Dimambro *et al.*, 2007). En la misma norma el contenido de carbono debe ser mínimo del 15%. Tanto L1 como L2 muestran un aporte significativamente superior a este valor, lo cual podría generar un impacto positivo al ser aplicado en el suelo (Meléndez, 2003).

Por otra parte, la relación C/N, el pH y la capacidad de intercambio catiónico son parámetros a caracterizar. La relación C/N de un lombricompost estable debe estar cercana a 10 (Duran y Henríquez, 2009; Salazar *et al.* 2003), con lo cual podríamos afirmar que L2 es más estable. En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico y el rango de pH los tratamientos cumplen con la norma.

Se realizó la prueba estadística de ANOVA del lombricompost final en función del sitio de muestreo y como se puede observar en la tabla del anexo D no se evidencia diferencia significativa en las propiedades excepto fósforo total y azufre.

#### **5.4. EVALUACIÓN DEL GRADO DE CONDENSACIÓN DE LAS SUSTANCIAS HÚMICAS EN EL COMPOST Y LOMBRICOMPOST**

Se calculó el índice de humificación (HR<sub>2</sub>) de acuerdo a la ecuación 14, previa determinación del %CEHT, %CAH y %CAF. Los resultados se observan en la tabla 6.

De acuerdo con el índice de humificación HR<sub>2</sub> que debe ser mayor a 1 (tabla 5), todos los tratamientos cumplen a excepción de algunas zonas del tratamiento T1, este índice me indicaría que T1 no está estable a diferencia de los tratamientos T2, T3, T4, L1 y L2.

Tabla 6. Grado de condensación de las sustancias húmicas en todos los tratamientos

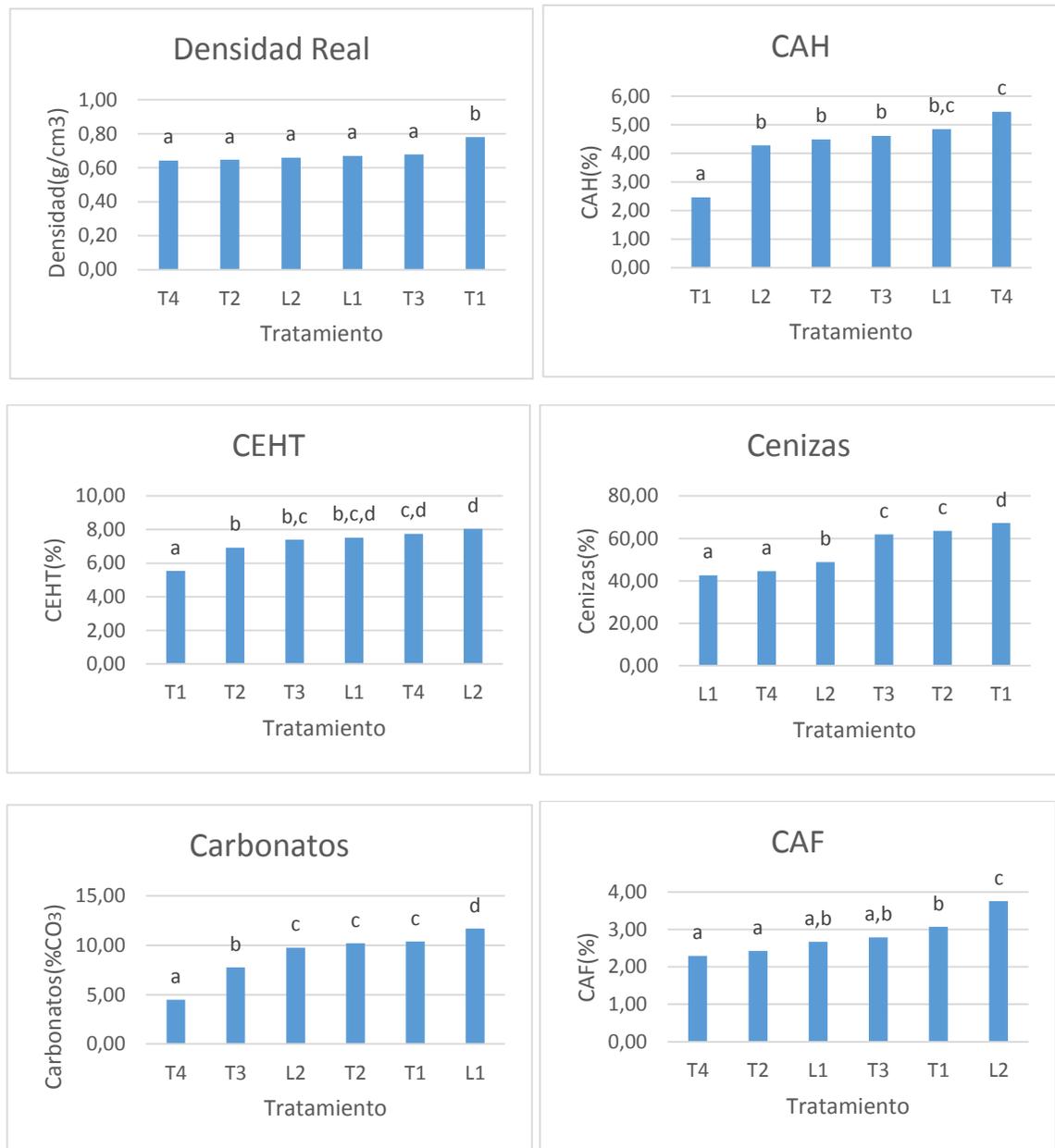
Tratamiento	Muestra	%CEHT	%CAH	%CAF	HR <sub>2</sub>
T1	1a1m6	5,75	2,27	3,48	0,65
	1a2m6	5,47	2,28	3,19	0,71
	1m1m6	5,63	2,89	2,73	1,06
	1m2m6	5,28	2,91	2,38	1,22
	1b1m6	5,60	2,21	3,39	0,65
	1b2m6	5,47	2,22	3,25	0,68
T2	2a1m5	7,36	4,94	2,42	2,04
	2a2m5	7,53	4,69	2,84	1,65
	2m1m5	6,46	4,16	2,30	1,81
	2m2m5	6,95	4,18	2,77	1,51
	2b1m5	6,51	4,28	2,24	1,91
	2b2m5	6,69	4,69	2,00	2,34
T3	3a1m5	7,68	4,95	2,73	1,82
	3a2m5	7,20	4,67	2,53	1,85
	3m1m5	7,28	4,28	3,00	1,43
	3m2m5	7,13	4,15	2,98	1,39
	3b1m5	7,50	4,94	2,57	1,92
	3b2m5	7,60	4,69	2,91	1,61
T4	4a1m6	7,71	5,90	1,81	3,26
	4a2m6	7,56	6,04	1,53	3,96
	4m1m6	7,51	4,94	2,57	1,92
	4m2m6	7,06	4,68	2,38	1,97
	4b1m6	8,58	5,60	2,97	1,88
	4b2m6	8,10	5,59	2,51	2,23
L1	1L61	7,66	4,84	2,82	1,72
	1L62	7,37	4,85	2,52	1,92
L2	2L61	7,96	4,28	3,68	1,16
	2L62	8,13	4,29	3,84	1,12

## 5.5. COMPARACIÓN ENTRE COMPOST Y LOMBRICOMPOST

En la figura 19 se muestra que respecto a la densidad real todos los tratamientos están por encima de lo estipulado en la NTC 5167 que especifica una densidad máxima de 0,6 g/cm<sup>3</sup>. En relación al contenido de cenizas (máximo de 60%) se encontró que T4, L1 y L2 tienen un valor inferior al 60%, en cambio T1, T2 y T3 están por encima levemente de este valor. Para un compost maduro se espera que el %CAH sea mayor al %CAF con respecto al %CEHT. Los porcentajes encontrados

para %CAH con respecto al %CEHT son 70,45%; 64,89%; 64,49%; 62,3%; 53,29%; 44,49% para T4, T2, L1, T3, L2, T1, respectivamente.

Figura 19. Densidad, Cenizas, Carbonatos, CEHT, CAH y CAF de la muestra final de compost y lombricompost



Letras diferentes implican diferencia significativa (p>0.05) Prueba Tukey.

Se observa que para T1 el %CAH es menor al 50% lo que infiere una relación CAH/CAF menor a 1 característico de un abono orgánico inmaduro. Así mismo lo importante en las sustancias húmicas es que el % CAF debe ser inferior al % CAH para asegurar un adecuado proceso de madurez con lo cual la relación HR<sub>2</sub> se

garantiza que es superior a 1. Se encontró porcentajes de %CAF con respecto al %CEHT de 35,51% para L1 y de 46,71% para L2, para T1, T2, T3 y T4 se encontró 55,51; 35,11; 37,70; y 29,55 respectivamente.

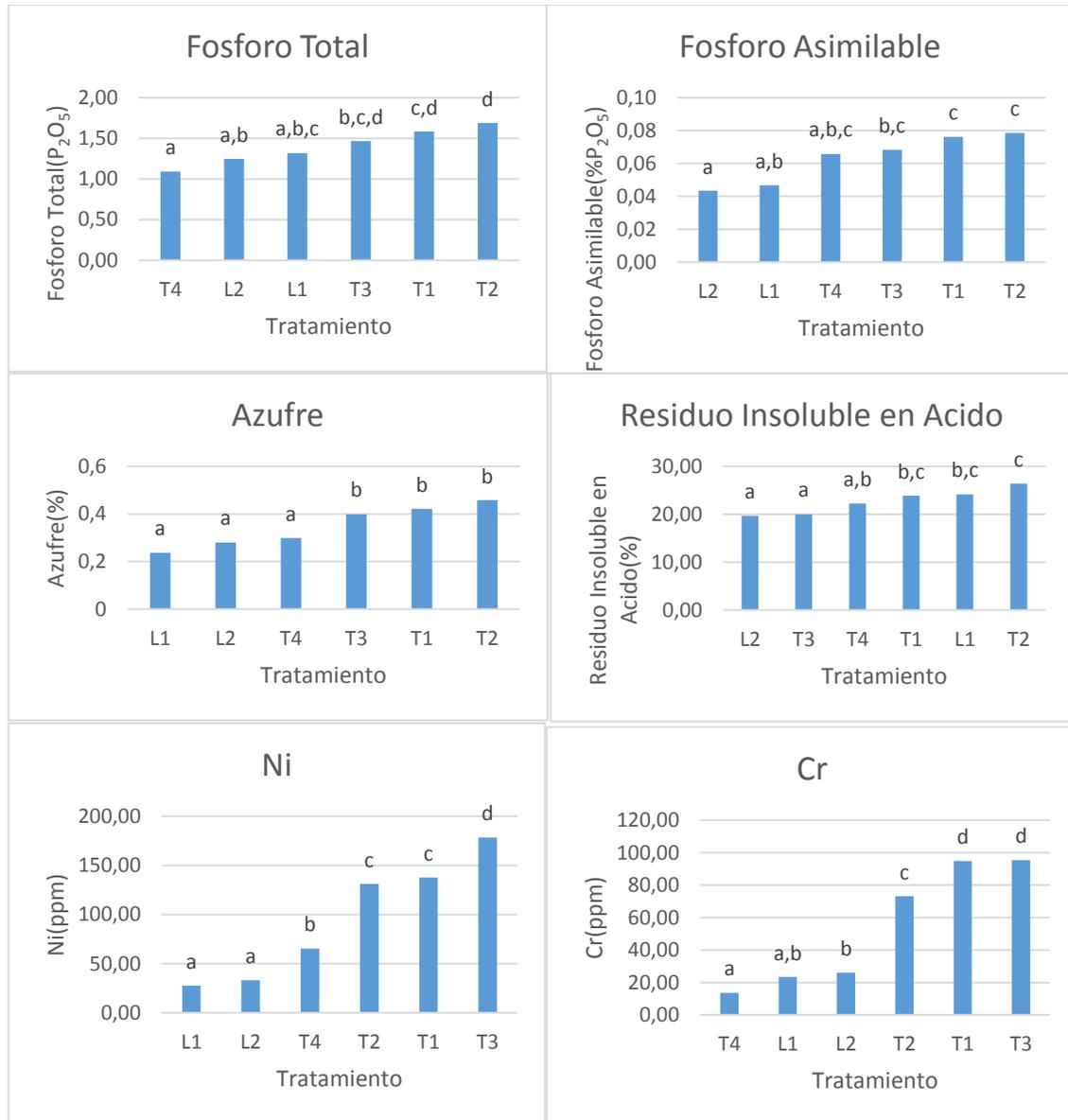
Se puede evidenciar un valor alto de %CAF con respecto al %CEHT para T1, con lo cual se puede afirmar que no ha madurado debido a que la relación  $HR_2$  es menor a 1. Para los demás tratamientos se aprecia que la relación  $HR_2$  es mayor a 1, lo que permite concluir que los demás tratamientos ya están estables. Se realizó la prueba de ANOVA y de Tukey para determinar si había diferencia significativa en los tratamientos T1, T2, T3, T4, L1 y L2 en cada una de las propiedades (Anexo F).

En la figura 20 se muestra que todos los tratamientos tienen un porcentaje superior al 1% del contenido de fósforo total, el cual debe ser reportado según la norma NTC 5167. Los 2 tratamientos de lombricompost (L1 y L2) presentan el menor contenido de fósforo asimilable con respecto a los 4 tratamientos de compost, lo cual es similar a lo encontrado por Lazcano *et al.*, (2008). Los contenidos más bajos de azufre se encuentran en L1 y L2, los cuales podrían ser explicados por la incorporación del azufre en los tejidos de la lombriz y con pérdidas por lixiviación durante el proceso de lombricompostaje (Chaudhuri *et al.*, 2000; Elvira *et al.*, 1996). En cuanto al residuo insoluble en ácido para los tratamientos de lombricompost se hallaron valores más bajos a lo encontrado por Castillo (2010) para un lombricompost con estiércol bovino, el cual encontró un 35,4%. Para compost Agudelo (2010) encontró 19,2%, con lo cual todos los tratamientos de compost de este trabajo se encuentran levemente por encima de este porcentaje. En cuanto al níquel y al cromo todos los tratamientos cumplen con lo establecido por la NTC 5167 segunda actualización.

En la figura 21 se presentan los resultados del contenido de CO, MO, N total, C/N, pH y CIC para los diferentes tratamientos (T1 a T4, L1 y L2). En cuanto al contenido de CO se aprecia que T1, T2 y T3 presentan el menor porcentaje, no obstante, T3 contiene exactamente un 15% de CO indicando esto que cumple con lo establecido en la NTC 5167 que establece un contenido mayor o igual al 15%. Como se mencionó antes el bajo contenido de CO es debido a la alta tasa de mineralización alcanzada sobre todo en los primeros tratamientos. Por otra parte, los 2 tratamientos de lombricompost y T4 están por encima de este valor, lo que implicaría que estos tratamientos pueden hacer un aporte más significativo de MO en comparación con T1, T2 y T3. El contenido de nitrógeno en T1 es significativamente inferior al encontrado en los demás tratamientos, lo que implicaría un proceso de volatilización del nitrógeno en forma de amoníaco. La NTC 5167 establece que debe reportarse siempre y cuando sea superior al 1%, en este caso (T1) el contenido hallado corresponde a un 0,4%. La relación C/N de L1 y L2 está en un rango óptimo el cual está cercano a 10 y T4 está estable debido a que está en un rango entre 12 y 15% (Sztern y Pravia, 1999). Palmisano y Barlaz (1996) proponen que un compost ya está estable con una relación C/N de 10, con lo cual T2 y T3 también habrían completado el proceso de estabilidad mientras que T1 no. Se encontró un valor

significativamente inferior en L1 en comparación con los otros tratamientos con respecto al valor del pH. Este resultado es similar a lo reportado por Lazcano et al (2008) el cual reporta valores más bajos de pH en el lombricompostaje en comparación con el compostaje. Por otro lado, para la CIC los tratamientos L1 y L2 cumplen con la norma y son significativamente superiores a los tratamientos T1, T2, T3 y T4 (Hernández, 2010).

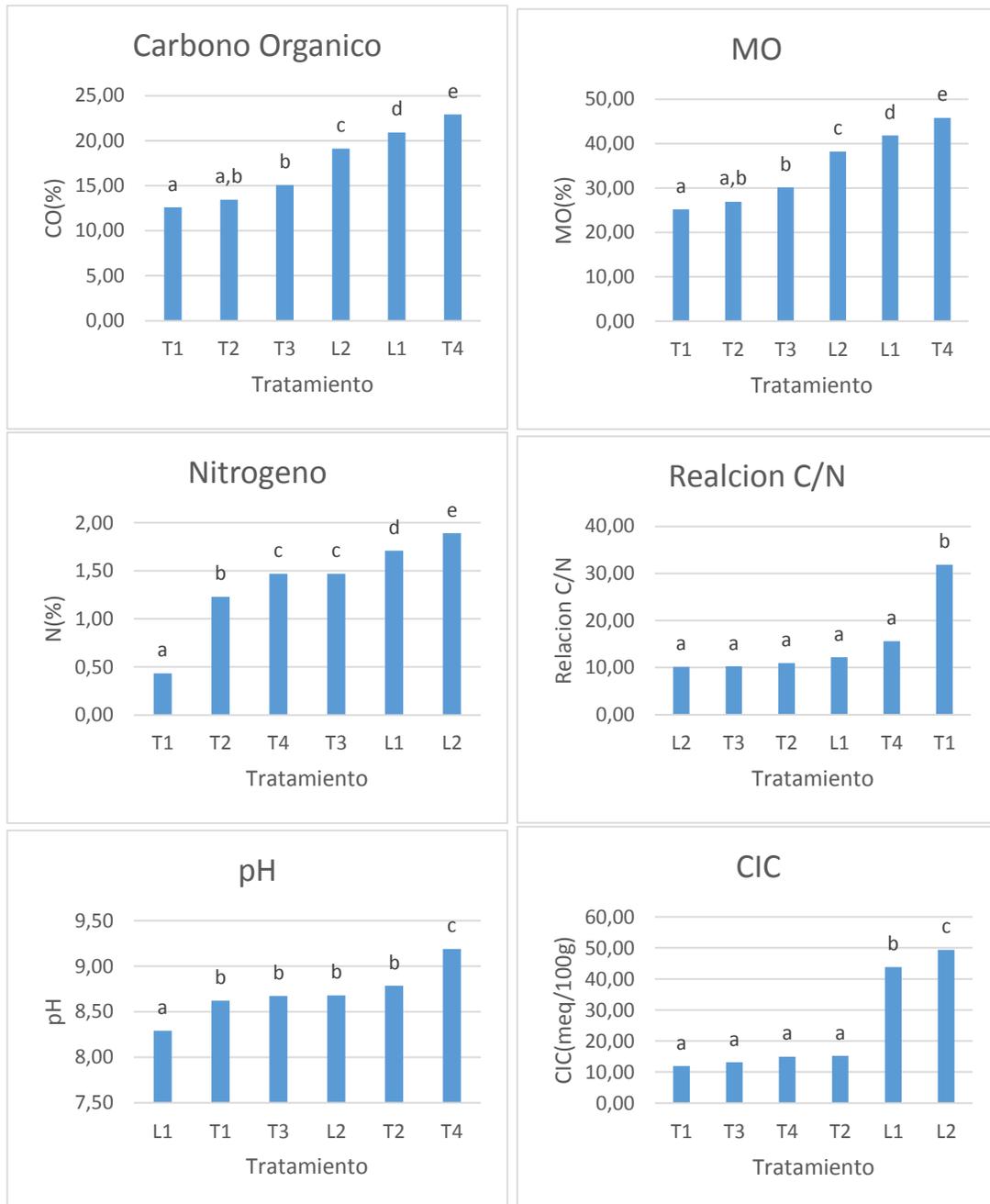
Figura 20. Fósforo total y asimilable, azufre, residuo insoluble en ácido, níquel y cromo muestra final de compost y lombricompost



Letras diferentes implican diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) Prueba Tukey.

Este resultado es similar a lo reportado por Lazcano et al (2008), lo cual se observa en la figura 21 donde se reportan valores más bajos de pH en el lombricompostaje en comparación con el compostaje. Por otro lado, para la CIC los tratamientos L1 y L2 cumplen con la norma y son significativamente superiores a los tratamientos T1, T2, T3 y T4 (Hernández, 2010).

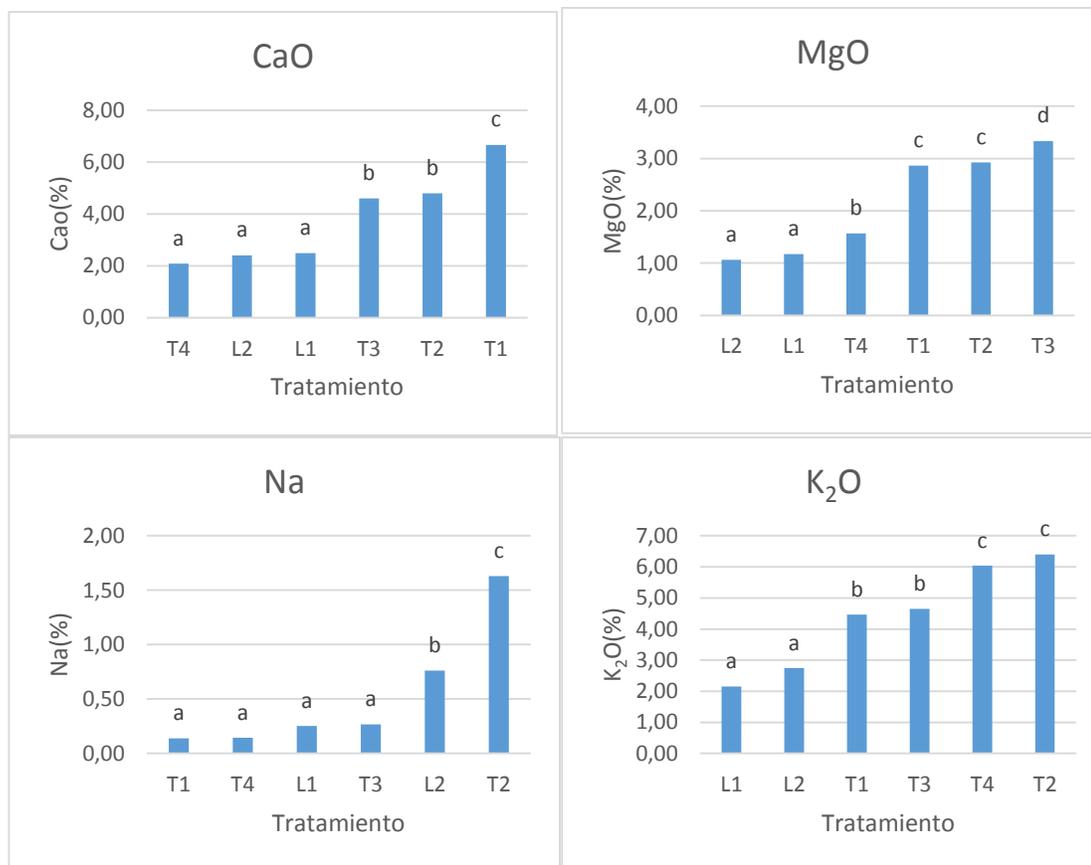
Figura 21. CO, MO, N, relación C/N, pH y CIC muestra final de compost y lombricompost



Letras diferentes implican diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) Prueba Tukey.

En la figura 22 se observa que el contenido de calcio es significativamente inferior en L1, L2 y T4. En T1 hay un contenido de calcio significativamente superior el cual puede ser debido a una adición excesiva de cal dolomita en comparación a los otros tratamientos. Campanioni (1985) reporta valores muy cercanos entre compost y lombricompost para el contenido de calcio.

Figura 22. Contenido de CaO, MgO, Na y K<sub>2</sub>O % de la muestra final de compost y lombricompost



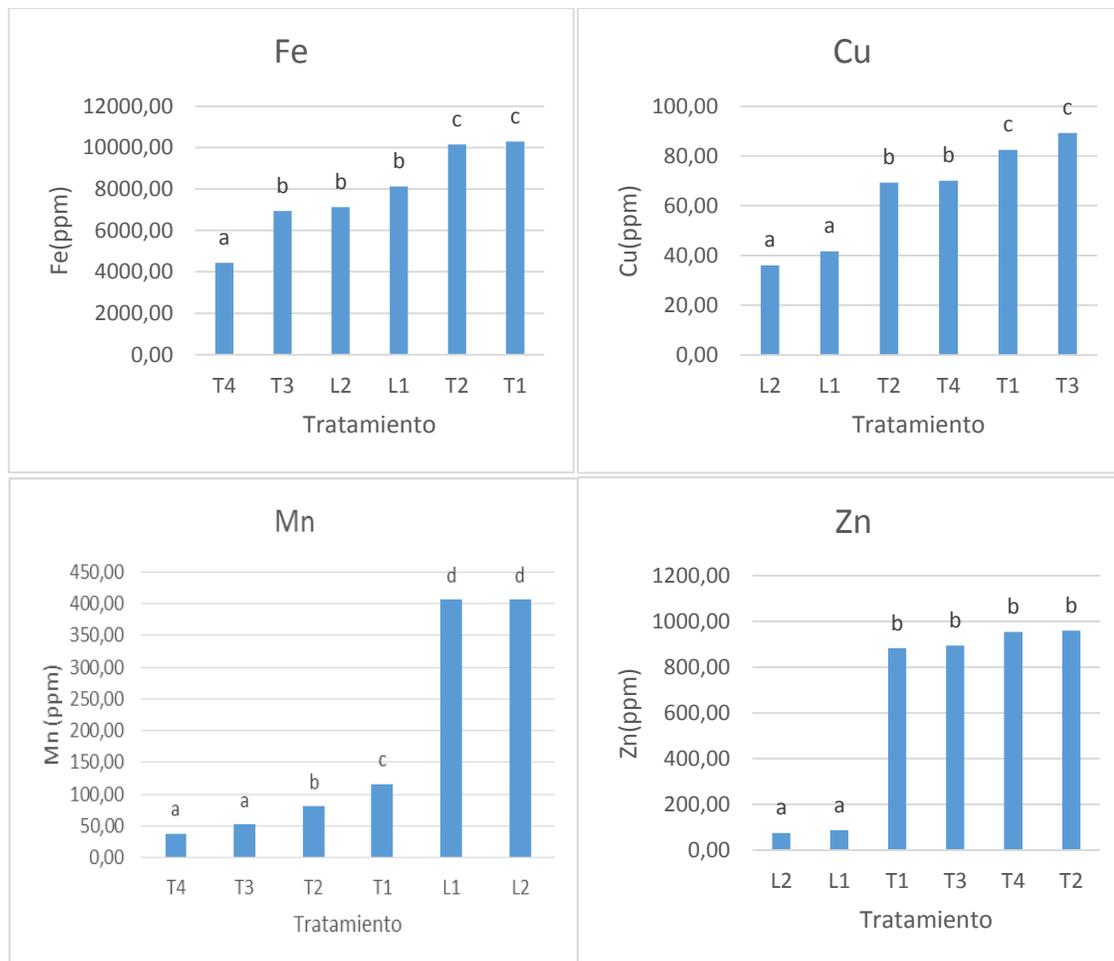
Letras diferentes implican diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) Prueba Tukey.

Los cajones de lombricompost (L1 y L2) presentan los valores más bajos de magnesio lo que concuerda con lo encontrado por Campanioni (1985), el cual encontró que estos valores eran iguales o incluso más bajos que los valores de magnesio en los tratamientos de compost. La mayoría de cajones presentan un bajo contenido de sodio, lo cual es favorable teniendo en cuenta que un alto contenido de este elemento aumentaría la conductividad eléctrica lo que podría generar inhibición en el crecimiento de las plantas al ser adicionado el lombricompost en el suelo. Por ende, la adición del compost T2 podría generar inhibición en el crecimiento de las plantas al ser adicionado al suelo. Los 2 tratamientos de

lombricompost muestran los valores más bajos de potasio en comparación con los 4 tratamientos de compost; resultado similar al obtenido por Campanioni (1985).

En la figura 23 se reporta el contenido de microelementos de los diferentes tratamientos.

Figura 23. Fe, Cu, Mn y Zn (ppm) muestra final de compost y lombricompost



Letras diferentes implican diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) Prueba Tukey.

En cuanto a la concentración de cobre se observa que los 2 tratamientos de lombricompost presentan los valores más bajos de este elemento en comparación con los 4 tratamientos de compost. Cabe resaltar que, al ser un metal pesado, los 2 tratamientos de lombricompost presentan un mejor índice de calidad de acuerdo con este parámetro. Los 2 tratamientos de lombricompost presentan un valor significativamente superior en el porcentaje de manganeso con respecto a todos los tratamientos de compost lo cual es similar a lo encontrado por Campanioni

(1985). Los 2 tratamientos de lombricompost presentan valores significativamente bajos de Zn en comparación con los 4 tratamientos de compost.

Los productos obtenidos durante el proceso de lombricompostaje tanto en L1 como en L2 se consideran maduros y estables teniendo en cuenta que cumplen con los requisitos exigidos en la NTC 5167 segunda actualización para abonos orgánicos y presentan un aporte significativo de nutrientes cuando se aplican al suelo como son el carbono orgánico, nitrógeno, fósforo y potasio; así como poseen una alta capacidad de intercambio catiónico. Además, su bajo contenido de metales pesados los convierte en productos de alta calidad. Sin embargo, se observó que L1 es mejor en calidad debido a que presenta un mayor índice de humificación y una mayor capacidad de retención de humedad.

## 6. CONCLUSIONES

En el proceso de implementación de una compostera en la vereda Betania del municipio de Totoró, un sistema de aireación como son los huecos verticales es un método de aireación pasiva que disminuye el costo del proceso ya que no se requiere del uso de equipos y permite un control o estabilización de la temperatura. El número y diámetro de los huecos regula la intensidad de la aireación y puede controlar de algún modo el contenido de humedad y mantener una temperatura estable, además permite mantener los niveles termófilos en mayor escala y al mismo tiempo el mantenimiento de condiciones en las que no se inhibe la actividad microbiana, sin embargo se favorecen las pérdidas de nitrógeno en forma amoniacal cuando la aireación debida a estos agujeros es considerablemente alta lo cual ocurre con agujeros de gran tamaño.

Se pudo concluir de este estudio que el uso de agujeros verticales en la superficie de cada cajón, se tradujo en una mejor tasa de descomposición biológica de los residuos orgánicos y una disminución de las pérdidas de materia orgánica, además un sistema de aireación pasiva puede ser un método eficaz y representar un ahorro de dinero en el compostaje de los residuos de galería, puesto que el compostaje mediante aireación forzada, usando equipos o volteando continuamente, implica grandes inversiones de capital y costos de operación.

Cuando no se tiene un control de la aireación se alcanzan altas temperaturas que producen una mineralización de la materia orgánica resultando en un producto pobre en este parámetro y además se producen pérdidas de nitrógeno en forma amoniacal.

El uso de aserrín como agente de carga permitió tener una relación C/N adecuada además de proporcionar al medio una estructura porosa que ofrece canales de flujo de aire bien formados que facilitan la circulación de gases. En cambio, el uso de hierba seca tiene una estructura suave que tiende a colapsar cuando esta se encuentra húmeda favoreciendo condiciones anaeróbicas.

La calidad del compost cumple con los estándares de abono orgánico establecido en la NTC para los tratamientos T3 y T4, de acuerdo a esta normatividad se puede decir que el compost obtenido a partir de residuos de galería puede ser usado en cualquier actividad de tipo agrícola.

En cuanto al contenido de Materia Orgánica del producto final para T3 y T4, presentaron un porcentaje de 30,12 y 45,83% respectivamente, lo que indica que

este compost da estabilidad y nutrientes al suelo, permitiendo buen desarrollo radicular dando como resultado un equilibrio orgánico para los cultivos.

El proceso de descomposición se caracterizó por determinaciones de parámetros tales como la temperatura, pH, contenido de materia orgánica y nitrógeno. Los principales cambios que se produjeron durante el compostaje fueron una disminución en la proporción C/N, un aumento de la capacidad de intercambio catiónico y del valor de pH.

En la elaboración del compost resultó beneficioso emplear como inoculante microbiano capas alternas de 5 cm de estiércol equino ya que aporta por una parte cantidades significativas de carbono y sobre todo microorganismos beneficiosos para el proceso, lo que permite afirmar que es una manera fácil, sencilla y económica de obtención de materia orgánica de alto valor.

El contenido de metales pesados (Ni, Cr, Hg, Cd y Pb) en su conjunto no sobrepasa los niveles máximos permitidos por las norma NTC 5167. Los metales mercurio, cadmio y plomo no fueron detectados.

Los productos obtenidos durante el proceso de lombricompostaje tanto en L1 como en L2 se consideran maduros y estables teniendo en cuenta que cumplen con los requisitos exigidos en la NTC 5167/2004 para abonos orgánicos y presentan un aporte significativo de nutrientes cuando se aplican al suelo como son el carbono orgánico, nitrógeno, fósforo y potasio; así como poseen una alta capacidad de intercambio catiónico. Además, su bajo contenido de metales pesados los convierte en productos de alta calidad.

El índice de humificación en promedio es mayor a 1 en los todos los tratamientos excepto en T1, lo cual me indica que prevalece el contenido de sustancias húmicas sobre las sustancias fúlvicas en T2, T3, T4, L1 y L2, lo que implica que hay un adecuado proceso de humificación de la materia orgánica

## 7. RECOMENDACIONES

- Adicionar un contenido más alto aserrín en los tratamientos de compostaje posteriores a este estudio para mejorar la relación C/N inicial, favoreciendo así procesos de mineralización y de formación de sustancias húmicas.
- Realizar un estudio que permita evaluar el efecto de la aplicación del compost al suelo
- Realizar una caracterización de microorganismos que son benéficos para la agricultura al final del proceso de compostaje.
- Realizar un estudio de las diferentes formas de nitrógeno inorgánico para determinar el grado de mineralización
- En la elaboración del compost se recomienda el volteo de las pilas una vez cada 15 días.
- Realizar un estudio para comprobar el efecto sobre la germinación de semillas.

## BIBLIOGRAFIA

- ABAD, M., MARTÍNEZ, P. F., MARTÍNEZ, M. D., MARTÍNEZ, J., 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura* 11: 141-154.
- AGUDELO, J. Evaluación de diferentes tipos de Compost y Lombricompost aplicado al suelo de vivero de palma aceitera (*Elais guinensis*). Tesis de Especialización. Valledupar: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía 2010. 22 p.
- ALBUQUERQUE, J .A., GONZALES, J., GARCIA, D. and CEGARRA, J. 2006. Measuring detoxification and maturity in compost made from “alperujo”, the solid by-product of extracting olive oil by the two-phase centrifugation system. *Chemosphere* (64) 470-477.
- ALBUQUERQUE, J.A., GONZALES, J., TORTOSA, G., AIT-BADDI, G. and CEGARRA, J. 2009. Evaluation of “alperujo” composting base on organic matter degradation, humification and compost quality. *Biodegradation* (20) 250-270.
- AMNER, W., MCCARTHY, A.J., and EDWARDS C. (1988). Quantitative assessment of factors affecting the recovery of indigenous and release thermophilic bacteria from compost. *Appl. Environ. Microbiol.* 54: 3107-3112.
- BARRADAS, A (2009). *Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales. Estado del Arte.* Instituto Tecnológico de Minatitlán, México. 3 p.
- BENITO, M., MASAGUER, A., MOLINER, A., HONTORIA, C. and ALMOROX, J. 2009. Dynamics of pruning waste and spent horse litter co-composting as determined by chemical parameters. *Biosource Technology* (100) 497-500.
- BLANDON, G.C., DÁVILA, M.T.A. y RODRIGUEZ, N.V. 1999. Caracterización microbiológica y físico-química de la pulpa de café sola y con mucílago, en proceso de lombricompostaje. *Cenicafé*(50) 5-23.
- BOLLO, E. 1999. *Lombricultura: una alternativa de reciclaje.* Quito. Soboc Grafic. 149 p. CHACÓN A.G., BLANCO J.M. (eds). 1999. *Manual práctico para la fabricación de abono orgánico utilizando lombrices.* San José. Costa Rica. 39 p.
- BONGCAM, E. *Guía para compostaje y manejo de suelos.* Convenio Andrés Bello CAB, serie ciencia y tecnología, Bogota. 2003.
- BRAVO, I. GIRALDO, E. 2003. *Manual de prácticas de química agrícola: análisis de suelos.* Universidad del Cauca. p. 9-77.
- BUSTAMANTE, M., PAREDES, C., MARHUENDA-EGEA, F., PEREZ-ESPINOSA, A., BERNAL, M. and MORAL, R. 2008. Co-composting of distillery wastes with animal

manures; Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability, *Chemosphere* (72) 551-557.

CABEZA, I.O., LÓPEZ, R., RUIZ-MONTOYA. and DÍAZ, M.J. 2013. Maximising municipal solid waste – legume trimming residue mixture degradation in composting by control parameters optimization. *Journal of environmental management*(128) 267.

CAMPANIONI, L. *Guía moderna de Lombrices de Tierra y utilización rentable del humus*. Ed De Vecchi.Barcelona, España.1985.

CANTI, M. G. and PIERCE, T. G. 2003. Morphology and dynamics of calcium carbonate granules produced by different earthworm species. *Pedobiologia*(47) 511-521.

CAPISTRÁN, F., E. ARANDA, and J.C. ROMERO. 1999. *Manual de Reciclaje, Compostaje y Lombricompostaje*. 3ª Edición. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Ver. México. 151 p.

CASTILLO, J. *Análisis de lombricompostos a partir de diferentes sustratos*. Tesis de Especialización.Universidad Nacional. Facultad de Agronomía 2010.49-58 p.

CASTRO, L. *Biología Agrocolombiana*. Fundación Colombiana de Ciencias. 1995.

CEGARRA, J. *Fraccionamiento de fertilizantes orgánicos y de sus productos de humificación*. Tesis doctoral. Universidad autónoma de Madrid 1994. 60-71 p.

CHACÓN, A.G., BLANCO J.M. 1999. *Manual práctico para la fabricación de abono orgánico utilizando lombrices*. San José. Costa Rica. 39 p.

CHAUDHURI, P., PAL, T., BHATTACHARJEE, G. and DEY, S. 2000. Chemical changes during vermicomposting (*Perionyx excavatus*) of kitchen waste. *Tropical Ecology* (41)107-110.

CHICA, A. y GARCIA J. L.,2008. Aspectos técnicos en el desarrollo y control del proceso de compostaje. En: Moreno,J. y Moral,R.(Eds).*Compostaje*,pp.141-164.Ediciones Mundi-Prensa.Madrid.

CHRISTIAN, A; EVANYLO, G. and PEASE, J. *On farm composting: a guide to principles, planning and operations*. Blacksburg, Virginia: Virginia Cooperative Extension (VCE), 2009. Pag 36.

CIAVATTA, C., FRANCIOSO, O., MONTECCHIO, D., CAVANI, L. y GRIGATTI, M. 2001. Use of organic wastes of agro-industrial and municipal origin for soil fertilisation: quality criteria for organic matter. En: *I Encuentro Internacional Gestión*

de residuos orgánicos en el ámbito rural mediterráneo. Cátedra Zurich Medio ambiente de la Universidad de Navarra. Pag 117-132.

COOPERBAND, L. The Art and Science of Composting A resource for farmers and compost producers. Madison: University of Wisconsin. Center for Integrated Agricultural Systems, 2002. Pag 14.

COROMINAS, E. y PEREZ, M.L. 1984.Compost: Elaboración y características. Agrícola Vergel (146) 88-94.

COYNE, M. Soil microbiology: An exploratory approach. Albany, NY: Delmar publishers. 1999. Pag 462.

CRUZ, H. La guadua, nuestro bambú. Armenia, Quindío, Colombia, Corporación Autónoma del Quindío y Centro Nacional para el estudio del bambú y la guadua. 1994. p. 293

DALZELL, H.; BLIDDLESTONE, A.; GRAY, K. y THURAIRAJAN, K. Manejo del suelo: producción y uso del compost en ambientes tropicales y subtropicales. Servicio de Recursos, Manejos y Conservación de Suelos de la FAO. Roma, Italia. 1991. Pag 178.

DIAS, B.O., SILVA, C.A., HIGASHIKAWA, F.S., ROIG,A. and SANCHEZ-MONEDERO, M.A. 2010. Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure:Effect on organic matter degradation and humification. Bioresource Technology(101)1239-1246.

DIMAMBRO, M.E., LILYWHITE, R.D. and RAHN, C.R. 2007. The Physical, Chemical And Microbial Characteristics of Biodegradable Municipal Waste Derived Composts. Compost Science and Utilization (15) 243-252.

DOMINGUEZ, J. State-of-the-art and new perspectives on vermicomposting research. Earthworm Ecology.2da ed. Ed Edwards, C.A. Florida. 2004. Pag 381-424.

DURAN, L y HENRIQUEZ, C. 2009. Crecimiento y reproducción de la lombriz roja (*Eisenia foetida*) en cinco sustratos orgánicos. Agronomía Costarricense (33) 275-281.

ELVIRA, C., GOICOECHEA, M., SAMPEDRO, L., MATO, S. and NOGALES, R. 1996. Bioconversion of solid paper-pulp mill sludge by earthworms. Bioresource Technology (57)173-177.

ELVIRA, C., SAMPEDRO, L., BENITEZ, E. and NOGALES, R. 1998. Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with *Eisenia andrei*. A pilot-scale study. Bioresource Technology (63) 205-211.

- FAJARDO, V. Manual Agropecuario. 1a ed. Ed Limerín. Bogotá. 2002. Pag 481-502.
- FAO. 1997. China: reciclaje de desechos orgánicos en la agricultura (40)9-15.
- FAO. Manual de compostaje del agricultor. Santiago de Chile. 2013. Pag 25.
- FELTON, G., CARRL, L., PRIGGE, C. and BOUKAMP, J. 2004. Nitrogen and phosphorus dynamics in co-composted yard trimmings and broiler litter. *Compost Science and Utilization* (12) 349-355.
- FERRUZI C. 1986. Manual de lombricultura. Madrid. España. Mundi-Prensa. 138 p
- FOGIEL, A. Composting on the farm. East Lansing, MI: Michigan State University, 2003. Pag 12.
- GALVEZ, G. Uso de microorganismos eficientes para degradar desechos avícolas y ecotecnologías realizadas en el centro de aprendizaje e intercambio del saber – CAIS-del instituto de nutrición de centroamérica y panamá-INCAP-, San Juan Sacatepequez, Guatemala. Tesis de Grado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Agronomía, 2012. p. 52
- GALVEZ-SOLA, L., MORALES, J., MAYORAL, A., MARHUENDA-EGEA, F., MARTINEZ-SABATER, M., PEREZ-MURCIA, M., BUSTAMANTE, M., PAREDES, C. and MORAL, R. 2010. Estimation of phosphorus content and dynamics during composting: Use of near infrared spectroscopy. *Chemosphere*(78) 13-21.
- GARCIA, C., HERNANDEZ, T., COSTA, F. and AYUSO, M. 1992. Evaluation of the maturity waste compact using simple chemical parameters. *Science and Plant Analysis* (23) 1501-1512.
- GUERRERO, J. 1993. Abonos orgánicos: tecnología para el manejo ecológico de suelos. Perú. Ed. Red de Acción en Alternativas al Uso de Agroquímicos. 89 p.
- GROSSI, M. L. Evaluación de la calidad de los productos de las usinas de compostaje de Brasil de residuos sólidos domésticos a través de metales pesados y sustancias orgánicas. Universidad de Sao Paulo 1993.
- HAUG, R.T. The practical Handbook of Compost Engineering. Lewis Publishers. 1993. Pag 10.
- HARADA, Y. and INOKO, A. 1980. Relationship between cation-exchange capacity and degree of maturity of city refuse composts. *Soil Science and Plant Nutrition* (26) 353-362.

HARGREAVES, J., ADL, M. and WARMAN, P. A review of use of composted municipal solid waste in agriculture. 2008. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (123) 1-14.

HERNANDEZ, D. Vermicompost y compost de residuos hortícolas como componentes de sustratos para la producción de planta ornamental y aromática. Caracterización de los materiales y respuesta vegetal. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Producción Vegetal. 2010. 87 p.

HIMANEN, M. and HÄNNINEN, K. 2009. Effect of commercial mineral-based additives on composting and compost quality. *Waste Management* (29) 2265-2273.

ICA. Fertilización en diversos cultivos, manual de asistencia técnica. Quinta Edición. 1992. Pag 21.

JARAMILLO, G. Y ZAPATA, L. Aprovechamiento de los residuos sólidos en Colombia. Tesis de Especialización. Medellín: Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería 2008. 35 p.

JIANG, T., LI, G., TANG, Q., MA, X., WANG, G. and SHUCHARDT, F. 2015. Effects of aeration method and aeration rate on greenhouse gas emissions composting of pig feces in pilot scale. *Journal of environmental sciences* (31) 128-130.

JIMENEZ, M. Extractos de vermicomposta en la producción orgánica de lechuga en hidroponía. Tesis de Maestría. Montecillo Texcoco: Colegio de Postgraduados 2008. 104p.

LAICH, F. El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje. In: Jornada Técnica: Fertilidad y Calidad del Suelo. Experiencias de fertilización orgánica en platanera (21 de octubre de 2011, Santa Cruz de Tenerife, España) Unidad de Microbiología Aplicada. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias, Proyecto BIOMUSA 1. Pag 1-7

LATINPYME [online]. Bogotá, Colombia. Mipyme: a aprovechar los residuos sólidos. 2014. Visto 11/05/2016. Disponible en: <http://latinpymes.com/articulo/3002>.

LAX, A., ROIG, A. and COSTA, F. 1986. A method for determining the cation-exchange capacity of organic materials. *Plant and Soil* (94) 349-355.

LAZCANO, C., GOMEZ-BRANDON, M. and DOMINGUEZ, J. 2008. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere* (72) 1013-1019.

LUQUE M,O.Alternativas economicas para el manejo de residuos Organicos en centros de reciclaje.Fundacion para la investigacion agricola,X Jornada de Conservacion Ambiental,Valencia,Venezuela,18-20 Julio de 1997,10 p.

MARTÍNEZ, C. 1996. Potencial de la Lombricultura. Elementos básicos para su desarrollo.Lombricultura técnica mexicana. México. 146 p.

MATHUR,S.P, DANIEL,H., OWEN,G., SCHNITZER,M. and DUGAN,J.1993. Determination of compost Biomaturity.II..Optical Density of Water Extracts of compost as a Reflection of their Maturity.Biological Agriculture and Horticulture.Vol.10.p. 87-108.

MENOYO, A. Valoración agronómica de la gallinaza: compostaje. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco. 1995. 22 p.

MELÉNDEZ, G. Residuos orgánicos y material orgánica del suelo. En: Memorias Taller de Abonos Orgánicos. Costa Rica: CATIE, GTZ, UCR, CANIAN, 2003.

MORALES-MUNGUÍA, J. C., M. V. FERNÁNDEZ-RAMÍREZ, A. MONTIEL-COTA, B. C. PERALTA-BELTRÁN. 2009. Evaluación de sustratos orgánicos en la producción de lombricomposta y el desarrollo de lombriz (*Eisenia foetida*). BIOtecnia XI(1):19-26.

MORENO,J.Compostaje.Publicado por Mundi-Prensa Libros, Madrid España.2008.570 p.

MORENO, J. and MORMENEO, S. Microbiología y bioquímica del proceso de compostaje. En: Moreno, J. y Moral, R(Eds). Compostaje. Ediciones Mundi-Prensa.Madrid. 2008. Pag 111-140.

MORENO, J., MORAL, R. COMPOSTAJE. Multi Prensa Libros S.A. Mexico.2007. Pág 298.

MOTE, C.R. and GRIFFIS, C.L. 1980.Variations in the composting process for different organic carbon sources. Agricultural Wastes (2) 215-223.

MUÑOZ, J. Compostaje en pescador, Cauca: Tecnología apropiada para el manejo de residuos orgánicos y su contribución a la solución los problemas medioambientales. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Facultad de Ingeniería y Administracion.2005.27p.

NAVARRO, S., NAVARRO, G. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Química Agrícola. 2003. Pag 54-57.

NOGALES, R., DOMINGUEZ, J. y MATO, S. Vermicompostaje. En:Moreno, J. y Moral, R(Eds). Compostaje. Ediciones Mundi-Prensa.Madrid. 2008. Pag 187-207.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC) 234. Abonos o Fertilizantes. Método de Ensayo para la Determinación Cuantitativa del Fosforo.Bogota.1996.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA (NTC) 5167. Materiales Orgánicos Utilizados como Fertilizantes o Acondicionadores de Suelos. Bogotá, 2004.

PALMISANO, A. y BARLAZ, M. Microbiology of solid waste. CRC. Boca Raton-Florida.1996. Pag 116.

PLANAS, A. Correlación de Variables físico-químicas en el Proceso de Compostaje y su Impacto en Programas de Fertilización. Conferencia presentada en el Seminario "Materiales Orgánicos en la Agricultura". Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Comité Regional de Antioquia. Medellín, Marzo 27 y 28. 2003. p. 1 – 10.

POINCELOT, R.P. 1974. A scientific examination of the principles and practice ofcomposting. Compost Sci (15) 24-31.

RIASCOS, R. Fertilización de cultivos en clima frío. Segunda Edición. Monómeros Colombo-Venezolanos S.A, Santa fé de Bogotá. 1998. p. 372-377.

ROIG, A.,CAYUELA, M.A. and SANCHEZ-MONEDERO, M.A. 2004.The use of elemental sulphur as organic alternative to control pH during composting of olive mill wastes. Chemosphere (57) 1099-1105.

SALAZAR SOSA, E., ORTHIS HERNANDEZ, M. VASQUEZ ALARCON, A. y VASQUEZ VASQUEZ ,C. Abonos Orgánicos y plasticultura. Cap 1-5. Facultad de Agricultura y Zootecnia de la UJED, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C y COC y TED. Mexico. 2003. Pag 1-109.

SANCHEZ-MONEDERO, M., CEGARRA, J., GARCIA, D. and ROIG, A. 2002.Chemical and structural evolution of humic acids during organic waste composting. Biodegradation(13) 361-371.

SCHULDT,M. 2008. Iniciación de lombricultivos de Eisenia fetida (y E. andrei) (Oligochaeta, Lumbricidae) con siembras de baja densidad. Estrucplan VIII(676):1-7. (en línea). Consultado abril 2009. Disponible en:<http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDarticulo=2027>.

SHARMA, V.K., CANDITELLI, M., FORTUNA, F. and CORNACCHIA, G. 1997. Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting: review. Energy Conversion and Management (38) 453-478.

SHARP, R.J., RILEY, P.W., AND WHITE, D. (1991). Heterotrophic thermophilic Bacilli. In: Thermophilic Bacteria (Ed. Kristjansson, J.K.), CRC Press Inc., Boca Raton U.S.A.,pp. 19-50

SHIPITALO, M.J. and LE BAYON, R. Quantifying the effects of earthworms on soil aggregation and porosity. In: Edwards,C.A(Ed). Earhworm Ecology. Florida. 2004. Pag 183-200.

SILVA, J., LÓPEZ, P. y VALENCIA, P. Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje. Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería 2003. 6-10 p.

SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO. Fundamentos para la Interpretación de Analisis de Suelos, Plantas y Aguas para riego. Tercera Edición. Santafe de Bogota.1990.

SOLANO, M., IRIARTE, F., CIRIA, P. and NEGRO, J.2001.Performance characteristics of three aeration systems in the composting of sheep manure and Straw. Journal agricultura (79) 317-329.

SOLE-MAURI, F., ILLA, J., FRANCESC, A.M. and FLOTATS, X. 2007.Integrated biochemical and physical model for the composting process. Bioresource Technology (98) 3283-3284.

SORLI, A. Uso de fertilizantes orgánicos en la Agricultura. En: XVI Encuentros Estatales de amantes de la basura. Valladolid, España: Coordinadora de organizaciones Agrícolas y Ganaderas (COAG), 2001.

STOFFELLA,J Y KAHN,A. Utilización de compost en sistemas de cultivo hortícola.Publicado por Mundi-Prensa Libros. Madrid Barcelona.2003.379p

SZTERN, D. y PRAVIA, M. Organización Panamericana de la salud. Manual para la elaboración del compost: bases conceptuales y procedimientos. Uruguay.1999. Pag 69.

SOTO, G. y MELENDEZ, G. Taller de abonos orgánicos. Sabanilla, Costa rica. 2003. Pág 123.

TCHOBANGLIOUS, G., HILARY, T., VIGIL, S. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Editorial Mc Graw Hill. España. 1996.

TUOMELA, M; M VIKMAN; A HATAKKA & M ITÄVAARA. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review.Bioresource Technology 72, 2000. 169-183.

VAN HEERDEN, I., CRONJE, C., SWART, S.H. and KOTZÉ, J.M. 2002. Microbial, chemical and physical aspects of citrus waste composting. *Bioresource Technology* (81) 73.

WANG, P., CHANGA, C., WATSON, M., DICK, W., CHEN, Y. and HOITINK, H. 2004. Maturity indices for composted dairy and pig manures. *Soil Biology and Biochemistry*, 767-776. Wilkins, K., & Larsen, K. (1996). Volatile organic compounds from garden waste. *Chemosphere* 2049 - 2055.

WARD, M. *Composting A beginner's guide*. Slippery Rock University. Slippery Rock. 2002. Pag 26.

ZHU, N. 2006. Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system. *Bioresource Technology* (97) 1870-1875.

**ANEXO A**

**RELACIÓN C/N TEÓRICA DE LA MATERIA PRIMA DEL PROCESO DE COMPOSTAJE**

Tabla 1. Relación C/N para el tratamiento 1 (T1)

Tratamiento 1					
Material	Peso (Kg)	Porcentaje(%)	Porcentaje/100	Relacion C/N (Teorica)	Relacion C/N calculada
Plátano (troncho, plátano)(fruta)	61,55	8,85	0,088	35	3,10
Cebolla (leguminosa)	13	1,87	0,019	10	0,19
Vainas arveja(leguminosa)	154	22,13	0,221	9	1,99
Vainas de fríjol(leguminosa)	4	0,57	0,006	10	0,06
Papa(verdura)	35,6	5,12	0,051	10	0,51
Zanahoria(verdura)	3	0,43	0,004	10	0,04
Habichuela(leguminosa)	8	1,15	0,011	10	0,11
Vainas Haba(Verdura)	20	2,87	0,029	10	0,29
Acelga(Verdura)	24	3,45	0,034	10	0,34
Espinaca(Verdura)	30	4,31	0,043	10	0,43
Ullucos(Verdura)	35	5,03	0,050	10	0,50
yuca(Verdura)	44	6,32	0,063	10	0,63
Hierba	40	5,75	0,057	12	0,69
Aserrin	15	2,16	0,022	500	10,78
Estiercol ganado	179,2	25,76	0,258	18	4,64
Cal	29,4	4,23			
Total	695,75	100,00			24,31

Tabla 2. Relación C/N para el tratamiento 2 (T2)

Tratamiento 2					
Material	Peso (Kg)	Porcentaje(%)	Porcentaje/100	Relacion C/N	Relacion C/N calculada
Plátano (troncho, plátano)(fruta)	20	3,94	0,039	35	1,38
Cebolla (leguminosa)	20	3,94	0,039	10	0,39
Vainas arveja(leguminosa)	160	31,53	0,315	9	2,84
Vainas de fríjol(leguminosa)	6	1,18	0,012	10	0,12
Papa(verdura)	40	7,88	0,079	10	0,79
Zanahoria(Verdura)	2	0,39	0,004	10	0,04
Habichuela(leguminosa)	4	0,79	0,008	10	0,08
Vainas Haba(Verdura)	10	1,97	0,020	10	0,20
Acelga(Verdura)	18	3,55	0,035	10	0,35
Espinaca(Verdura)	21	4,14	0,041	10	0,41
Ullucos(Verdura)	23	4,53	0,045	10	0,45
yuca(Verdura)	8	1,58	0,016	10	0,16
Hierba	60	11,82	0,118	12	1,42
Aserrin	15	2,96	0,030	500	14,78
Estiercol ganado	100	19,70	0,197	18	3,55
Cal	0,5	0,10			
Total	507,5	100,00			26,96

Tabla 3. Relación C/N para el tratamiento 3 (T3)

Tratamiento 3					
Material	Peso (Kg)	Porcentaje(%)	Porcentaje/100	Relacion C/N (Teorica)	Relacion C/N calculada
Plátano (troncho, plátano)(fruta)	42	7,45	0,075	35	2,61
Cebolla (leguminosa)	15	2,66	0,027	10	0,27
Vainas arveja(leguminosa)	148	26,26	0,263	9	2,36
Vainas de frijol(leguminosa)	5	0,89	0,009	10	0,09
Papa(verdura)	45,6	8,09	0,081	10	0,81
Zanahoria(verdura)	1,5	0,27	0,003	10	0,03
Habichuela(leguminosa)	6	1,06	0,011	10	0,11
Vainas Haba(Verdura)	35	6,21	0,062	10	0,62
Acelga(Verdura)	28	4,97	0,050	10	0,50
Espinaca(Verdura)	27	4,79	0,048	10	0,48
Ullucos(Verdura)	30	5,32	0,053	10	0,53
yuca(Verdura)	43	7,63	0,076	10	0,76
Hierba	42	7,45	0,075	12	0,89
Aserrin	15	2,66	0,027	500	13,31
Estiercol ganado	80	14,20	0,142	18	2,56
Cal	0,4	0,07			
Total	563,5	100,00			25,92

Tabla 4. Relación C/N para el tratamiento 4 (T4)

Tratamiento 4					
Material	Peso (Kg)	Porcentaje(%)	Porcentaje/100	Relacion C/N	Relacion C/N calculada
Plátano (troncho, plátano)(fruta)	41,3	7,64	0,076	35	2,67
Cebolla (leguminosa)	14	2,59	0,026	10	0,26
Vainas arveja(leguminosa)	100	18,50	0,185	9	1,67
Vainas de frijol(leguminosa)	4	0,74	0,007	10	0,07
Papa(verdura)	50	9,25	0,093	10	0,93
Zanahoria(verdura)	2,8	0,52	0,005	10	0,05
Habichuela(leguminosa)	2	0,37	0,004	10	0,04
Vainas Haba(Verdura)	28	5,18	0,052	10	0,52
Acelga(Verdura)	50	9,25	0,093	10	0,93
Espinaca(Verdura)	45	8,33	0,083	10	0,83
Ullucos(Verdura)	35	6,48	0,065	10	0,65
yuca(Verdura)	38	7,03	0,070	10	0,70
Hierba	40	7,40	0,074	12	0,89
Aserrin	20	3,70	0,037	500	18,50
Estiercol ganado	70	12,95	0,130	18	2,33
Cal	0,3	0,06			
Total	540,4	100,00			31,04

## ANEXO B

### RESULTADOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS CON RESPECTO AL SITIO DE MUESTREO

**Tabla 1.** Prueba de ANOVA para propiedades del compostaje en función del sitio de muestreo (T1)

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Humedad (%)	Entre grupos	6,376	2	3,188	1,003	,374
	Dentro de grupos	162,132	51	3,179		
	Total	168,508	53			
pH	Entre grupos	,046	2	,023	,107	,899
	Dentro de grupos	10,995	51	,216		
	Total	11,041	53			
Carbono Orgánico (%)	Entre grupos	8,269	2	4,135	,107	,899
	Dentro de grupos	1976,955	51	38,764		
	Total	1985,224	53			
Materia Orgánica (%)	Entre grupos	23,554	2	11,777	,102	,903
	Dentro de grupos	5873,459	51	115,166		
	Total	5897,013	53			
Nitrógeno (%)	Entre grupos	,048	2	,024	,167	,847
	Dentro de grupos	7,276	51	,143		
	Total	7,324	53			
Relación C/N	Entre grupos	139,533	2	69,766	,961	,389
	Dentro de grupos	3701,316	51	72,575		
	Total	3840,848	53			

**Tabla 2.** Prueba de ANOVA para propiedades del compostaje en función del sitio de muestreo (T2)

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Humedad (%)	Entre grupos	4,958	2	2,479	1,654	,203
	Dentro de grupos	62,932	42	1,498		
	Total	67,890	44			
pH	Entre grupos	,032	2	,016	,813	,451
	Dentro de grupos	,839	42	,020		
	Total	,871	44			
Carbono Orgánico (%)	Entre grupos	3,853	2	1,926	,604	,551
	Dentro de grupos	133,991	42	3,190		
	Total	137,843	44			

Continuación Tabla 2. Prueba de ANOVA para propiedades del compostaje en función del sitio de muestreo (T2)

Materia Orgánica (%)	Entre grupos	11,482	2	5,741	,606	,550
	Dentro de grupos	398,150	42	9,480		
	Total	409,632	44			
Nitrógeno (%)	Entre grupos	,305	2	,153	1,026	,367
	Dentro de grupos	6,253	42	,149		
	Total	6,558	44			
Relación C/N	Entre grupos	26,418	2	13,209	,740	,483
	Dentro de grupos	749,206	42	17,838		
	Total	775,625	44			

Tabla 3. Prueba de ANOVA para propiedades del compostaje en función del sitio de muestreo (T3)

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Humedad (%)	Entre grupos	5,122	2	2,561	3,287	,047
	Dentro de grupos	32,721	42	,779		
	Total	37,843	44			
pH	Entre grupos	,171	2	,086	2,836	,070
	Dentro de grupos	1,268	42	,030		
	Total	1,439	44			
Carbono Orgánico (%)	Entre grupos	21,102	2	10,551	5,582	,007
	Dentro de grupos	79,382	42	1,890		
	Total	100,484	44			
Materia Orgánica (%)	Entre grupos	62,693	2	31,347	5,579	,007
	Dentro de grupos	235,972	42	5,618		
	Total	298,665	44			
Nitrógeno (%)	Entre grupos	,052	2	,026	1,809	,176
	Dentro de grupos	,608	42	,014		
	Total	,661	44			
Relación C/N	Entre grupos	10,589	2	5,294	6,930	,003
	Dentro de grupos	32,086	42	,764		
	Total	42,675	44			

Tabla 4. Prueba de Tukey<sup>a</sup> del contenido de MO en función del sitio de muestreo

Sitio de Muestreo	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
Parte Alta	15	27,2527	
Parte Media	15	28,8633	28,8633
Parte Baja	15		30,1373
Sig.		,163	,314

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 15,000.

Tabla 5. Prueba de Tukey<sup>a</sup> de C/N en función del sitio de muestreo

Sitio de Muestreo	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
Parte Alta	15	10,3593	
Parte Media	15	10,4141	
Parte Baja	15		11,4147
Sig.		,984	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 15,000.

Tabla 6. Prueba de ANOVA en función del sitio de muestreo (T4)

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Humedad (%)	Entre grupos	,449	2	,225	,088	,916
	Dentro de grupos	129,928	51	2,548		
	Total	130,377	53			
pH	Entre grupos	,922	2	,461	,782	,463
	Dentro de grupos	30,070	51	,590		
	Total	30,992	53			
Carbono Orgánico (%)	Entre grupos	30,517	2	15,259	2,077	,136
	Dentro de grupos	374,661	51	7,346		
	Total	405,178	53			
Materia Orgánica (%)	Entre grupos	90,712	2	45,356	2,078	,136
	Dentro de grupos	1113,231	51	21,828		
	Total	1203,942	53			
Nitrógeno (%)	Entre grupos	,029	2	,015	,108	,898
	Dentro de grupos	6,857	51	,134		
	Total	6,886	53			
Relación C/N	Entre grupos	17,245	2	8,622	1,866	,165
	Dentro de grupos	235,714	51	4,622		
	Total	252,959	53			

**ANEXO C**  
**CORRELACIONES DE PEARSON PARA EL COMPOST**

Tabla 1. Correlación de Pearson para T1

		Humedad (%)	pH	CO (%)	MO (%)	N (%)	Relación C/N	Sitio de Muestreo	Tiempo de Compostaje
Humedad	Correlación de Pearson	1	-,541**	,791**	,790**	,721**	-,321*	-,144	-,657**
	Sig. (bilateral)		,000	,000	,000	,000	,018	,298	,000
	N	54	54	54	54	54	54	54	54
pH	Correlación de Pearson	-,541**	1	-,791**	-,792**	h	-,339*	,057	-,060
	Sig. (bilateral)	,000		,000	,000	,003	,012	,684	,666
	N	54	54	54	54	54	54	54	54
CO (%)	Correlación de Pearson	,791**	-,791**	1	1,000**	,646**	,112	-,055	-,382**
	Sig. (bilateral)	,000	,000		,000	,000	,421	,692	,004
	N	54	54	54	54	54	54	54	54
MO (%)	Correlación de Pearson	,790**	-,792**	1,000**	1	,645**	,115	-,054	-,381**
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000		,000	,407	,699	,004
	N	54	54	54	54	54	54	54	54
N (%)	Correlación de Pearson	,721**	-,400**	,646**	,645**	1	-,601**	-,055	-,447**
	Sig. (bilateral)	,000	,003	,000	,000		,000	,695	,001
	N	54	54	54	54	54	54	54	54
Relación C/N	Correlación de Pearson	-,321*	-,339*	,112	,115	-,601**	1	,187	,446**
	Sig. (bilateral)	,018	,012	,421	,407	,000		,175	,001
	N	54	54	54	54	54	54	54	54

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

Tabla 2. Correlación de Pearson para T2

		Humedad (%)	pH	CO (%)	MO (%)	N (%)	Relación C/N	Sitio de Muestreo	Tiempo de Compostaje
Humedad	Correlación de Pearson	1	- ,342*	,066	,066	,161	-,128	,220	-,469**
	Sig. (bilateral)		,021	,665	,666	,290	,403	,146	,001
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
pH	Correlación de Pearson	-,342*	1	-,214	-,214	-,217	,209	,157	,376*
	Sig. (bilateral)	,021		,158	,158	,152	,168	,305	,011
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
CO (%)	Correlación de Pearson	,066	-,214	1	1,000**	,459**	-,145	-,166	-,596**
	Sig. (bilateral)	,665	,158		,000	,002	,342	,275	,000
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
MO (%)	Correlación de Pearson	,066	-,214	1,000**	1	,459**	-,145	-,166	-,596**
	Sig. (bilateral)	,666	,158	,000		,002	,342	,275	,000
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
Ni (%)	Correlación de Pearson	,161	-,217	,459**	,459**	1	-,896**	,101	-,251
	Sig. (bilateral)	,290	,152	,002	,002		,000	,510	,097
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
Relación C/N	Correlación de Pearson	-,128	,209	-,145	-,145	-,896**	1	-,072	-,046
	Sig. (bilateral)	,403	,168	,342	,342	,000		,637	,764
	N	45	45	45	45	45	45	45	45

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

Tabla 3. Correlación de Pearson para T3

		Humedad (%)	pH	CO (%)	MO (%)	N (%)	Relación C/N	Sitio de Muestreo	Tiempo de Compostaje
Humedad	Correlación de Pearson	1	,134	,207	,207	,603**	-,315*	,220	-,188
	Sig. (bilateral)		,379	,173	,173	,000	,035	,147	,217
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
pH	Correlación de Pearson	,134	1	,421**	,421**	,178	,248	,341*	,009
	Sig. (bilateral)	,379		,004	,004	,242	,101	,022	,955
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
CO (%)	Correlación de Pearson	,207	,421**	1	1,000**	,413**	,633**	,457**	-,606**
	Sig. (bilateral)	,173	,004		,000	,005	,000	,002	,000
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
MO (%)	Correlación de Pearson	,207	,421**	1,000**	1	,413**	,633**	,457**	-,606**
	Sig. (bilateral)	,173	,004	,000		,005	,000	,002	,000
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
N (%)	Correlación de Pearson	,603**	,178	,413**	,413**	1	-,441**	,014	-,431**
	Sig. (bilateral)	,000	,242	,005	,005		,002	,926	,003
	N	45	45	45	45	45	45	45	45
Relación C/N	Correlación de Pearson	-,315*	,248	,633**	,633**	-,441**	1	,442**	-,231
	Sig. (bilateral)	,035	,101	,000	,000	,002		,002	,127

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

Tabla 4. Correlación de Pearson respecto al tiempo de T4

		Humedad (%)	pH	CO (%)	MO (%)	N (%)	Relación C/N	Sitio de Muestreo	Tiempo de Compostaje
Humedad	Correlación de Pearson	1	,510**	-,015	-,015	,400**	-,485**	,054	-,159
	Sig. (bilateral)		,000	,913	,912	,003	,000	,697	,250
	N	54	54	54	54	54	54	54	54
pH	Correlación de Pearson	,510**	1	-,453**	-,453**	-,202	-,032	,007	,591**
	Sig. (bilateral)	,000		,001	,001	,142	,821	,961	,000
	N	54	54	54	54	54	54	54	54
CO (%)	Correlación de Pearson	-,015	-,453**	1	1,000**	,467**	,148	-,251	-,390**
	Sig. (bilateral)	,913	,001		,000	,000	,284	,067	,004
	N	54	54	54	54	54	54	54	54
MO (%)	Correlación de Pearson	-,015	-,453**	1,000**	1	,467**	,148	-,251	-,389**
	Sig. (bilateral)	,912	,001	,000		,000	,284	,067	,004
	N	54	54	54	54	54	54	54	54
N (%)	Correlación de Pearson	,400**	-,202	,467**	,467**	1	-,794**	,016	-,666**
	Sig. (bilateral)	,003	,142	,000	,000		,000	,906	,000
	N	54	54	54	54	54	54	54	54
Relación C/N	Correlación de Pearson	-,485**	-,032	,148	,148	-,794**	1	-,229	,557**
	Sig. (bilateral)	,000	,821	,284	,284	,000		,096	,000
	N	54	54	54	54	54	54	54	54

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

## ANEXO D

### RESULTADOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES DEL COMPOST FINAL DE LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS RESPECTO AL SITIO DE MUESTREO

Tabla 1. Prueba de ANOVA del compost final en función del sitio de muestreo

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Humedad (%)	Entre grupos	5,598	2	2,799	1,405	,260
	Dentro de grupos	65,728	33	1,992		
	Total	71,326	35			
Cenizas (%)	Entre grupos	1,543	2	,771	,009	,991
	Dentro de grupos	2797,505	33	84,773		
	Total	2799,048	35			
CO <sub>3</sub> (%)	Entre grupos	1,682	2	,841	,128	,881
	Dentro de grupos	217,716	33	6,597		
	Total	219,398	35			
pH	Entre grupos	,179	2	,089	1,402	,260
	Dentro de grupos	2,102	33	,064		
	Total	2,281	35			
CIC (meq/100)	Entre grupos	7,226	2	3,613	,444	,645
	Dentro de grupos	268,691	33	8,142		
	Total	275,916	35			
Nitrogeno (%)	Entre grupos	,045	2	,023	,110	,896
	Dentro de grupos	6,759	33	,205		
	Total	6,804	35			
Carbono (%)	Entre grupos	1,178	2	,589	,031	,970
	Dentro de grupos	627,302	33	19,009		
	Total	628,480	35			
Relación C/N	Entre grupos	196,272	2	98,136	,956	,395
	Dentro de grupos	3387,804	33	102,661		
	Total	3584,076	35			
Fósforo disponible(%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Entre grupos	,001	2	,000	1,937	,160
	Dentro de grupos	,005	33	,000		
	Total	,006	35			

Continuación Tabla 1. Prueba de ANOVA del compost final en función del sitio de muestreo

Fósforo total (%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Entre grupos	,554	2	,277	4,276	,022
	Dentro de grupos	2,139	33	,065		
	Total	2,694	35			
Azufre (%)	Entre grupos	,036	2	,018	3,969	,029
	Dentro de grupos	,148	33	,004		
	Total	,184	35			
CEHT (%)	Entre grupos	1,027	2	,513	,596	,557
	Dentro de grupos	28,417	33	,861		
	Total	29,444	35			
CAH (%)	Entre grupos	1,187	2	,593	,417	,663
	Dentro de grupos	46,982	33	1,424		
	Total	48,169	35			
CAF (%)	Entre grupos	,161	2	,080	,356	,703
	Dentro de grupos	7,463	33	,226		
	Total	7,624	35			
CaO (%)	Entre grupos	3,878	2	1,939	,644	,532
	Dentro de grupos	99,345	33	3,010		
	Total	103,223	35			
MgO(%)	Entre grupos	,316	2	,158	,308	,737
	Dentro de grupos	16,932	33	,513		
	Total	17,249	35			
Na (%)	Entre grupos	,068	2	,034	,077	,926
	Dentro de grupos	14,585	33	,442		
	Total	14,653	35			
K <sub>2</sub> O(%)	Entre grupos	2,949	2	1,475	1,299	,286
	Dentro de grupos	37,454	33	1,135		
	Total	40,403	35			
Fe(ppm)	Entre grupos	8829868,088	2	4414934,044	,616	,546
	Dentro de grupos	236368239,716	33	7162673,931		
	Total	245198107,804	35			
Cu (ppm)	Entre grupos	199,996	2	99,998	1,033	,367
	Dentro de grupos	3193,812	33	96,782		
	Total	3393,808	35			

Continuación Tabla 1. Prueba de ANOVA del compost final en función del sitio de muestreo

Mn(ppm)	Entre grupos	1159,467	2	579,733	,562	,575
	Dentro de grupos	34018,198	33	1030,854		
	Total	35177,664	35			
Zn (ppm)	Entre grupos	5344,844	2	2672,422	,717	,496
	Dentro de grupos	123050,692	33	3728,809		
	Total	128395,536	35			
Ni (ppm)	Entre grupos	1982,104	2	991,052	,539	,588
	Dentro de grupos	60697,455	33	1839,317		
	Total	62679,559	35			
Cr (ppm)	Entre grupos	35,359	2	17,680	,014	,986
	Dentro de grupos	41371,404	33	1253,679		
	Total	41406,763	35			

**ANEXO E**  
**CORRELACIONES PEARSON LOMBRICOMPOST**

Tabla 1. CORRELACION PEARSON L1

Pearson Lombricompost 1(L1)		Humedad(%)	pH	ClC(meq/100g)	Nitrogeno(%)	Carbono(%)	Relacion C/N	Materia Organica	Tiempo
<b>Humedad (%)</b>	Correlación de Pearson	1	-,997(**)	-,985(**)	-,838(*)	,983(**)	,926(**)	,983(**)	-,998(**)
	Sig. (bilateral)		0	0	0,037	0	0,008	0	0
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
<b>pH</b>	Correlación de Pearson	-,997(**)	1	,968(**)	0,811	-,974(**)	-,911(*)	-,974(**)	,994(**)
	Sig. (bilateral)	0		0,002	0,05	0,001	0,012	0,001	0
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
<b>ClC(meq/100g)</b>	Correlación de Pearson	-,985(**)	,968(**)	1	,867(*)	-,976(**)	-,930(**)	-,976(**)	,985(**)
	Sig. (bilateral)	0	0,002		0,025	0,001	0,007	0,001	0
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
<b>Nitrogeno(%)</b>	Correlación de Pearson	-,838(*)	0,811	,867(*)	1	-,922(**)	-,979(**)	-,921(**)	,866(*)
	Sig. (bilateral)	0,037	0,05	0,025		0,009	0,001	0,009	0,026
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
<b>Carbono(%)</b>	Correlación de Pearson	,983(**)	-,974(**)	-,976(**)	-,922(**)	1	,979(**)	1,000(**)	-,992(**)
	Sig. (bilateral)	0	0,001	0,001	0,009		0,001	0	0
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
<b>Relacion C/N</b>	Correlación de Pearson	,926(**)	-,911(*)	-,930(**)	-,979(**)	,979(**)	1	,979(**)	-,945(**)
	Sig. (bilateral)	0,008	0,012	0,007	0,001	0,001		0,001	0,004
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
<b>Materia Organica</b>	Correlación de Pearson	,983(**)	-,974(**)	-,976(**)	-,921(**)	1,000(**)	,979(**)	1	-,992(**)
	Sig. (bilateral)	0	0,001	0,001	0,009	0	0,001		0
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
<b>Tiempo</b>	Correlación de Pearson	-,998(**)	,994(**)	,985(**)	,866(*)	-,992(**)	-,945(**)	-,992(**)	1
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0,026	0	0,004	0	
	N	6	6	6	6	6	6	6	6

Tabla 2. CORRELACION PEARSON L2

Pearson Lombricompost 2(L2)		Humedad(%)	pH	CIC(meq/100g)	Nitrogeno(%)	Carbono(%)	Relacion C/N	Materia Organica	Tiempo
Humedad(%)	Correlación de Pearson	1	-,995(**)	-,973(**)	-,923(**)	,997(**)	,978(**)	,997(**)	-,996(**)
	Sig. (bilateral)		0	0,001	0,009	0	0,001	0	0
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
pH	Correlación de Pearson	-,995(**)	1	,991(**)	,955(**)	-,993(**)	-,993(**)	-,993(**)	1,000(**)
	Sig. (bilateral)	0		0	0,003	0	0	0	0
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
CIC(meq/100g)	Correlación de Pearson	-,973(**)	,991(**)	1	,986(**)	-,969(**)	-1,000(**)	-,969(**)	,989(**)
	Sig. (bilateral)	0,001	0		0	0,001	0	0,001	0
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
Nitrogeno(%)	Correlación de Pearson	-,923(**)	,955(**)	,986(**)	1	-,917(*)	-,983(**)	-,917(*)	,953(**)
	Sig. (bilateral)	0,009	0,003	0		0,01	0	0,01	0,003
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
Carbono(%)	Correlación de Pearson	,997(**)	-,993(**)	-,969(**)	-,917(*)	1	,974(**)	1,000(**)	-,992(**)
	Sig. (bilateral)	0	0	0,001	0,01		0,001	0	0
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
Relacion C/N	Correlación de Pearson	,978(**)	-,993(**)	-1,000(**)	-,983(**)	,974(**)	1	,974(**)	-,992(**)
	Sig. (bilateral)	0,001	0	0	0	0,001		0,001	0
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
Materia Organica	Correlación de Pearson	,997(**)	-,993(**)	-,969(**)	-,917(*)	1,000(**)	,974(**)	1	-,992(**)
	Sig. (bilateral)	0	0	0,001	0,01	0	0,001		0
	N	6	6	6	6	6	6	6	6
Tiempo	Correlación de Pearson	-,996(**)	1,000(**)	,989(**)	,953(**)	-,992(**)	-,992(**)	-,992(**)	1
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0,003	0	0	0	
	N	6	6	6	6	6	6	6	6

**ANEXO F**  
**ANOVA COMPOST VS LOMBRICOMPOST**

Tabla 1. ANOVA COMPOST Vs LOMBRICOMPOST MUESTRA FINAL

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Densidad(g/cm3)	Inter-grupos	,116	5	,023	41,685	,000
	Intra-grupos	,020	36	,001		
	Total	,136	41			
Cenizas (%)	Inter-grupos	3744,350	5	748,870	409,432	,000
	Intra-grupos	65,846	36	1,829		
	Total	3810,196	41			
Carbonatos(CO3)	Inter-grupos	241,994	5	48,399	110,809	,000
	Intra-grupos	15,724	36	,437		
	Total	257,718	41			
Fosforo Total(%P2O5)	Inter-grupos	1,994	5	,399	16,596	,000
	Intra-grupos	,865	36	,024		
	Total	2,860	41			
Fosforo Asimilable(%P2O5)	Inter-grupos	,005	5	,001	6,250	,000
	Intra-grupos	,006	36	,000		
	Total	,010	41			
Azufre(%)	Inter-grupos	,223	5	,045	27,211	,000
	Intra-grupos	,059	36	,002		
	Total	,281	41			
CEHT(%)	Inter-grupos	30,015	5	6,003	55,348	,000
	Intra-grupos	3,905	36	,108		
	Total	33,919	41			
CAH(%)	Inter-grupos	44,590	5	8,918	70,625	,000
	Intra-grupos	4,546	36	,126		
	Total	49,135	41			
CAF(%)	Inter-grupos	6,786	5	1,357	11,234	,000
	Intra-grupos	4,349	36	,121		
	Total	11,135	41			
Residuo Insoluble en acido(%)	Inter-grupos	231,831	5	46,366	19,862	,000
	Intra-grupos	84,037	36	2,334		
	Total	315,869	41			
CaO(%)	Inter-grupos	118,145	5	23,629	113,122	,000
	Intra-grupos	7,520	36	,209		
	Total	125,665	41			
MgO(%)	Inter-grupos	28,268	5	5,654	139,265	,000
	Intra-grupos	1,461	36	,041		
	Total	29,729	41			
Na(%)	Inter-grupos	14,670	5	2,934	277,078	,000
	Intra-grupos	,381	36	,011		
	Total	15,051	41			

Continuación Tabla 1.ANOVA COMPOST Vs LOMBRICOMPOST MUESTRA FINAL

K <sub>2</sub> O(%)	Inter-grupos	70,703	5	14,141	34,555	,000
	Intra-grupos	14,732	36	,409		
	Total	85,435	41			
Fe(ppm)	Inter-grupos	214604533,482	5	42920906,696	47,182	,000
	Intra-grupos	32748496,497	36	909680,458		
	Total	247353029,979	41			
Cu(ppm)	Inter-grupos	10350,917	5	2070,183	87,379	,000
	Intra-grupos	852,913	36	23,692		
	Total	11203,830	41			
Mn(ppm)	Inter-grupos	607521,509	5	121504,302	1453,645	,000
	Intra-grupos	3009,094	36	83,586		
	Total	610530,603	41			
Zn(ppm)	Inter-grupos	3674280,830	5	734856,166	308,619	,000
	Intra-grupos	85720,048	36	2381,112		
	Total	3760000,878	41			
Ni(ppm)	Inter-grupos	108218,394	5	21643,679	212,915	,000
	Intra-grupos	3659,548	36	101,654		
	Total	111877,942	41			
Cr(ppm)	Inter-grupos	50190,186	5	10038,037	256,995	,000
	Intra-grupos	1406,134	36	39,059		
	Total	51596,320	41			
N(%)	Inter-grupos	8,738	5	1,748	209,872	,000
	Intra-grupos	,300	36	,008		
	Total	9,037	41			
CO(%)	Inter-grupos	688,528	5	137,706	179,726	,000
	Intra-grupos	27,583	36	,766		
	Total	716,111	41			
MO(%)	Inter-grupos	2046,706	5	409,341	180,007	,000
	Intra-grupos	81,865	36	2,274		
	Total	2128,570	41			
Relacion C/N	Inter-grupos	2931,100	5	586,220	24,973	,000
	Intra-grupos	845,082	36	23,475		
	Total	3776,183	41			
pH	Inter-grupos	2,587	5	,517	37,660	,000
	Intra-grupos	,495	36	,014		
	Total	3,082	41			
CIC(meq/100g)	Inter-grupos	5651,240	5	1130,248	187,861	,000
	Intra-grupos	216,591	36	6,016		
	Total	5867,831	41			
Humedad(%)	Inter-grupos	64,073	5	12,815	30,701	,000
	Intra-grupos	15,026	36	,417		
	Total	79,099	41			

Tabla 2. Prueba Tukey para la Densidad Real (g/cm<sup>3</sup>)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
		1	2
T4	9		,6422
T2	9		,6467
L2	3		,6600
L1	3		,6700
T3	9		,6778
T1	9		,7811
Sig.		,158	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 3. Prueba de Tukey para el %Cenizas  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05			
		2	3	4	1
L1	3	42,6233			
T4	9	44,5706			
L2	3		48,8167		
T3	9			61,8421	
T2	9			63,5560	
T1	9				67,2226
Sig.		,195	1,000	,319	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 4. Prueba Tukey para el %Carbonatos (CO<sub>3</sub><sup>=</sup>)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05			
		2	3	4	1
T4	9	4,4821			
T3	9		7,7504		
L2	3			9,7400	
T2	9			10,1889	
T1	9			10,3604	
L1	3				11,6800
Sig.		1,000	1,000	,640	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 5. Prueba Tukey para el Fosforo Total (%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05			
		2	3	4	1
T4	9	1,0900			
L2	3	1,2460	1,2460		
L1	3	1,3193	1,3193	1,3193	
T3	9		1,4656	1,4656	1,4656
T1	9			1,5833	1,5833
T2	9				1,6867
Sig.		,173	,210	,081	,204

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

- b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 6. Prueba Tukey para el Fosforo Asimilable (%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
		2	3	1
L2	3	,0433		
L1	3	,0467	,0467	
T4	9	,0657	,0657	,0657
T3	9		,0683	,0683
T1	9			,0762
T2	9			,0786
Sig.		,058	,071	,540

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

- b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 7. Prueba Tukey para el Azufre (%)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
		2	1
L1	3	,2367	
L2	3	,2800	
T4	9	,2989	
T3	9		,3989
T1	9		,4211
T2	9		,4578
Sig.		,143	,186

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

- b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 8. Prueba Tukey para CEHT (%)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05			
		2	3	4	1
T1	9	5,5333			
T2	9		6,9156		
T3	9		7,3978	7,3978	
L1	3		7,5167	7,5167	7,5167
T4	9			7,7533	7,7533
L2	3				8,0467
Sig.		1,000	,051	,494	,113

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

- b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados

Tabla 9. Prueba Tukey para CAH (%)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
		2	3	1
T1	9	2,4622		
L2	3		4,2867	
T2	9		4,4900	
T3	9		4,6133	
L1	3		4,8467	4,8467
T4	9			5,4589
Sig.		1,000	,126	,075

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

- b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 10. Prueba de Tukey para CAF (%)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
		2	3	1
T4	9	2,2944		
T2	9	2,4289		
L1	3	2,6700	2,6700	
T3	9	2,7867	2,7867	
T1	9		3,0700	
L2	3			3,7600
Sig.		,210	,424	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

- b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 11. Prueba de Tukey para Residuo Insoluble en ácido (%)

HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
		2	3	1
L2	3	19,7200		
T3	9	20,0289		
T4	9	22,2789	22,2789	
T1	9		23,8744	23,8744
L1	3		24,1433	24,1433
T2	9			26,4100
Sig.		,089	,359	,094

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 12. Prueba de Tukey para CaO (%)

HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
		2	3	1
T4	9	2,0789		
L2	3	2,4033		
L1	3	2,4900		
T3	9		4,6011	
T2	9		4,7956	
T1	9			6,6633
Sig.		,680	,981	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 13. Prueba de Tukey para MgO (%)

HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05			
		1	2	3	4
L2	3		1,0633		
L1	3		1,1700		
T4	9			1,5700	
T1	9				2,8622
T2	9				2,9267
T3	9				
Sig.			,951	1,000	,995

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 14. Prueba de Tukey para Na (%)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
		2	3	1
T1	9	,1356		
T4	9	,1422		
L1	3	,2500		
T3	9	,2644		
L2	3		,7600	
T2	9			1,6300
Sig.		,331	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

- b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 15. Prueba de Tukey para K<sub>2</sub>O (%)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
		2	3	1
L1	3	2,1510		
L2	3	2,7443		
T1	9		4,4622	
T3	9		4,6522	
T4	9			6,0389
T2	9			6,4033
Sig.		,652	,996	,934

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

- b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 16. Prueba de Tukey para Fe (ppm)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
		1	2	3
T4	9		4438,7133	
T3	9			6939,7278
L2	3			7125,7333
L1	3			8118,7367
T2	9			10146,6089
T1	9			10283,1500
Sig.			1,000	,345
				1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

- b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 17. Prueba de Tukey para Cu (ppm)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
		2	3	1
L2	3	36,0831		
L1	3	41,6784		
T2	9		69,2511	
T4	9		70,0933	
T1	9			82,4144
T3	9			89,1500
Sig.		,425	1,000	,231

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados

Tabla 18. Prueba de Tukey para Mn (ppm)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05			
		2	3	4	1
T4	9	38,1111			
T3	9	52,3378			
T2	9		81,3533		
T1	9			116,3800	
L1	3				405,8992
L2	3				407,0494
Sig.		,135	1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 19. Prueba de Tukey para Zn (ppm)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
		2	1
L2	3	75,5576	
L1	3	87,7656	
T1	9		882,3689
T3	9		893,1467
T4	9		953,8078
T2	9		958,4967
Sig.		,998	,133

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 20. Prueba de Tukey para Ni (ppm)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05			
		2	3	4	1
L1	3	27,5533			
L2	3	33,1700			
T4	9		65,3411		
T2	9			131,1744	
T1	9			137,6667	
T3	9				178,2867
Sig.		,940	1,000	,894	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 21. Prueba de Tukey para Cr (ppm)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05			
		2	3	4	1
T4	9	13,5867			
L1	3	23,3600	23,3600		
L2	3		26,1133		
T2	9			73,1078	
T1	9				94,7800
T3	9				95,3367
Sig.		,131	,978	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 22. Prueba de Tukey para N (%)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05				
		2	3	4	5	1
T1	9	,4322				
T2	9		1,2289			
T4	9			1,4678		
T3	9			1,4678		
L1	3				1,7100	
L2	3					1,8900
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 23. Prueba de Tukey para CO (%)

HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05				
		2	3	4	5	1
T1	9	12,5933				
T2	9	13,4567	13,4567			
T3	9		15,0589			
L2	3			19,1233		
L1	3				20,9133	
T4	9					22,9144
Sig.		,591	,050	1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 24. Prueba de Tukey para MO (%)

HSD de Tukey

Tukey			MO (%)			
		Subconjunto para alfa = .05				
tratamiento	N	2	3	4	5	1
T1	9	25,1866				
T2	9	26,9134	26,9134			
T3	9		30,1178			
L2	3			38,2466		
L1	3				41,8266	
T4	9					45,8288
Sig.		0,587	0,051	1	1	1

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 25. Prueba de Tukey para Relación C/N  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05	
		2	1
L2	3	10,1333	
T3	9	10,2811	
T2	9	10,9600	
L1	3	12,2233	
T4	9	15,6144	
T1	9		31,8644
Sig.		,443	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados

Tabla 26. Prueba de Tukey para pH  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
		1	2	3
L1	3		8,2900	
T1	9			8,6200
T3	9			8,6711
L2	3			8,6800
T2	9			8,7844
T4	9			
Sig.			1,000	,218
				9,1889
				1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Tabla 27. Prueba de Tukey para CIC (meq/100g)  
HSD de Tukey

tratamiento	N	Subconjunto para alfa = .05		
		1	2	3
T1	9		11,9556	
T3	9		13,1078	
T4	9		14,9533	
T2	9		15,2244	
L1	3			43,8267
L2	3			
Sig.			,267	1,000
				49,4300
				1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,400.

b Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos.  
Los niveles de error de tipo I no están garantizados.