



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL  
**PIRHUA**

# PROPUESTA DE COMPOSTAJE DE LOS RESIDUOS VEGETALES GENERADOS EN LA UNIVERSIDAD DE PIURA

Marcos Antonio Mendoza Juárez

Piura, octubre del 2012

FACULTAD DE INGENIERÍA

Área Departamental de Ingeniería Industrial y de Sistemas

Mendoza, M. (2012). *Propuesta de compostaje de los residuos vegetales generados en la Universidad de Piura*. Tesis de pregrado en Ingeniería Industrial y de Sistemas. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)  
[Creative Commons Atribución-](#)  
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

# UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA



## **“Propuesta de compostaje de los residuos vegetales generados en la Universidad de Piura”**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Industrial y de Sistemas

Marcos Antonio Mendoza Juárez

**Asesora:** Mgtr. Ing. Ana María Chávez Sernaqué

Piura, Octubre 2012

## **Prólogo**

Dado el patrimonio forestal del campus de la Universidad de Piura, durante la limpieza y mantenimiento de su bosque y jardines se generan cantidades significativas de residuos vegetales compuestos por: hojarasca y ramillas de algarrobo, cortezas, floración y residuos de césped de ciega. Estos residuos pueden generar problemas en su manejo, pues al optarse por la quema de estos en el interior del campus, ha generado problemas ambientales en la zona.

Como alternativa de solución se plantea aprovechar estos residuos vegetales para obtener abono orgánico (compost), siguiendo una metodología que permita aprovechar al máximo la oferta generada por el campus de la universidad y optimizar el proceso de compostaje a un tiempo corto, que permita la transformación de estos materiales, considerando que los residuos de jardín se generan mensualmente.

La importancia del presente trabajo de investigación, es contribuir a reducir los niveles de contaminación que puede producir el inadecuado manejo de estos residuos, bajo el principio de conservación y protección del ambiente. Busca promover el reciclaje de los residuos orgánicos y vegetales utilizando metodologías de procesamiento aplicables tanto a escala doméstica como industrial.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al personal que labora en el Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS), por el apoyo incondicional recibido durante el desarrollo del presente trabajo de investigación, en especial a mi asesora, la Mgtr. Ing. Ana María Chávez, así como a la Dra. Ing. Doris Peña, quien me facilitó la realización de la fase de campo para esta investigación. Además, a la bióloga Yuliana Mendoza, quien llevó a cabo los ensayos microbiológicos, y a los técnicos del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria, los señores Oscar Crisanto y Juan García.

Agradezco de manera especial, la colaboración del personal de mantenimiento del bosque y jardines de la Universidad de Piura, por su apoyo en la actualización del inventario de árboles, la cuantificación de la biomasa de los residuos vegetales, en la construcción de las pilas de compostaje y por su asistencia en el monitoreo y control del proceso. A todos, muchas gracias por brindarme sus valiosos conocimientos y acertadas sugerencias.

## Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal, la elaboración de una propuesta de compostaje de los residuos vegetales generados en el campus de la Universidad de Piura. Se instalaron cuatro pilas de compostaje de estos materiales denominados “tratamientos”; además se evaluó el efecto de la aplicación de microorganismos eficaces sobre la calidad físico-química y microbiológica del compost, junto con el grado de degradación alcanzado en cada uno de los tratamientos.

La metodología de compostaje utilizada, se basó en un proceso aeróbico de dos meses. Se realizaron volteos semanales de forma manual, riegos diarios para mantener la humedad óptima, medición de temperatura tres veces por semana, aplicación semanal de microorganismos eficaces en dosis pre establecidas, y toma de muestras cada dos semanas, para el análisis físico-químico, y cada semana, para el análisis microbiológico.

Bajo las mismas condiciones ambientales, se determinó como más eficiente el *tratamiento* 2, con dosis de 1 L de EM-compost, ya que garantizó la obtención de un compost de buena calidad y generó menor porcentaje de residuos sin degradar durante el proceso.

## Índice

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción.....                                                                            | 1  |
| Capítulo 1: Marco teórico.....                                                               | 3  |
| 1.1. El compost.....                                                                         | 3  |
| 1.1.1. Concepto del compost.....                                                             | 3  |
| 1.1.2. Abono orgánico.....                                                                   | 3  |
| 1.1.3. El compostaje.....                                                                    | 3  |
| 1.1.4. Objetivo del compostaje.....                                                          | 4  |
| 1.1.5. Sistemas de compostaje.....                                                           | 4  |
| 1.1.5.1. Sistemas abiertos o pilas de compostaje.....                                        | 4  |
| 1.1.5.2. Sistemas cerrados o reactores.....                                                  | 5  |
| 1.1.6. Calidad de los materiales para el compostaje.....                                     | 6  |
| 1.1.7. El proceso de compostaje.....                                                         | 6  |
| 1.1.7.1. Aireación en el proceso de compostaje.....                                          | 6  |
| 1.1.7.2. Etapas del proceso de compostaje aerobio.....                                       | 7  |
| 1.1.8. Organismos patógenos en el compost.....                                               | 7  |
| 1.1.9. El compost como producto final.....                                                   | 8  |
| 1.1.10. Índices de calidad de los parámetros del compost.....                                | 8  |
| 1.1.10.1. Parámetros físicos.....                                                            | 9  |
| 1.1.10.2. Parámetros químicos.....                                                           | 11 |
| 1.1.10.3. Parámetros microbiológicos.....                                                    | 13 |
| 1.1.11. Beneficios del uso del compost.....                                                  | 16 |
| 1.2. Microorganismos eficaces (EM) como componente acelerador del proceso de compostaje..... | 16 |
| 1.2.1. Concepto de EM.....                                                                   | 16 |
| 1.2.2. Composición del EM.....                                                               | 17 |
| 1.2.3. Importancia del uso del EM.....                                                       | 18 |
| 1.2.4. Tipos y usos producto EM.....                                                         | 18 |
| 1.2.4.1. Uso en la agricultura y en la producción animal.....                                | 18 |
| 1.2.4.2. Uso en el abono orgánico.....                                                       | 20 |
| 1.2.4.3. Uso en el tratamiento de aguas residuales.....                                      | 20 |
| 1.2.5. Activación de los microorganismos eficaces (EM).....                                  | 21 |

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Capítulo 2: Metodología utilizada en la fase de campo y fase de laboratorio para los<br>tratamientos de las pilas de compostaje..... | 23 |
| 2.1. Descripción de los materiales a utilizar para el trabajo de investigación.....                                                  | 23 |
| 2.1.1. Residuo de poda de jardines.....                                                                                              | 23 |
| 2.1.2. Ramillas de algarrobo.....                                                                                                    | 23 |
| 2.1.3. Hojarasca de algarrobo.....                                                                                                   | 24 |
| 2.1.4. Estiércol de ganado vacuno.....                                                                                               | 24 |
| 2.2. Cuantificación y cualificación de los árboles de algarrobo existentes en el campus de<br>la Universidad de Piura.....           | 24 |
| 2.2.1. Método empleado para la actualización de inventario de árboles.....                                                           | 26 |
| 2.3. Cuantificación de la biomasa de los residuos vegetales generados en la Universidad de<br>Piura.....                             | 27 |
| 2.3.1. Método empleado para la obtención de la biomasa de podas de jardín.....                                                       | 27 |
| 2.3.2. Método empleado para la obtención de la biomasa de hojarasca de algarrobo.....                                                | 28 |
| 2.3.3. Método empleado para la obtención de la biomasa de ramillas de algarrobo.....                                                 | 29 |
| 2.4. Metodología utilizada para la construcción de las pilas de compostaje.....                                                      | 30 |
| 2.4.1. Ubicación de las pilas de compostaje.....                                                                                     | 31 |
| 2.4.2. Recolección de los materiales para el compostaje.....                                                                         | 31 |
| 2.4.3. Preparación del terreno.....                                                                                                  | 32 |
| 2.4.4. Dimensiones de las pilas de compostaje.....                                                                                   | 33 |
| 2.4.5. Composición de las pilas de compostaje.....                                                                                   | 33 |
| 2.4.5.1. Proporciones de los materiales en las pilas de compost.....                                                                 | 33 |
| 2.4.5.2. Dosis aplicadas de EM-compost activado (EMA) a los tratamientos.....                                                        | 35 |
| 2.4.6. Formación de las pilas de compostaje.....                                                                                     | 35 |
| 2.5. Monitoreo y control del proceso de compostaje.....                                                                              | 37 |
| 2.5.1. Frecuencia de volteos y aplicación de EM-compost activado (EMA).....                                                          | 37 |
| 2.5.2. Regulación de humedad.....                                                                                                    | 38 |
| 2.5.3. Medición de la temperatura.....                                                                                               | 39 |
| 2.6. Obtención de muestras para el laboratorio.....                                                                                  | 40 |
| 2.6.1. Frecuencia de toma de muestras.....                                                                                           | 40 |
| 2.7. Tamizado y pesaje del compost en la etapa final del proceso.....                                                                | 41 |
| 2.8. Parámetros evaluados en el proceso de compostaje.....                                                                           | 42 |
| 2.9. Descripción de los métodos empleados para la medición de los parámetros físico-<br>químicos y microbiológicos.....              | 42 |
| 2.9.1. Parámetros físico-químicos y métodos empleados para su medición.....                                                          | 42 |

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.9.2. Parámetros microbiológicos y métodos empleados para su medición.....            | 54  |
| Capítulo 3: Resultados obtenidos en la fase de campo y laboratorio.....                | 59  |
| 3.1. Resultados de los análisis físico-químicos de los materiales a compostar.....     | 59  |
| 3.2. Resultados obtenidos de la actualización del inventario de árboles.....           | 62  |
| 3.3. Resultados obtenidos de la biomasa generada en la Universidad de Piura.....       | 63  |
| 3.4. Resultados obtenidos de la cantidad de compost en los cuatro tratamientos.....    | 70  |
| 3.5. Resultados de los análisis físicos y químicos en las pilas de compostaje.....     | 73  |
| 3.6. Resultados de los análisis microbiológicos en las pilas de compostaje.....        | 79  |
| Capítulo 4: Diseño de una planta procesadora de compost en la Universidad de Piura.... | 83  |
| 4.1. Diseño del proceso.....                                                           | 84  |
| 4.2. Hoja del proceso.....                                                             | 88  |
| 4.3. Requerimiento de maquinaria.....                                                  | 89  |
| 4.4. Oferta de los materiales para el compostaje.....                                  | 93  |
| 4.5. Formación y dimensiones de las pilas de compostaje.....                           | 94  |
| 4.6. Estimación del compost obtenido al final del proceso.....                         | 95  |
| 4.7. Metodología propuesta para obtener compost.....                                   | 99  |
| 4.8. Distribución en planta.....                                                       | 100 |
| 4.8.1. Determinación de los departamentos en la planta de compostaje.....              | 101 |
| 4.8.2. Determinación del espacio requerido para cada departamento.....                 | 103 |
| 4.8.3. Localización de planta.....                                                     | 108 |
| Conclusiones y recomendaciones.....                                                    | 111 |
| Referencias bibliográficas.....                                                        | 115 |

## **Introducción**

En la actualidad, el compostaje puede ser una alternativa ideal para el reciclaje de los residuos orgánicos, ya que estos pueden tener un fuerte impacto sobre el ambiente cuando su manejo no es el adecuado, trayendo como consecuencia la contaminación de la atmósfera, el suelo y las aguas. El compostaje es un proceso natural y biológico, mediante el cual, los microorganismos presentes actúan sobre la materia biodegradable, permitiendo obtener un abono orgánico denominado compost, el cual es un buen nutriente para el suelo, porque puede mejorar su estructura, ayuda a reducir la erosión y mejora la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas.

Para llevar a cabo un proceso de compostaje óptimo, es necesario tener en cuenta: 1) Realizar una buena mezcla de los materiales que se desean compostar, para garantizar un equilibrio en la relación de carbono y nitrógeno contenido en los residuos, además conviene mezclar materiales frescos y secos para mejorar el contacto con los microorganismos presentes en el proceso; 2) Realizar el adecuado control y monitoreo a las pilas de compostaje, mediante la medición frecuente de la temperatura para controlar que se mantenga dentro del rango requerido; realizar el riego diario para mantener la humedad ideal; y 3) Realizar los volteos para adicionarle oxígeno a la pila, garantizando que la actividad microbiana sea eficiente. Controlando estos tres aspectos, se puede disminuir significativamente el tiempo que demanda el proceso de compostaje.

A continuación se presenta una descripción general de los capítulos que forman parte del siguiente trabajo de investigación.

En el primer capítulo, se presenta el marco teórico referente al compost y al compostaje, su definición, el objetivo que implica compostar los residuos con alto contenido de materia orgánica, los beneficios que conlleva su uso, los índices de calidad de este material basados en unos rangos permisibles de parámetros físico-químicos y microbiológicos, que garanticen su uso sin afectar al ambiente y a la salud pública.

En el segundo capítulo, se describen los métodos utilizados en la fase de campo, como la actualización de inventario de árboles, la cuantificación de la biomasa de los residuos vegetales y la metodología utilizada para la construcción de las pilas de compostaje a pequeña escala. Además, presenta la descripción de los métodos empleados para la medición de los parámetros físico-químicos y microbiológicos.

En el tercer capítulo, se muestran los resultados obtenidos después de haber aplicado los métodos descritos en el capítulo anterior, obteniendo la caracterización físico-química de

los materiales a compostar, la cantidad de árboles vivos y muertos existentes en el área de árboles de algarrobo plantados del campus, una estimación de la cantidad de residuos vegetales que genera la Universidad de Piura periódicamente, junto con la cantidad de compost obtenido en los cuatro tratamientos establecidos en la etapa final del proceso, con sus respectivos resultados de los análisis físico-químicos y microbiológicos.

Finalmente, el cuarto capítulo presenta el diseño del proceso propuesto, que garantiza que el compostaje se realice en forma eficiente, con la descripción de la maquinaria que se necesitaría para realizar las operaciones de triturado, tamizado y volteos. Además, se han definido las cantidades de cada material que serán procesados mensualmente, junto con la metodología propuesta para lograr compostar estas cantidades. Asimismo, se presenta la distribución en planta, diseñada a partir de la determinación del área requerida para cada departamento; así como el diagrama de interrelaciones, que detalla las proximidades que deberían tener los departamentos que han sido establecidos. También se presenta la ubicación de la planta dentro del campus, para una futura implementación.

## **Capítulo 1**

### **Marco teórico**

#### **1.3. El compost**

##### **1.3.1. Concepto del compost**

El compost es un abono orgánico que resulta de la degradación de los residuos orgánicos tanto vegetales como animales, transformados por la micro flora y la micro fauna del suelo en una sustancia que mejora la estructura y la estabilidad de la tierra.<sup>1</sup> El compost tiene una particularidad especial respecto a los fertilizantes tradicionales, y es que sólo puede ser obtenido de una manera natural, utilizando los residuos que comúnmente botamos y ayudando a la no contaminación del medio ambiente.

El compost orgánico otorga muchos beneficios, debido a que es un acondicionador de suelos con características húmicas, no contiene microorganismos patógenos, por lo que puede ser manejado y almacenado sin riesgo. Es muy beneficioso para el crecimiento de las plantas, ya que sirve como fuente de materia orgánica para ayudar a la formación de humus en el suelo, y mejorar el crecimiento de los cultivos en la agricultura, dado que contiene valores apreciables de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio.

##### **1.3.2. Abono orgánico**

Son todos aquellos productos que poseen de una manera equilibrada los micronutrientes necesarios para las actividades bioquímicas de las plantas, también poseen grandes cantidades de microorganismos, dado que todos ellos provienen mayormente de insumos totalmente orgánicos procedentes de los campos.<sup>2</sup>

En general, los abonos orgánicos se clasifican en dos tipos:

- Abonos orgánicos sólidos: compost, humus de lombriz, bokashi, abonos verdes.
- Abonos orgánicos líquidos: biol, té de humus, té de compost.

##### **1.3.3. El compostaje**

El compostaje es un proceso de descomposición bioquímica, mediante el cual, diversos sustratos orgánicos se degradan y se estabilizan debido a la acción de una elevada población de microorganismos aerobios como anaerobios, obteniendo un producto estable llamado compost.<sup>3</sup> El proceso de compostaje reduce considerablemente los agentes

patógenos, los cuales pueden ser dañinos para los humanos como para los animales y vegetales.

#### **1.3.4. Objetivo del compostaje**

El objetivo principal del compostaje es convertir los residuos orgánicos putrescibles a materiales estables y libres de organismos patógenos que puedan afectar a los seres humanos, siendo capaz de eliminar insectos, huevos de larvas y enfermedades que puedan tener las plantas.

El compostaje también contribuye a los procesos de secado de materiales orgánicos de naturaleza húmeda, como son los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, domésticas o industriales, mejorando su manejo y disposición final.<sup>4</sup>

#### **1.3.5. Sistemas de compostaje**

Se han diseñado distintas formas de realizar el compostaje, algunas de ellas difieren significativamente unas de otras. Los distintos sistemas de compostaje pretenden conseguir una aireación óptima y llegar a las temperaturas termófilas. Se debe de tratar de eliminar los microorganismos patógenos durante el proceso, ya que muchos de los residuos a compostar pueden contenerlos, por lo que se considera un sistema efectivo aquel que logre transformar gran parte de la materia orgánica contenida en los residuos.<sup>5</sup>

Se pueden distinguir dos tipos de sistemas: abiertos y cerrados.

##### **1.3.5.1. Sistemas abiertos o pilas de compostaje**

Se basan en la formación de pilas, agrupando los residuos en montones. Si los montones ocupan superficies aproximadamente cuadradas, se denominan mesetas. Los materiales a compostar se deben de apilar sin que se compriman mucho, para permitir que el aire quede retenido, los montones o pilas deben ser aireados por volteo o ventilarlos por aireación a través de un sistema de distribución de aire.

Dentro de los sistemas abiertos se distinguen:

- **Pilas estáticas (sin volteos)**

En este sistema de compostaje no se realizan volteos en las pilas. El aire necesario para el proceso se suministra por medio de la introducción de aire a presión (aireación forzada o método de Beltsville) o mediante aspiración de aire (aireación inducida o método de Rutgers).

- **Pilas dinámicas (con volteos)**

En este sistema la mezcla de materiales se coloca en montones o pilas, en grandes filas paralelas, ya que es la altura y el ancho los que definen la formación de éstas.

Si el montón es muy alto, el material puede comprimirse por su propio peso y este fenómeno puede dar lugar a que el proceso esté en condiciones anaerobias, sin embargo, pilas muy bajas pueden provocar una pérdida de calor demasiado rápida y hacer que no se

pueda llegar a las temperaturas termófilas o pueden provocar una excesiva pérdida de humedad.

La frecuencia de los volteos depende del tipo de material, de la humedad y la rapidez con que interesa llevar a cabo el compostaje. Si el intervalo de tiempo entre volteos es grande, la escasez de oxígeno puede hacer que se necesite más tiempo para llegar al final del proceso, pero si el intervalo de tiempo es pequeño, afectaría el desarrollo de algunos de los microorganismos que intervienen en el proceso.

Es recomendable que los volteos se realicen con alta frecuencia (una vez por semana), sobre todo al principio, ello intensifica la actividad de los microorganismos en el periodo de descomposición más activa y reduce el tiempo de compostaje.

#### **1.3.5.2. Sistemas cerrados o reactores**

Se basa en la utilización de un reactor o digestor. Son sistemas que tienen unos costos de instalación superiores al de las pilas, pero tienen la ventaja de poder controlar las condiciones necesarias permitiendo la aceleración del proceso, además se necesita de menos espacio para trabajar con el mismo volumen los residuos a compostar. El compost producido en el interior del reactor no alcanza un correcto estado de estabilidad, por lo que se le somete a un proceso de compostaje en pilas en la etapa de maduración (etapa final) de este proceso.

Dentro de los sistemas cerrados se distinguen:

- **Los contenedores o reactores verticales**

Miden entre 4 m y 9 m de alto, en este sistema el proceso es difícil de controlar, dado que resulta complicado mantener uniforme la proporción de oxígeno para la masa de material a degradar, la parte baja de la masa es por donde se inyecta el aire, ocasionando que se enfríe demasiado esa zona, la parte superior queda con frecuencia insuficientemente aireada.

- **Los tambores o reactores horizontales**

Son cilindros de acero para el compostaje y la rotación es intermitente, su principal función es la diferenciación de componentes de los residuos por medios biológicos y físico-químicos. El tiempo de retención en el reactor oscila entre 1 día y 2 días, lo que no es suficiente para un verdadero compostaje, permitiendo solo una iniciación del proceso.

La principal ventaja de este sistema es que se logra separar la materia orgánica de los materiales inertes.

- **Túneles de compostaje**

Este sistema mantiene el material aislado del exterior, dando lugar a que no intervenga la temperatura del ambiente, no tiene emisiones líquidas o gaseosas, permitiendo la homogeneidad en las condiciones de la masa.

Los túneles suelen tener una longitud entre 30 m y 59 m y un ancho y altura de 4 m a 6 m aproximadamente, este sistema es adaptable a variaciones de carga, se puede ampliar sin

problemas, dado que se trata de un sistema modular y la maduración resulta fácil ya que se puede culminar esta etapa del proceso formando pilas de compostaje.

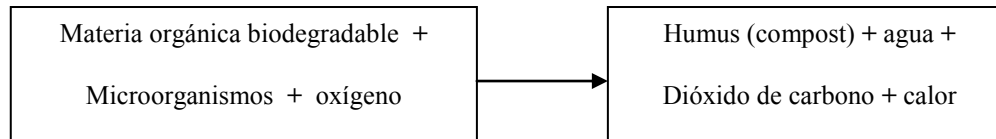
### 1.3.6. Calidad de los materiales para el compostaje

El material seleccionado para ser utilizado en el proceso de compostaje es un factor importante respecto a la calidad del producto final a obtenerse, siendo necesario analizar los materiales que se van a compostar para poder establecer las características tales como: pH, tamaño de partículas, contenido de nitrógeno total, contenido de humedad y contenido de sales.<sup>6</sup> Se debe de buscar obtener mezclas óptimas con materiales de diferente origen, de tal forma que contengan características complementarias para conseguir un equilibrio en el contenido de nutrientes, y que tengan propiedades físicas y químicas que favorezcan el proceso, permitiendo conseguir una mejor calidad del compost.

En general, se debe de aprovechar todo material declarado como materia orgánica fresca, ser sometidos a procesos de transformación que aseguren su estabilización agronómica tales como el compostaje o la fermentación, esto lo estipula el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).<sup>7</sup>

### 1.3.7. El proceso de compostaje

El compostaje es considerado también como un proceso microbiológico aerobio que combina fases mesófilas (15 °C a 45 °C) y termófilas (45 °C a 75 °C) para poder conseguir la transformación de los residuos orgánicos a un producto estable, tal como se indica en el esquema de la **figura 1.1**.



**Figura 1.1.** Esquema que representa la transformación de los residuos orgánicos.

Cuando la materia orgánica se oxida por la acción de los microorganismos, una porción de la energía es capturada y se usa para la síntesis de la nueva materia celular, al morir los microorganismos, este material es el alimento para otros microorganismos presentes, generando dióxido de carbono, agua y nueva materia celular. Todo este proceso se va repitiendo hasta que la porción de la materia orgánica que queda es muy resistente al ataque microbiano, a medida que el proceso de compostaje avanza, los compuestos orgánicos que se degradan más fácilmente van oxigenándose y van siendo reemplazados por materiales húmicos cada vez menos biodegradables, pero a una velocidad más pequeña comparada con la velocidad de degradación inicial.

El producto final no es una materia orgánica totalmente estabilizada, sino un material análogo al humus del suelo, con la capacidad de seguir evolucionando y así suministrar nutrientes al sistema suelo-planta.

#### 1.3.7.1. Aireación en el proceso de compostaje

El aire suministrado es necesario al momento de llevar a cabo el proceso de compostaje. Al realizar los volteos a las pilas de compost, se proporciona el oxígeno necesario para la degradación del material presente en el proceso, permitiendo la respiración de los

microorganismos aerobios y para oxidar determinadas moléculas orgánicas de la masa de la fermentación. Si sucede el caso en que la demanda de oxígeno es deficiente, traería como consecuencia la sustitución de organismos aerobios por anaerobios, lo que retardaría el proceso entre 4 meses y 6 meses, y en muchos casos presentarían problemas con la generación de malos olores e insectos.<sup>8</sup>

### **1.3.7.2. Etapas del proceso del compostaje aerobio<sup>9</sup>**

Las etapas presentes en todo proceso de compostaje aerobio son:

- **Etapas mesofílica**

En esta etapa existe la presencia de bacterias y hongos mesofílicos. Dado a su actividad metabólica que realizan, hay un aumento de la temperatura de hasta 45 °C, el pH disminuye debido a la descomposición de lípidos y proteínas en aminoácidos, favoreciendo la aparición de hongos mesofílicos más tolerantes a las variaciones de pH. En esta etapa se debe de mantener la humedad entre 40% y 60%, dado que el agua distribuye los nutrientes por toda la masa.

- **Etapas termofílica**

En esta etapa la temperatura sigue ascendiendo hasta llegar a valores de 75 °C, trayendo como consecuencia la muerte de las poblaciones de bacterias y hongos mesofílicos, apareciendo las bacterias, hongos y actinomicetos termofílicos, su actividad microbiana genera calor haciendo que la temperatura aumente, por lo que el pH incrementa hasta estabilizarse, permaneciendo constante hasta el final de proceso. El compost se va tornando un color oscuro.

- **Etapas de enfriamiento**

Una vez que los nutrientes y la energía comienzan a disminuir, la actividad de los microorganismos termofílicos disminuye, por lo que la temperatura también lo hace hasta llegar a la temperatura ambiente, provocando la muerte de estos y reapareciendo los microorganismos mesofílicos al llegar a temperaturas entre 40 °C y 45 °C, siguiendo con el proceso hasta que toda la energía sea utilizada.

- **Etapas de maduración**

En esta etapa la temperatura y el pH se estabilizan, si es el caso que el pH sea ácido, el compost nos indica que todavía no está maduro. El color del producto final debe ser negro o marrón oscuro y su olor a tierra de bosque, no visualizando algunas partículas de los residuos iniciales.

### **1.3.8. Organismos patógenos en el compost**

En el compost se pueden encontrar muchas variedades de microorganismos patógenos que pueden ser eliminados cuando la temperatura en las pilas de compostaje se encuentra entre 55 °C y 70 °C, en intervalos de tiempo que pueden ir de tres a 60 minutos. La destrucción de patógenos durante la etapa termofílica hace que se obtenga un abono orgánico que no sea contaminante. Entre los microorganismos patógenos que pueden abundar más en el proceso de compostaje y que representan un riesgo para los animales, plantas y para el hombre mismo se encuentran la *Salmonella spp* y el *Escherichia coli*.

A continuación se muestra en la **tabla 1.1** los microorganismos patógenos que pueden estar presentes en el compost, junto con sus temperaturas y tiempos para su destrucción.

**Tabla 1.1.** Microorganismos patógenos asociados al compost.<sup>10</sup>

| Microorganismos                    | Temperatura (°C) | Tiempo de exposición (min) |
|------------------------------------|------------------|----------------------------|
| <i>Salmonella typhosa</i>          | 56               | 60                         |
| <i>Salmonella spp</i>              | 55               | 60                         |
| <i>Escherichia coli</i>            | 55               | 60                         |
| <i>Micrococcus aureus</i>          | 50               | 10                         |
| <i>Streptococcus pyogenes</i>      | 54               | 10                         |
| <i>Corynebacterium diphtheriae</i> | 55               | 45                         |
| <i>Mycobacterium tuberculosis</i>  | 66               | 20                         |
| <i>Shigella spp</i>                | 55               | 60                         |
| <i>Brucella abortus</i>            | 61               | 3                          |
| <i>Taenia saginata</i>             | 71               | 5                          |
| <i>Trichinella spiralis</i>        | 50               | 60                         |
| <i>Necator americanus</i>          | 45               | 50                         |

### 1.3.9. El compost como producto final

El compost no es considerado un fertilizante, pero puede ser comparado como un suelo de alta calidad, dado que cuenta con un contenido de nitrógeno, fósforo y potasio suficientes para la mejora de tierras pobres, por lo que aporta materia orgánica, retiene el agua y libera gradualmente los nutrientes, trayendo grandes beneficios a largo plazo con la mejora de los cultivos.

Cuando se agrega el compost al suelo, éste lo renueva y aumenta su vida, al promover la proliferación de microorganismos que participan en los procesos de humificación, incrementando la retención de agua, ayudando a optimizar los sistemas de riego y evitando que pueda haber sequías.

El compost también favorece a la porosidad del suelo, ya que permite el mejoramiento de la aireación, mejorando la capacidad de intercambio iónico y reduciendo la contaminación.

### 1.3.10. Índices de calidad del compost

El compost como producto final debe estar basado en unos rangos permisibles de parámetros físicos, químicos y microbiológicos, que puedan asegurar el uso y la comercialización de éste, por lo que deben de cumplir con estándares de calidad que puedan proteger el ambiente y la salud pública.

Puede darse el caso que algunos sustratos orgánicos que han sido sometidos a un proceso de compostaje contengan metales pesados, ocasionando una variación significativa en la calidad final del producto, ya que estos elementos pueden penetrar en la cadena alimenticia a través de las plantas, aumentando el grado de toxicidad en humanos y animales.

Hay que resaltar que la calidad del compost está determinada por los materiales iniciales que han sido acopiados para ser procesados en las pilas, sobre todo por el contenido de la materia orgánica y los nutrientes que estos puedan aportar.

Se han usado tradicionalmente parámetros físico-químicos y microbiológicos como índices o requerimientos de calidad del compost, este último es de vital importancia, dado que es utilizado como medida de garantía higiénica y sanitaria para el uso del compost.<sup>11</sup>

El contenido de nutrientes en el compost puede ser muy variado, porque depende de los nutrientes iniciales de los materiales que se han utilizado. En la **tabla 1.2** se muestra los rangos permisibles de los parámetros físicos y químicos más significativos del compost, estos rangos suelen ser muy amplios, debido a las características físico-químicas de los materiales iniciales a compostar.

**Tabla 1.2.** Especificaciones referenciales de la calidad del compost.<sup>12</sup>

| <b>Parámetro</b>                               | <b>Rango permisible</b> |
|------------------------------------------------|-------------------------|
| Humedad (%)                                    | 40 – 60                 |
| Tamaño de partículas (mm)                      | 5 - 10                  |
| Materia orgánica (%)                           | 25 – 50                 |
| Carbono orgánico (%)                           | 8 – 50                  |
| Nitrógeno total (%)                            | 0,4 - 3,5               |
| Fósforo como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | 0,3 - 3,5               |
| Potasio como K <sub>2</sub> O (%)              | 0,5 - 1,8               |
| Cenizas (%)                                    | 20 – 65                 |
| Calcio como CaO (%)                            | 20 - 65                 |
| Relación C:N                                   | 25:1 - 30:1             |
| pH                                             | 6,5 - 8                 |

### **1.3.10.1. Parámetros físicos**

#### **1.3.10.1.1. Humedad**

El contenido de agua en los materiales que formarán parte del compost, la actividad microbiana, el nivel de oxígeno y la temperatura, son factores directamente relacionados con la humedad de la pila de compostaje. Las actividades microbianas relacionadas con el crecimiento y división celular requieren de unas condiciones de humedad óptimas.

La presencia de agua dentro de las pilas de compostaje es imprescindible para el transporte de sustancias y nutrientes, de modo que los hace más accesibles para los microorganismos.

El equilibrio ideal de la humedad generalmente se encuentra en el rango de 50% y 60%, dependiendo de los materiales y el método de compostaje, los contenidos de humedad de 40% a 70% son tolerables; niveles de humedad superiores a 70% harían que los espacios entre las partículas del material se saturen de agua, impidiendo el movimiento del aire

dentro de la pila, en consecuencia, el proceso pasaría a ser anaeróbico, eso significa que los microorganismos no tendrían oxígeno, morirían y los microbios que aparecerán por la ausencia de oxígeno tomarían el control. El material del interior de la pila se descompondrá de todas formas, pero habrá problemas, dado que las condiciones anaeróbicas crearán gases muy olorosos. Estos gases son perjudiciales y contribuyen a aumentar el problema del efecto invernadero.

En caso contrario, humedades por debajo de 40% se genera poco calor en la pila, disminuyendo la actividad microbiana y haciendo el proceso de compostaje muy lento hasta que finalmente se detenga, ya que los microbios se habrán deshidratado. Si se deja que el compost se seque demasiado, puede ser difícil volver a humedecerlo, ya que la superficie de los materiales residuales se hará hidrofóbica (repelente al agua). En un ambiente seco, los microbios producirán esporas que serán expulsadas al aire y pueden causar problemas de salud, incluyendo asma y otros tipos de alergias. Se debe evitar que el compost o cualquier material relacionado con la tierra se sequen demasiado.

#### 1.1.10.1.2. Temperatura

Este parámetro es un factor determinante en el proceso de compostaje, dado que es un indicador de la actividad microbiológica de los microorganismos, ya que estos actúan mejor dentro de rangos de temperatura específicos.

La temperatura de los materiales que han sido usados para compostar, sufren alteraciones durante las diferentes etapas del proceso, ya que estos están continuamente interactuando con los diferentes grupos de microorganismos. Al inicio del proceso, los materiales se encuentran a temperatura ambiente, de dos a seis días se pueden llegar a temperaturas de 45 °C, debido al metabolismo de los microorganismos exotérmicos y a la biodegradación de los sustratos, por lo que existe una liberación de calor generando el aumento de la temperatura, descomponiendo algunos compuestos como azúcares, almidones y grasas.

Cuando la temperatura alcanza los 60 °C a 70 °C, se puede garantizar la eliminación de semillas de malezas y muchos agentes patógenos que pueden estar presentes, posteriormente la temperatura desciende gradualmente hasta nivelarse con la temperatura ambiente.

A continuación se muestra en la **tabla 1.3** la relación que existe entre las etapas del proceso de compost y la temperatura.

**Tabla 1.3.** Relación de las etapas del proceso de compostaje y la temperatura.<sup>13</sup>

| <b>Etapas</b>             | <b>Temperatura (°C)</b> |
|---------------------------|-------------------------|
| Etapa mesofílica          | 20 a 45                 |
| Primera etapa termofílica | 45 a 65                 |
| Segunda etapa termofílica | 65 a 75                 |
| Etapa de enfriamiento     | 75 a 45                 |
| Etapa de maduración       | 45 a 25                 |

#### **1.1.10.1.3. Tamaño de partículas**

Es importante reducir el tamaño de los residuos vegetales para garantizar una adecuada aireación y una buena superficie de acción de los microorganismos, y al mismo tiempo acelerar las reacciones bioquímicas de estos.

Si las partículas son demasiado grandes presentan poca superficie de contacto para ser atacadas por los microorganismos, ocasionando que el tiempo de descomposición se alargue y que los materiales se transformen parcialmente, además pueden presentarse pérdidas de humedad y menor transferencia de oxígeno. En caso contrario, se sabe que un exceso de partículas muy pequeñas produce una cementación del material, lo cual produce fácilmente la putrefacción de los materiales utilizados.

Se debe tener en cuenta, que cuando el compost esté listo para usar, el tamaño de partículas que puedan quedar deben ser muy pequeñas, oscilando entre 0,5 cm y 1 cm, dado que esto permite un mejor nivel de aireación al momento de aplicarlo al suelo.

#### **1.1.10.1.4 Color y olor**

El color del compost varía de marrón claro hasta un color marrón oscuro, dependiendo del grado de maduración y su olor en la última etapa debe ser de tierra de bosque húmedo.

#### **1.1.10.2. Parámetros químicos**

##### **1.1.10.2.1. pH**

El pH es un valor que nos indica si un producto o material es ácido (pH inferior a 7), es alcalino (pH superior a 7) o neutro (pH igual a 7). Conviene que el compost sea lo más neutro posible, porque los microorganismos responsables de la descomposición de la materia orgánica no toleran valores muy alejados del 7. Si esto se produjese, el proceso de compostaje se detendría o se ralentizaría notablemente.

El pH varía con el tiempo durante el proceso de compostaje, debido a su acción sobre los microorganismos, por lo que es un parámetro de suma importancia para evaluar el ambiente microbiano y la estabilización de los residuos. En general, los hongos toleran un margen de pH ligeramente ácido (entre 5 y 8), debido a que los productos iniciales de la descomposición son ácidos orgánicos. Al cabo de unos días, el pH se vuelve ligeramente alcalino debido a la liberación de amoníaco durante la transformación de las proteínas por parte de las bacterias, las cuales prefieren un medio casi neutro (entre 6 y 7,5). El pH recomendado para un sistema de compostaje debe estar en un rango de 6,5 y 8.

##### **1.1.10.2.2. Nitrógeno total**

El contenido total de nitrógeno del compost puede variar según la materia prima, las condiciones del proceso, la maduración y el almacenaje. En el transcurso del proceso de compostaje el contenido de nitrógeno disminuye con la volatilización del amoníaco, pero éste es captado, transformado e incorporado a los microorganismos, es por eso que se presentan pérdidas importantes de este elemento, debido a la intensidad y la rapidez de los fenómenos bioquímicos en los primeros días de la fermentación. Una buena fermentación aerobia no debe perder más del 20% de la cantidad inicial del nitrógeno.

Los microorganismos utilizan el nitrógeno para la síntesis de proteínas junto con otros elementos, un exceso de este nutriente puede traer como consecuencia un crecimiento bacteriano y podría acelerar la descomposición de la materia orgánica, pero esto provocaría un déficit en oxígeno, por lo que el proceso se volvería anaeróbico, sin embargo, la falta de nitrógeno en el proceso generaría un deficiente crecimiento del cultivo microbiano, por lo que la velocidad de descomposición disminuiría considerablemente.<sup>14</sup>

#### **1.1.10.2.3. Materia orgánica**

La eficiencia en la degradación de la materia orgánica en el proceso de compostaje depende directamente de cómo se encuentran las comunidades microbianas al inicio del proceso. A través de diferentes tipos de enzimas hidrolíticas, los microorganismos desempeñan la degradación de los materiales orgánicos. Diversas de estas enzimas son las que controlan finalmente gran parte de la velocidad a la que los sustratos orgánicos son degradados. Las enzimas más importantes que intervienen en el proceso de compostaje son: las celulasas, despolimerasa celulasa, B-glucosidasa que hidroliza glucósidos, ureasa que participan en la mineralización del nitrógeno, fosfatasas y arylsulfatasa que eliminan los grupos de fosfato y de los sulfatos de los compuestos orgánicos.<sup>15</sup>

#### **1.1.10.2.4. Carbono orgánico**

La degradación de la materia orgánica es llevada a cabo, debido a que los microorganismos que se encuentran presentes en el proceso utilizan el carbono orgánico como fuente de energía. El proceso puede exigir más carbono que nitrógeno, pero hay que tener en cuenta que cuando existe un exceso de este elemento, el tiempo de degradación puede aumentar a partir del momento en que las reservas de nitrógeno son consumidas y ciertos organismos mueren. El nitrógeno que estos organismos han asimilado es utilizado por otros microorganismos, y nuevas cantidades de carbono son consumidas en la constitución de la sustancia celular, por lo que la cantidad de carbono alcanza su nivel más satisfactorio y el nitrógeno es reintroducido en el ciclo. De aquí la relación que existe entre el carbono y el nitrógeno.<sup>16</sup>

#### **1.1.10.2.5. Relación carbono / nitrógeno**

La relación de carbono – nitrógeno expresa las unidades de carbono por unidad de nitrógeno que contiene el material y sirve como un indicador del grado de avance del proceso. El carbono es una fuente de energía para los microorganismos, dado que activan sus procesos metabólicos, y el nitrógeno es un elemento necesario para la síntesis proteica.

Una relación adecuada entre estos dos nutrientes favorecerá un buen crecimiento y reproducción de estos microorganismos.

Se considera una relación C:N de 20 a 30 para el inicio del proceso, sin embargo, consideran una relación óptima de entrada, es decir, de material “crudo o fresco” a compostar de 25 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno. Por encima de este valor se retrasa innecesariamente el proceso. Si la relación no alcanza un balance óptimo, el sistema microbiano va a sufrir un desarrollo diferente del requerido para obtener la comunidad biológica óptima.

Los materiales con alto contenido de carbono deben mezclarse con materiales con alto contenido de nitrógeno. A continuación se muestra en la **tabla 1.4** algunos de los materiales más usados para obtener abono orgánico.

**Tabla 1.4.** Contenido de relación C/N de algunos materiales orgánicos.<sup>17</sup>

| <b>Materiales</b>    | <b>C (%)</b> | <b>N (%)</b> | <b>C / N</b> |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|
| Aserines             | 40           | 0,1          | 400          |
| Paja de caña         | 40           | 0,5          | 80           |
| Estiércol de equino  | 15           | 0,5          | 30           |
| Césped de jardín     | 45           | 1,5          | 30           |
| Estiércol de ovino   | 16           | 0,8          | 20           |
| Heno                 | 40           | 2            | 20           |
| Hojas secas          | 20           | 1            | 20           |
| Estiércol de vacuno  | 28           | 2            | 14           |
| Estiércol de cerdo   | 8            | 0,7          | 12           |
| Estiércol de gallina | 15           | 1,5          | 10           |
| Harina de sangre     | 35           | 15           | 2            |

#### **1.1.10.2.6. Fósforo total**

El fósforo es muy importante en la maduración tanto de las flores, las semillas y los frutos de las plantas, dado que intervienen en la formación y el desarrollo de las raíces, es por eso que es muy importante este elemento en el compost por la cantidad que le pueda aportar a la planta al momento de aplicarlo. Su proporción en el compost puede ser entre 0,3% y 3,5% en forma de óxido fosfórico ( $P_2O_5$ ), y varía en función del tipo de materiales que han sido utilizados en el proceso de compostaje.

#### **1.1.10.2.7. Potasio total**

El potasio es muy importante en el desarrollo de las plantas, porque hace que las raíces y los tallos crezcan fuertes y que las semillas, los frutos y las hojas de las plantas sean grandes, proporcionando resistencia ante las plagas que puedan atacar, además colabora con la circulación de los otros nutrientes alrededor de la planta, por eso es muy importante que este elemento esté presente en el compost. Se puede encontrar en el compost en una proporción entre 0,5% y 1,8% mayormente en forma de óxido de potasio ( $K_2O$ ).

#### **1.1.10.3. Parámetros microbiológicos**

El compostaje es un proceso en el que intervienen microorganismos que atacan a los residuos orgánicos. El 95% de estos microorganismos lo conforman las bacterias y los

hongos, que son los responsables de la actividad microbiológica para descomponer los materiales, seguidos de los actinomicetos y los protozoos.

Durante el proceso pueden ocurrir cambios significativos tanto cualitativa como cuantitativamente en la microflora activa. Algunas especies de microorganismos se pueden multiplicar rápidamente y luego empiezan a desaparecer por la muerte de estos, para dar paso al crecimiento de otras poblaciones de microorganismos, esto es debido a algunos factores tanto físico como químicamente, tales como: el contenido de la humedad, la disponibilidad de oxígeno, la variación del pH y la temperatura.

Se afirma entonces, que los microorganismos que participan en el proceso de compostaje son organismos heterótrofos, es decir, obtienen carbono y nitrógeno de la materia orgánica presente en los materiales que han sido utilizados al inicio del proceso.

A continuación se muestra en la **tabla 1.5** los valores de los índices de calidad microbiológica del compost, estos rangos nos proporcionan un aproximado de entre qué valores pueden estar presentes las poblaciones de microorganismos en el compost para su aplicación tanto en suelos como en plantas.

**Tabla 1.5.** Índices de calidad microbiológica del compost.<sup>18</sup>

| <b>Grupos funcionales</b>        | <b>UFC / g de compost</b>       |
|----------------------------------|---------------------------------|
| Bacterias totales                | $5 \times 10^{10}$              |
| Hongos totales                   | $1 \times 10^3 - 1 \times 10^7$ |
| Actinomicetos totales            | $1 \times 10^4 - 1 \times 10^8$ |
| Bacterias fijadoras de nitrógeno | $1 \times 10^5$                 |
| <i>Pseudomonas</i>               | $1 \times 10^3 - 1 \times 10^4$ |
| <i>Salmonella spp</i>            | Ausente en 25 g de compost      |

En la **tabla 1.6** se presenta la normativa existente para definir la calidad de abonos orgánicos según el Instituto colombiano de normas técnicas y certificación (ICONTEC), la norma chilena de calidad del compost (NCh.2880.2003)<sup>19</sup> y la norma 503 de la EPA (Agencia de protección ambiental)<sup>20</sup>, quienes recomiendan los valores permisibles de los microorganismos patógenos que pueden existir en el compost.

Se ha recurrido a normas de otros países, como referencia, debido a que no existen normas peruanas que definan la calidad microbiológica del compost.

**Tabla 1.6.** Valores permisibles de los microorganismos patógenos en el compost.

| Parámetro                       | EPA (Norma 503)                          | ICONTEC                    | Norma chilena (NCh.2880.2003)            |
|---------------------------------|------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|
| Microorganismos termotolerantes | $< 1 \times 10^5$ NMP / 100 g de compost | Ausencia                   | $< 1 \times 10^5$ NMP / 100 g de compost |
| Estreptococos fecales           | -                                        | -                          | Ausencia                                 |
| <i>Salmonella spp</i>           | $< 3$ UFC / 4 g de Compost               | $< 3$ UFC / 4 g de compost | Ausencia                                 |
| Huevos de helminto viables      | -                                        | -                          | Ausencia                                 |

#### 1.1.10.3.1. Población total de bacterias

Las bacterias que están presentes en el proceso de compostaje tienen mucha mayor predominancia en la actividad microbiológica que los hongos, por lo que la población total de las bacterias depende directamente del tipo de material que se ha empleado inicialmente, y de las condiciones ambientales del lugar del compostaje. Estas bacterias presentes generalmente suelen ser aerobias y se pueden clasificar de acuerdo a la temperatura en que se desarrollan, por ejemplo, para temperaturas entre 20 °C y 40 °C son mesofilicas, y para temperaturas entre 40 °C y 75 °C son termofilicas.

En conclusión, la población total de las bacterias se encarga de la descomposición de las proteínas, lípidos y las grasas a temperaturas termofilicas, además de toda la energía calorífica que hace que la temperatura se incremente en el material para el compostaje.

#### 1.1.10.3.2. Población total de hongos

Los hongos tienen mucha importancia en la degradación de la materia orgánica, sobre todo de la celulosa, que es una de las partes más resistentes de la materia orgánica, representando el 60% de su masa total. Los hongos se destruyen mayormente cuando la temperatura está a 55 °C, por lo que algunos pueden permanecer en estado de latencia, reactivándose en la etapa de enfriamiento del compost.

#### 1.1.10.3.3. Microorganismos termotolerantes

Este parámetro es de mucha importancia para evaluar un compost de calidad, por lo que es primordial realizar un análisis antes de usarlo para determinar si existe presencia de estos microorganismos, que como se mencionó anteriormente, pueden causar daños directamente a las plantas, dado que el compost se aplica al suelo, y esto también repercutiría en los animales y seres humanos que son los que finalmente terminan consumiendo los frutos de estas plantas que han sido cultivadas en los suelos donde se les ha aplicado el compost.

Al analizar los microorganismos patógenos, su ausencia nos puede garantizar el uso del compost y también por medio de estos resultados darnos cuenta de la eficiencia del proceso de compostaje, porque en el transcurso de este proceso es donde se eliminan estos

microorganismos cuando las pilas de compostaje se encuentran a altas temperaturas (entre 60 °C y 70 °C) y en periodos de uno a dos días.

Cabe recalcar que los microorganismos termotolerantes o llamados también coliformes fecales, no son los únicos microorganismos patógenos que pueden encontrarse en el compost, esto siempre depende de los materiales iniciales que van a formar parte de la pila de compostaje para su proceso de degradación o descomposición.

En la mayoría de los países europeos, los microorganismos indicadores que se han podido seleccionar a parte de los coliformes totales y fecales, se pueden encontrar en el compost más frecuentemente el *Escherichia coli* o *E. coli*, *Enterococcus*, *Clostridium*, *salmonella spp* y los *enterobacterias*.

#### **1.1.11. Beneficios del uso del compost**

El compost orgánico puede darnos muchos beneficios, dado que sirve como un acondicionador de suelos con características húmicas, con ausencia de microorganismos patógenos y malezas que pueden atacar a las plantas, además las ayuda en su crecimiento y las hace resistentes a las enfermedades que las puedan atacar.

Las plantas pueden crecer en casi todo tipo de suelo, y como la fertilidad del suelo tiene una relación directa con la cantidad de materia orgánica que ésta pueda contener, es indispensable suministrarle cantidad de materia orgánica al suelo, debido a que con el tiempo, éste pierde grandes cantidades de materia orgánica y nutrientes que le sirven a la planta para aumentar su productividad. Un suelo pobre en materia orgánica y macro nutrientes tales como: nitrógeno, fósforo y potasio pueden hacer que se obtenga un bajo rendimiento en las cosechas.

Para obtener un alto rendimiento en las cosechas se puede aplicar al suelo una combinación de fertilizantes químicos y sobre todo orgánicos, para aumentar la productividad de las plantas, dado que los primeros aportan más cantidad de nutrientes de los que puede aportar el compost, que también lo hace pero en menor proporción, y aplicar abono orgánico para aportar gran cantidad de materia orgánica. Hay que tener en cuenta que si solamente se le adiciona al suelo fertilizantes químicos y no orgánicos, esto con el tiempo traería como consecuencia un empobrecimiento de la tierra de cultivo, y las raíces de las plantas no tendrían los nutrientes suficientes para absorber, creciendo débiles, por lo que sufrirían de ataques de plagas.

### **1.2. Aplicación de microorganismos eficaces (EM) como componente acelerador en el proceso de compostaje**

#### **1.2.1. Concepto de EM<sup>21</sup>**

Es un producto que está compuesto por 80 tipos de microorganismos benéficos de origen natural, teniendo tres géneros principales que son: bacterias fotosintéticas, bacterias de ácido láctico y levaduras.

Estos microorganismos al entrar en contacto con la materia orgánica, secretan sustancias beneficiosas tales como: vitaminas, ácidos orgánicos, minerales quelados y antioxidantes, cambiando la micro y macro flora de la tierra, y además, mejorando el equilibrio natural de la tierra.

### 1.2.2. Composición del EM

El EM está compuesto por tres géneros de microorganismos que son:

- **Bacterias fotosintéticas (*Rhodopseudomonas spp*):** Estas bacterias llamadas también fototróficas, son un grupo de microorganismos independientes y autosuficientes, que son capaces de sintetizar sustancias útiles a partir de las secreciones de las raíces, materia orgánica y gases nocivos, usando la luz solar y el calor del suelo como fuente de energía. Ver **figura 1.2**.



**Figura 1.2.** Bacterias fotosintéticas.

- **Bacterias ácido lácticas (*Lactobacillus spp*):** Estas bacterias tienen la habilidad de suprimir los microorganismos causantes de enfermedades como *Fusarium*, que pueden aparecer en sistemas de producción continua. Esta enfermedad trae como consecuencia la debilitación de las plantas cultivadas, que las expone a enfermedades y plagas como los nematodos. Ver **figura 1.3**.



**Figura 1.3.** Bacterias ácido lácticas.

- **Levaduras (*Saccharomyces spp*):** Las levaduras sintetizan las sustancias antimicrobiales y otras sustancias que son de mucha utilidad para el crecimiento de las plantas, a partir de los aminoácidos y azúcares secretados por las bacterias fotosintéticas, la materia orgánica y las raíces de las plantas. Ver **figura 1.4**.



**Figura 1.4.** Levaduras.

### **1.2.3. Importancia del uso del EM**

En el ambiente (aire, suelo, agua), en los alimentos que consumimos y en los seres humanos existen microorganismos. Estos pueden ser afectados por las condiciones actuales de contaminación y el uso excesivo de sustancias químicas que han causado la proliferación de microorganismos patógenos, que son los que finalmente causan las enfermedades en las plantas y animales, además generan malos olores y gases nocivos al descomponer residuos orgánicos.

Es por eso el uso de los microorganismos eficaces como un inoculante microbiano, que restablece el equilibrio microbiológico del suelo, mejorando sus condiciones físico-químicas y conservando los recursos naturales para generar una agricultura sostenible, dado al aumento de la producción de los cultivos.

### **1.2.4. Tipos y usos del producto EM<sup>22</sup>**

#### **1.2.4.1. Uso en la agricultura y en la producción animal**

Para mejorar la eficiencia de estas actividades, se puede usar el tipo de producto EM-1 (ver **figura 1.5**), tanto para semilleros, plantas y suelos, como en instalaciones de alojamiento de animales, sanidad y salud animal, trayendo los siguientes beneficios en su aplicación.

- **En semilleros**

- Aumenta la velocidad y el porcentaje de germinación de las semillas, por su efecto hormonal.
- Aumenta el vigor y el crecimiento del tallo y raíces.

- **En plantas**

- Genera un mecanismo de supresión de insectos y enfermedades en las plantas, ya que pueden inducir la resistencia sistémica de los cultivos a enfermedades.
- Incrementa el crecimiento, calidad y productividad de los cultivos.
- Incrementa la capacidad fotosintética por medio de un mayor desarrollo foliar.

- **En suelos**

- Mejora la estructura y agregación de las partículas del suelo, reduciendo la compactación, incrementa los espacios porosos y mejora la infiltración del agua por lo que disminuye la frecuencia de riego y hace que el suelo sea capaz de absorber 24 veces más el agua de lluvia, evitando la erosión por el arrastre de las partículas.
- Mejora la disponibilidad de nutrientes en el suelo, separando las moléculas que los mantienen fijos, dejando los elementos disgregados en forma simple para facilitar la absorción por el sistema radical.
- Suprime y controla las poblaciones de microorganismos patógenos que se desarrollan en el suelo, incrementando la biodiversidad microbiana, esto hace que generen las condiciones necesarias para que los microorganismos benéficos se reproduzcan.

- **En instalaciones de alojamiento de animales**

- Reduce los malos olores como el amoníaco y poblaciones de insectos y plagas que pueden presentarse en los establos o granjas.
- Disminuye el consumo de agua de lavado, implementando el manejo de camas secas para coleccionar excretas y orina.
- Reduce el requerimiento y utilización de desinfectantes, por lo que los costos de producción y mantenimiento también se reducen.

- **En sanidad y salud animal**

- Reduce la incidencia de enfermedades y estrés en el animal por el mejoramiento de las líneas celulares de defensa a causa de los antioxidantes generados por el EM, disminuyendo los requerimientos de medicamentos tales como: vitaminas, antibióticos y agentes hormonales.
- Aumenta la conversión de alimento y ganancia de peso al enriquecer los microorganismos ruminales.



**Figura 1.5.** Producto EM-1.

#### 1.2.4.2. Uso en abono orgánico

Para obtener abono orgánico en un corto espacio de tiempo, se puede usar el producto tipo EM-compost (ver **figura 1.6**), promoviendo la transformación aeróbica de compuestos orgánicos, evitando la descomposición de la materia orgánica por oxidación en la que liberan gases generados de olores molestos como sulfurosos y amoniacales.

Los siguientes beneficios que se pueden obtener en su aplicación para obtener abono orgánico son los siguientes:

- Evita la proliferación de insectos tales como moscas, ya que estas no encuentran un medio adecuado para su desarrollo.
- Incrementa la eficiencia de la materia orgánica como fertilizante. Durante el proceso de fermentación se liberan y sintetizan sustancias y compuestos como: aminoácidos, enzimas, vitaminas, sustancias bio activas, hormonas y minerales solubles, que al ser incorporados al suelo a través del abono orgánico, mejoran sus características físicas, químicas y microbiológicas.
- Acelera el proceso de compostaje a una tercera parte del tiempo de un proceso tradicional.
- Elimina microorganismos patógenos en el material compostado, por efecto de las altas temperaturas en las pilas que logran alcanzar hasta los 60 °C.



**Figura 1.6.** Producto EM-compost.

#### 1.2.4.3. Uso en tratamientos de aguas residuales

Uno de los mayores problemas que pueden generar las aguas residuales es la gran cantidad de materia orgánica, por lo que la utilización del producto tipo EM-agua (ver **figura 1.7**), es una solución muy útil por su capacidad de reducir el volumen de sólidos, su aplicación puede traer los siguientes beneficios:

- Transforma y sintetiza la materia orgánica, reduciendo la presencia de malos olores.
- Reduce los valores de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).
- Incrementa los valores de oxígeno disuelto.

- Reduce la presencia de lodos en sistemas de tratamiento convencionales.
- Reduce las poblaciones de microorganismos patógenos.



**Figura 1.7.** Producto EM-agua.

#### **1.2.5. Activación de los microorganismos eficaces (EM)<sup>23</sup>**

Para la utilización del EM es necesario que el producto sea activado antes de usarlo, ya que los microorganismos presentes están en estado de latencia. El procedimiento para la activación se muestra en los siguientes pasos:

- Se mezcla 1 kilogramo de melaza en 18 litros de agua limpia sin cloro y se agrega un litro de EM-compost (contenido del frasco). Ver **foto 1.1**.
- Toda la mezcla se coloca en un recipiente limpio con tapa, asegurando un cierre hermético, esto se logra llenando completamente con agua el recipiente para quitarle todo el aire y posteriormente se deja reposar por siete días en un ambiente bajo sombra. Ver **foto 1.2**.
- Durante la fermentación, es recomendable que al segundo día se abra el recipiente para eliminar el exceso de gas, añadiendo agua (sin cloro) para llenar el recipiente y taparlo nuevamente. Se debe realizar esta actividad cada vez que sea necesario.
- Al octavo día, se mide el pH debiendo estar por debajo de 4, debe presentar un olor agri dulce y un color café anaranjado. Cumpliendo con estas características químico-físicas se procede a colocar la mezcla en depósitos de un litro para su almacenamiento en un lugar bajo sombra. Ver **foto 1.3**.



**Foto 1.1.** Mezcla de melaza con EM-compost.



**Foto 1.2.** Cierre hermético del recipiente.



**Foto 1.3.** Almacenamiento del EM-compost activado.

## **Capítulo 2**

### **Metodología utilizada en la fase de campo y fase de laboratorio para los tratamientos de las pilas de compostaje**

#### **2.1. Descripción de los materiales a utilizar para el trabajo de investigación**

En este trabajo de investigación, se propone obtener abono orgánico (compost) de buena calidad, a partir de los residuos vegetales generados en el campus de la Universidad de Piura. Estos residuos se obtienen al momento de hacer la limpieza de las áreas verdes y del bosque de algarrobo, acumulándose cantidades significativas de hojarasca, ramillas y de material vegetal de la poda de los jardines y de los árboles de algarrobo.

El acopio y manejo de los residuos de la poda de jardines y ramillas de algarrobo se constituyeron en un problema, puesto que se optaba por quemarlos en el interior del campus, con el consecuente impacto sobre la calidad del aire.

El presente estudio plantea el compostaje de estos residuos, incorporando a la mezcla estiércol de ganado vacuno para complementar el proceso, ya que este material cuenta con un porcentaje significativo de nutrientes como nitrógeno y fósforo. A continuación se presenta una breve descripción de los cuatro materiales utilizados para el proceso de compostaje.

##### **2.1.1. Residuo de poda de jardines**

Estos residuos son generados durante la poda y la limpieza de las áreas verdes del campus de la Universidad de Piura. Esta actividad se realiza una vez al mes, utilizando una máquina podadora y rastrillos, obteniéndose un residuo conformado por frutos de algarrobo, hojas secas y -en mayor cantidad- césped de jardín. Esta actividad se realiza cuando el césped llega a medir una altura promedio de 10 cm aproximadamente; una vez podado, se juntan estos residuos utilizando rastrillos y finalmente son acopiados.

##### **2.1.2. Ramillas de algarrobo**

Las ramillas son generadas durante las actividades de poda y de raleo de los árboles de algarrobo, además de la limpieza realizada periódicamente al bosque, debido a que naturalmente se desprenden de los árboles. Estos residuos son juntados con rastrillos y finalmente acopiados.

Para ser incorporados al proceso de compostaje, se cortaron las ramillas manualmente utilizando machetes. El objetivo de este proceso era reducir su tamaño para mejorar el área

de contacto con los microorganismos y favorecer el proceso de biodegradación. Las dimensiones de estas ramillas, luego del corte, fue medido utilizando un pie de rey, obteniéndose un diámetro promedio de 9 mm, y un largo entre 6 cm y 13 cm. Ver **foto 2.1**.



**Foto 2.1.** Medición del diámetro de las ramillas.

### **2.1.3. Hojarasca de algarrobo**

La hojarasca de algarrobo llamada también puño, es generada al momento de realizar el mantenimiento del bosque de la Universidad de Piura. La limpieza de estas áreas se lleva a cabo una vez al año, y se realiza principalmente en las zonas que están cerca de los edificios, en la entrada de la universidad y en los caminos por donde transitan las personas, con la finalidad de brindar un mejor paisaje.

### **2.1.4. Estiércol de ganado vacuno**

El estiércol de ganado vacuno es obtenido de establos de la región. Este residuo se ha utilizado en el proceso de compostaje, debido al porcentaje elevado de materia orgánica y de nutrientes que posee, lo que favorece la obtención de un compost de buena calidad.

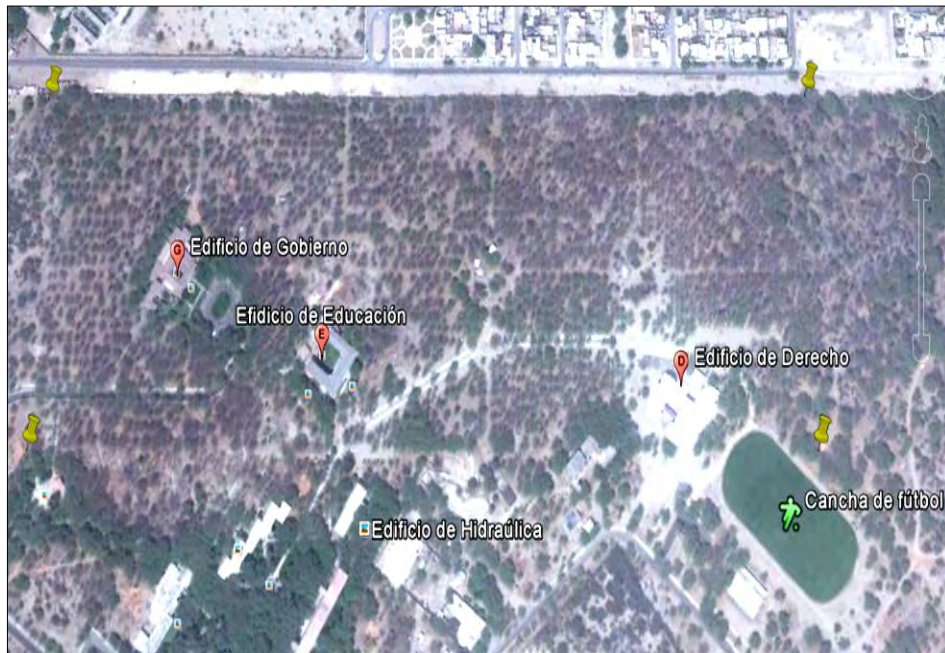
## **2.2. Cuantificación y cualificación de los árboles de algarrobo existentes en el campus de la Universidad de Piura**

El bosque de algarrobo de la universidad cuenta con un área total de 100 hectáreas aproximadamente, conformado por un área denominada bosque natural y otra área de bosque plantado, este último está dividido en cuatro fases.

Es denominado bosque plantado, debido a que los árboles de algarrobo fueron sembrados dejando una distancia de separación uno de otro, de tal forma que estos se encuentren alineados. La fase 1 está subdividida en 10 parcelas y la distancia de separación entre cada árbol es de 5 metros, mientras que en las demás fases, la separación entre cada línea de árboles es de 10 metros y los árboles que conforman cada línea lo están cada 5 metros de distancia. La fase 3 está conformada por una parcela de algarrobo de tipo argentino, algarrobo erecto, algarrobo achaparrado y otra por plantaciones de neem y tamarindo. Las cuatro fases se pueden apreciar en las figuras **2.1 – 2.4**. Estas fases se encuentran delimitadas por los hitos amarillos.

En general, todo el bosque de la universidad se caracteriza por su brotación significativa durante los meses de enero a marzo, debido a la temperatura y las precipitaciones propias

de este período. Durante el resto del año, la brotación disminuye y las hojas al secarse caen al suelo, generando lo que se conoce como hojarasca de algarrobo.



**Figura 2.1.** Fase 1 del bosque de algarrobo.



**Figura 2.2.** Fase 2 del bosque de algarrobo.



**Figura 2.3.** Fase 3 del bosque de algarrobo.



**Figura 2.4.** Fase 4 del bosque de algarrobo.

### **2.2.1. Método empleado para la actualización del inventario de árboles**

La cualificación y cuantificación de los algarrobos existentes en el bosque se realizó únicamente en el área de árboles plantados. El método empleado se basó en recorrer cada fase y evaluar las condiciones de brotación de cada árbol, calificándolo como:

- Excelente.
- Bueno.
- Regular.
- Malo.
- Seco.

La calificación se realizó mediante observación visual y fue asignada de acuerdo al porcentaje de brotación que presentaba la copa de cada árbol. En la **tabla 2.1** se presentan los criterios de calificación utilizados en la evaluación realizada.

Se recorrieron las cuatro fases para determinar el número de árboles existentes (ver **foto 2.2**). Además, se contó con unas plantillas que han sido elaboradas manteniendo la posición de cada árbol en todas las fases. Esto facilitó el trabajo, ya que a medida que se iba observando el árbol, se iba anotando la calificación de cada uno de acuerdo al número establecido (0 a 4).

**Tabla 2.1.** Criterios de calificación utilizados en la evaluación de los árboles de algarrobo.

| <b>Calificación del árbol</b> | <b>Porcentaje de brotación en la copa del árbol</b> | <b>Nº</b> |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------|
| Excelente                     | Por encima del 50 %                                 | 4         |
| Bueno                         | Por encima del 20 %                                 | 3         |
| Regular                       | Por debajo del 20 %                                 | 2         |
| Malo                          | Brotes sólo en los terminales y atacados por plagas | 1         |
| Seco                          | 0 %                                                 | 0         |



**Foto 2.2.** Calificación de los árboles de algarrobo.

## **2.3. Cuantificación de la biomasa de los residuos vegetales generados en la Universidad de Piura**

### **2.3.1. Método empleado para la obtención de la biomasa de podas de jardín**

La estimación de la cantidad de residuos generados durante la poda de los jardines se ha basado en el método de los cuadrados, mediante la determinación de la cantidad de residuos en un área circular de  $0,25 \text{ m}^2$  en la que se había realizado previamente la poda.

Finalmente, esta cantidad se extrapola a toda el área disponible del campus.

Los aparatos y el procedimiento utilizado se describen a continuación:

- **Aparatos y equipos**

- Balanza de precisión.
- Estufa.
- Desecador con deshidratante.
- Aro de varilla de 57 cm de diámetro.
- Bolsas de plástico.
- Placas Petri.

- **Procedimiento**

- Luego de realizarse la limpieza de las áreas verdes del campus con la máquina podadora, se lanza de manera aleatoria el aro de  $0,25 \text{ m}^2$  y se procede a recoger el césped cortado o residuo que queda contenido dentro del aro. Ver **foto 2.3**.
- Cada porción de residuo recogido se almacena en una bolsa.
- Se procede a pesar el residuo utilizando una balanza de precisión, obteniéndose el peso inicial del mismo en base húmeda.
- Se determina el porcentaje de humedad que contiene este residuo, utilizando el método de la estufa. Este método es explicado en el apartado **2.8.1.1**.
- Finalmente, se determina el peso de residuo generado en un área de  $0,25 \text{ m}^2$ .
- Este procedimiento se aplica a cada muestra obtenida del área podada, para finalmente obtener un promedio estimado, que servirá para determinar la cantidad de residuos generados en toda el área verde del campus.



**Foto 2.3.** Lanzamiento aleatorio del aro en área podada.

### **2.3.2. Método empleado para la obtención de la biomasa de la hojarasca de algarrobo**

Para estimar la cantidad de residuos de hojarasca generados durante la limpieza del bosque de algarrobo, se ha empleado el mismo método utilizado en las podas de jardín, con excepción del recojo de los residuos dentro del círculo, ya que se optó por utilizar tamices de 2 mm, 1 mm y 0,5 mm de abertura consecutivamente, con la finalidad de retirar la

tierra y obtener únicamente los residuos de hojarasca presentes en el área de 0,25 m<sup>2</sup>. Ver **foto 2.4.**



**Foto 2.4.** Tamizado para obtener el residuo de hojarasca.

### **2.3.3. Método empleado para la obtención de la biomasa de ramillas de algarrobo**

Para estimar la cantidad de ramillas generadas en las podas y raleos realizados durante la limpieza y mantenimiento del bosque de algarrobo, se ha utilizado el método descrito a continuación:

- **Herramientas**

- Sierra eléctrica.
- Horqueta.
- Hachas y machetes.
- Balanza romana.
- Cuerdas.
- Cinta métrica.
- Pie de rey.

- **Procedimiento**

- Se limpia el área del suelo bajo el árbol que se va a podar, sacando algunas malezas que puedan existir utilizando una horqueta, de tal forma de no mezclar las ramillas con otros materiales.
- Se podan las ramas más bajas y secas del árbol de algarrobo utilizando una sierra eléctrica.
- Las ramas que caen al suelo son troceadas utilizando hachas y machetes y luego son separadas de acuerdo al diámetro, es decir, en ramas gruesas, delgadas, finas y por último las ramillas con diámetro promedio de 9 mm que son acumuladas en pilas.
- Posteriormente, se mide el largo y el diámetro de cada rama utilizando una cinta métrica y un pie de rey respectivamente, se pesa cada rama gruesa, y las ramas delgadas y finas se juntan para ser pesadas en conjunto con la balanza romana.

- Finalmente, se pesan las ramillas previamente acopiadas y amarradas con una cuerda, utilizando una balanza romana, y se obtiene el peso de este material generado en el árbol podado. El peso de la cuerda deberá ser descontado del peso total. Ver **foto 2.5**.



**Foto 2.5.** Pesaje de las ramillas generadas durante la poda de árbol.

#### **2.4. Metodología utilizada para la construcción de las pilas de compostaje**

Se construyeron cuatro pilas de compostaje. Cada una se conformó con 200 kg de residuos, mezclados en la siguiente proporción:

- 30% de residuos de jardín,
- 20% de hojarasca,
- 30% de ramillas, y
- 20% de estiércol.

A cada pila se le agregó diferentes dosis de EM-compost activado (EMA), que es el producto utilizado para acelerar el proceso de degradación de la materia orgánica mencionado en el apartado **1.2.4.2** del presente trabajo de tesis. Cada dosificación generó un tratamiento, denominándose a:

- La pila 1, “tratamiento 0”, por ser la única pila que no se le agregó dosis alguna del producto y se constituyó como blanco o testigo.
- La pila 2, “tratamiento 1”, por aplicar dosis semanales de 0,5 L de EMA por mochila de 20 L.
- La pila 3, “tratamiento 2”, por aplicar dosis semanales de 1,0 L de EMA por mochila de 20 L.
- La pila 4, “tratamiento 3”, por aplicar dosis semanales de 1,5 L de EMA por mochila de 20 L.

Estas dosis fueron aplicadas durante 6 semanas, agregando un total de 3 L, 6 L y 9 L de EMA a las pilas 2, 3 y 4 respectivamente, durante el tiempo que duró el proceso de compostaje.

Para este trabajo se empleó la metodología de compostaje descrita en el apartado 1.1.5.1, denominada “sistemas abiertos o pilas de compostaje”, que es la más práctica y accesible para llevar a cabo el trabajo de investigación y determinar cuál de los cuatro tratamientos es el más óptimo.

#### 2.4.1. Ubicación de las pilas de compostaje

El lugar de compostaje en donde se llevó a cabo el trabajo de investigación se encuentra ubicado dentro de la Universidad de Piura, como se muestra en la **figura 2.5**, contando con un área total de 60 m<sup>2</sup> (15 m de largo y 4 m de ancho). Esta área se definió considerando el número de pilas a instalar y la cantidad de material a compostar para obtener un volumen que permitiese conseguir un equilibrio entre la humedad y la aireación en la pila, además del aspecto estético y ambiental.



**Figura 2.5.** Ubicación de las pilas de compostaje.

#### 2.4.2. Recolección de los materiales para el compostaje

Los materiales utilizados en el compostaje fueron recogidos por personal de mantenimiento del bosque y jardines del campus UDEP. Se determinó la cantidad requerida de cada material, la que fue acopiada y trasladada al área de compostaje para su posterior mezcla en las pilas de compost. Ver fotos 2.6 - 2.9.



**Foto 2.6.** Acopio de residuos de jardín.



**Foto 2.7.** Acopio de hojarasca de algarrobo.



**Foto 2.8.** Acopio de ramillas de algarrobo.



**Foto 2.9.** Bolsas de estiércol comprados en establos de la zona.

### **2.4.3. Preparación del terreno**

El lugar de compostaje se acondicionó limpiando las malezas, ramillas, piedras y otros objetos existentes para evitar que afecten negativamente o dificulten el proceso de compostaje, además se niveló el suelo para que las pilas estén en las mismas condiciones físicas. Posteriormente se construyó un techo de palos de madera como se muestra en la **foto 2.10**, para la protección de los rayos solares y se le cubrió con plástico para asegurar

que no les caiga el agua de las lluvias. Hay que recalcar que el trabajo se llevó a cabo en época de lluvias (marzo y abril).



**Foto 2.10.** Techado del lugar del compostaje.

#### **2.4.4. Dimensiones de las pilas de compostaje**

Las dimensiones de las pilas de compostaje influyen de manera significativa con respecto a la aireación, la temperatura y la humedad, y por lo tanto en la transformación adecuada del material orgánico.

Es importante mencionar que no existen unas medidas estandarizadas para la formación de las pilas de compostaje, pero se recomienda un ancho entre 1,2 m y 1,8 m; y una altura entre 1 m y 1,5 m; siendo el largo según sea la disponibilidad del terreno con que se cuenta. La altura es un parámetro muy importante ya que depende del clima de la zona, es decir, en climas cálidos se recomienda trabajar con una altura mínima para que la pila no caliente en exceso, en climas fríos la altura debe ser la máxima para mantener la temperatura ideal.

Para el trabajo de investigación se optó por diseñar las cuatro pilas de compost con las siguientes dimensiones, considerando que estamos en un clima cálido.

- Largo: 2,2 m.
- Ancho: 1,2 m.
- Altura: 0,8 m.

La separación entre la pila 1 (blanco) respecto a las demás fue de 1,5 metros, y entre las pilas 2, 3 y 4 fue de 60 cm.

#### **2.4.5. Composición de las pilas de compostaje**

##### **2.4.5.1. Proporciones de los materiales en las pilas de compost**

Para este estudio, las dimensiones de las pilas de compostaje se definieron a pequeña escala, considerándose 2,2 metros de largo. Esto facilitaría el volteo y riego continuo requerido durante su manejo.

Se determinó que cada pila estaría conformada por un total de 200 kilogramos de material a compostar, el que estaría constituido por el residuo de poda, la hojarasca de algarrobo, las ramillas y el estiércol, en las proporciones indicadas en la **tabla 2.2**.

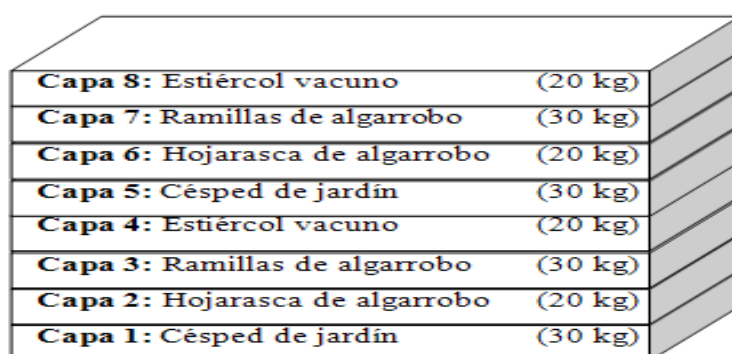
Estas proporciones se han establecido, de tal forma de mantener una relación en peso de 2,4 entre los residuos ricos en nitrógeno y los residuos ricos en carbono.<sup>24</sup> Los resultados obtenidos al evaluar cada material utilizado para el compostaje, determinó que los residuos que tuvieron mayor porcentaje de nitrógeno fueron: los residuos de jardín, hojarasca de algarrobo y el estiércol vacuno, mientras que las ramillas de algarrobo tuvieron un alto porcentaje de carbono, haciendo una relación en peso de 2,3.

**Tabla 2.2.** Cantidad de cada material que conforman la pilas de compostaje.

| Material               | Residuos de jardín (kg) | Hojarasca de algarrobo (kg) | Ramillas de algarrobo (kg) | Estiércol vacuno (kg) | Total por pila (kg) |
|------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|
| Tratamiento 0 (Pila 1) | 60                      | 40                          | 60                         | 40                    | 200                 |
| Tratamiento 1 (Pila 2) | 60                      | 40                          | 60                         | 40                    | 200                 |
| Tratamiento 2 (Pila 3) | 60                      | 40                          | 60                         | 40                    | 200                 |
| Tratamiento 3 (Pila 4) | 60                      | 40                          | 60                         | 40                    | 200                 |
| <b>Proporción (%)</b>  | <b>30</b>               | <b>20</b>                   | <b>30</b>                  | <b>20</b>             | <b>100</b>          |

Antes del inicio de la formación de las pilas de compostaje se construyó a manera de prueba, una pila de compost con las dimensiones establecidas para así determinar la cantidad de cada material a disponer en cada capa y definir la altura de la pila.

Se colocó en la base de la pila de prueba una primera capa de césped de jardín formando una altura de 15 centímetros, luego una capa con hojarasca de algarrobo con una altura de 7 centímetros, seguido de una capa de ramillas de algarrobo con una altura de 15 centímetros y finalmente una capa de estiércol de ganado vacuno con una altura de 3 centímetros, repitiéndose nuevamente en el mismo orden las siguientes capas de los mismos materiales. En total, se formaron ocho capas de material colocadas alternativamente una encima de otra. Cada porción de material se dividió en dos capas de igual peso y tamaño, tal como se puede apreciar en la **figura 2.6**.



**Figura 2.6.** Distribución de los materiales por capas.

#### 2.4.5.2. Dosis aplicadas de EM-compost activado (EMA) a los tratamientos

Las dosis que se aplicaron a los tratamientos 1, 2 y 3 se establecieron con la finalidad de determinar cuál de estos sería el más óptimo, al adicionarle los microorganismos eficaces que contiene el EM-compost, y evaluar la eficiencia de cada uno respecto a la cantidad de material degradado en el tiempo que se llevó a cabo el proceso de compostaje.

La preparación de las dosis se realizó utilizando una mochila de fumigación de 20 litros de capacidad. Por cada aplicación se tomaron tres depósitos del EMA que fueron almacenados después de su activación, siendo un total de tres litros que se requerían cada semana para aplicar a los tratamientos 1, 2 y 3.

A continuación se detalla la preparación del EMA en la mochila previo a su aplicación.

- **Tratamiento 0 (Pila 1):** Es el blanco o testigo, es decir, no se le agregó dosis alguna de EMA.
- **Tratamiento 1 (Pila 2):** Se vació 0,5 litros de EMA en la mochila y se llevó a 20 litros con agua para posteriormente aplicarlo a medida que se hacían los volteos.
- **Tratamiento 2 (Pila 3):** Se vació 1,0 litro de EMA en la mochila y se llevó a 20 litros con agua para posteriormente aplicarlo a medida que se hacían los volteos.
- **Tratamiento 3 (Pila 4):** Se vació 1,5 litros de EMA en la mochila y se llevó a 20 litros con agua para posteriormente aplicarlo a medida que se hacían los volteos.

#### 2.4.6. Formación de las pilas de compostaje

Una vez establecida la cantidad de material, el número de capas y las dosis de EMA a aplicarse a cada tratamiento, se procedió a la formación de las pilas de compostaje para su posterior evaluación.

El procedimiento seguido, se describe a continuación:

- Se excavó aproximadamente 10 cm de profundidad en el suelo para un mejor acondicionamiento de las pilas de compostaje. Ver **foto 2.11**.
- Se procedió a pesar la cantidad establecida de residuo de jardín para colocar la primera capa, se repartió por toda la base del área establecida para la formación de la pila de compostaje. Ver **foto 2.12**.
- Se agregaron las otras capas de los materiales en las cantidades y el orden correspondiente, tal como se mostró anteriormente en la figura 2.6 (distribución de los materiales por capas).
- Paralelo al proceso de la colocación de las capas de los diferentes materiales, se fue agregando agua para humedecer el material y al mismo tiempo se fue aplicando uniformemente con bomba de mochila de 20 litros los microorganismos eficaces, empleando las dosis establecidas para los tratamientos 1, 2 y 3. Ver **foto 2.13**.

- Finalmente, se procedió a regar con agua toda la pila ya formada tratando en lo posible de humedecerla por completo, teniendo cuidado que no hayan lixiviados, quedando las cuatro pilas de compost formadas para el inicio del proceso de compostaje. Ver fotos 2.14 – 2.15.



**Foto 2.11.** Excavación de 10 cm de profundidad.



**Foto 2.12.** Colocación de la primera capa de material.



**Foto 2.13.** Aplicación del EM-compost activado por capas.



**Foto 2.14.** Pila de compostaje terminada.



**Foto 2.15.** Instalación de las cuatro pilas de compostaje.

## **2.5. Monitoreo y control del proceso de compostaje**

Para que se lleve a cabo el proceso de compostaje en óptimas condiciones, es necesario hacer un monitoreo y un control periódico de la frecuencia de volteos, la regulación de humedad y la medición de la temperatura, dado que estos parámetros son de vital importancia para que el proceso demande el menor tiempo posible.

En el trabajo de investigación se hizo un seguimiento de estos parámetros por un periodo de 2 meses, controlando que a las pilas se le suministre la cantidad de oxígeno que estas requieren mediante los volteos, que tengan la humedad requerida evitando que se sequen o que se saturen de agua, y por último midiendo la temperatura durante todo el proceso para evitar que ésta se eleve demasiado y al mismo tiempo conocer cuando empieza a alcanzar temperatura ambiente, teniendo en cuenta que al ocurrir esto, nos determina que el compost ya está en su etapa de maduración y listo para poder usarlo.

### **2.5.1. Frecuencia de volteos y aplicación del EM-compost activado (EMA)**

Los volteos realizados a las pilas de compost son de vital importancia para la oxigenación, esto ayuda a que acelere la degradación por parte de los microorganismos existentes en el proceso.

Los volteos que se realizaron para este trabajo se llevaron a cabo dos veces por semana (las dos primeras semanas), y posteriormente una vez por semana hasta el término del proceso de compostaje, paralelo a esto, se aplicaron a las pilas las dosis establecidas de EM-compost activado una vez por semana (durante 6 semanas). Ver **foto 2.16**.



**Foto 2.16.** Volteo y aplicación del EM-compost activado.

### 2.5.2. Regulación de humedad

El agua es requerida por los microorganismos para desarrollar sus funciones metabólicas, además sirve para que los nutrientes se puedan transportar por toda la pila, permitiendo que estos estén repartidos uniformemente.

El riego establecido a las cuatro pilas de compostaje fue diario, aplicándole agua por las mañanas, de tal forma que todas las pilas reciban las mismas cantidades y para que la humedad se mantenga uniforme. La última semana que duró el proceso no se le agregó agua a las pilas de compostaje, para obtener un compost con una mejor textura y para que el tamizado se realice más fácilmente.

Para el trabajo de investigación se llevó un control de humedad tanto de manera experimental como empírica, el primer método se llevó a cabo tomando muestras cada dos semanas llevándose al laboratorio para determinar el porcentaje de humedad que tenían cada tratamiento, el segundo método denominado “el método del puño” se realizó cada semana, tomando en cuenta los siguientes pasos:

- Poner en la mano una muestra de material.
- Cierre la mano y apriete fuertemente el mismo.
- Si con esta operación verifica que sale un hilo de agua continuo del material, entonces podemos establecer que el material contiene más de un 40% de humedad.
- Si el material no gotea y cuando abrimos el puño de la mano permanece moldeado, estimamos que la humedad se presenta entre 20% y 30%.
- Finalmente, si abrimos el puño y el material se disgrega, asumimos que el material contiene una humedad inferior al 20%.

### 2.5.3. Medición de la temperatura

El control de la temperatura en el proceso de compostaje es muy importante, ya que al inicio de este proceso aumenta a causa del metabolismo de los microorganismos, es por eso que se necesita calor para que la materia orgánica se descomponga.

En el trabajo de investigación se llevó un control de este parámetro de manera inter diaria, es decir, se establecieron las lecturas para ser realizadas los días lunes, miércoles y viernes, tomando lecturas dos veces al día, la primera a las nueve de la mañana y la segunda a las cinco de la tarde, utilizando un termómetro para compost ideal para este material (ver **foto 2.17**), dado que puede ser introducido hasta 35 cm de profundidad desde cualquier área de la pila de compostaje, tal como se puede ver en la **foto 2.18**.

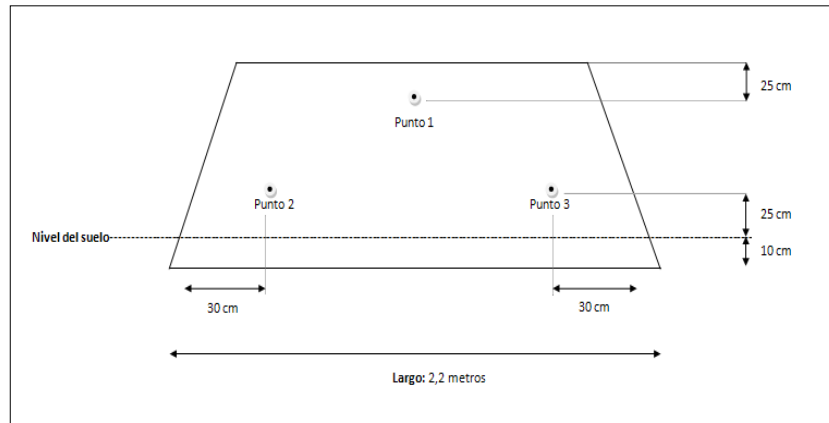


**Foto 2.17.** Termómetro para compost.



**Foto 2.18.** Medición de temperatura en la pilas de compost.

Los puntos específicos que se establecieron para medir la temperatura en las pilas fueron tres. Para el primer punto, se introdujo el termómetro a 25 cm de la superficie de la pila, el segundo y tercero a 25 cm del nivel del suelo y a 30 cm de los extremos de la pila, tal como se puede apreciar en la **figura 2.7**.



**Figura 2.7.** Puntos de medición de temperatura en la pila de compostaje.

## 2.6. Obtención de muestras para el laboratorio

Una vez instaladas las cuatro pilas de compostaje, se realizó la toma de muestras periódicamente para realizar sus respectivos análisis físico-químicos y microbiológicos en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria (LIS) del Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura.

Para el caso de los análisis físico-químicos, se tomaron tres muestras a cada pila de compostaje, de tal forma que los análisis se realizaran por triplicado; y para el caso de los análisis microbiológicos, se tomó una muestra de cada pila. En ambos casos, se aprovechó los volteos que se realizaron para tomar las muestras de distintos puntos de la pila, de tal manera de obtener una muestra homogénea. Ver **foto 2.19**.



**Foto 2.19.** Toma de muestra en la pila de compostaje.

### 2.6.1. Frecuencia de toma de muestras

Se tomaron las muestras para los análisis físico-químicos cada dos semanas, siendo un total de cuatro muestreos que se realizaron. Para el análisis microbiológico se realizaron siete muestreos, uno por semana, durante los 54 días que duró el proceso de compostaje. El cronograma se puede apreciar en la **tabla 2.3**.

**Tabla 2.3.** Cronograma establecido para la toma de muestras.

| Tiempo (días)           | 8° día | 15° día | 21° día | 29° día | 36° día | 43° día | 54° día |
|-------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Análisis físico-químico | x      |         | X       |         | x       |         | x       |
| Análisis microbiológico | x      | x       | X       | x       | x       | x       | x       |

## 2.7. Tamizado y pesaje del compost en la etapa final del proceso

Transcurrido siete semanas, se dejó de adicionarle agua a las pilas de compost por un tiempo de una semana, completando así el proceso de dos meses que duró el compostaje, pero se siguió realizando los volteos respectivos, con la finalidad de oxigenar a las pilas y para realizar un mejor tamizado del compost.

El tamizado se llevó a cabo con dos tipos de mallas, el primer tamizado se realizó con una malla con abertura de 24 mm (ver **foto 2.20**), luego se realizó un segundo tamizado utilizando una malla con abertura de 10 mm (ver **foto 2.21**), para finalmente obtener el compost con una textura adecuada.

Posteriormente se colocó el compost ya tamizado en sacos, para luego pesarlos utilizando una balanza romana (ver **foto 2.22**) y así obtener el peso total de compost generado en cada pila de compostaje.



**Foto 2.20.** Primer tamizado.



**Foto 2.21.** Segundo tamizado.



**Foto 2.22.** Pesaje de los sacos de compost.

## **2.8. Parámetros evaluados en el proceso de compostaje**

Respecto a los análisis físico-químicos, como ya se mencionó anteriormente, la temperatura se midió de manera inter diaria, también se midieron: la humedad, pH, nitrógeno total, cenizas, materia orgánica y carbono orgánico.

Para el caso de los análisis microbiológicos, se midieron los siguientes parámetros: población total de bacterias, población total de hongos y microorganismos termotolerantes.

## **2.9. Descripción de los métodos empleados para la medición de los parámetros físico-químicos y microbiológicos**

### **2.9.1. Parámetros físico-químicos y métodos empleados para su medición**

Los análisis realizados para estos parámetros se llevaron a cabo en el área de análisis físico – químico del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria (LIS).

#### **2.9.1.1. Método para la determinación de humedad<sup>25</sup>**

Para determinar el porcentaje de humedad que contienen los residuos vegetales y el compost generados en la Universidad de Piura, se ha utilizado “el método de la estufa”.

Este método se basa en la pérdida de peso que sufre la muestra cuando está sometida a condiciones de tiempo y temperatura establecidas por este método, considerando que esta pérdida se origina por la eliminación de agua.

#### **• Aparatos y equipos**

- Balanza analítica con sensibilidad de 0,001 g.
- Estufa.
- Desecador con deshidratante.
- Placas Petri.

#### **• Procedimiento**

- Se coloca la placa Petri y su tapa (abierta) en la estufa a 120 °C durante dos horas, para quitarle la humedad que puedan tener, transcurrido ese tiempo, se saca la placa y

su tapa de la estufa e inmediatamente se introduce al desecador durante 15 minutos, para posteriormente colocar la muestra.

- Se pesa la placa y su tapa juntas en la balanza analítica (este peso lo denotaremos como P), para después descontarlo en los cálculos.
- Se deposita la muestra sin compactar hasta un 50% del volumen de la placa, se tapa y se pesa (este peso lo denotaremos como Mh).
- Se introduce en la estufa la placa destapada junto con la muestra a una temperatura de 60 °C y durante dos horas, luego se deja enfriar 15 minutos, se tapa y se pesa nuevamente (este peso lo denotaremos como Ms). Toda esta operación se debe repetir las veces que sean necesarias hasta obtener un peso Ms constante (los pesos, tanto el actual como el anterior deben tener una variación de  $\pm 0,0005$  gramos para considerarlo como peso constante). Ver **foto 2.23**.

#### • Cálculo

La humedad presente en la muestra se calcula mediante la fórmula:

$$W (\%) = \frac{(Mh-P)-(Ms-P)}{(Mh-P)} \times 100$$

Donde:

W = Porcentaje de humedad de la muestra.

Mh = Peso de la muestra húmeda en gramos.

Ms = Peso de la muestra seca en gramos.

P = Peso de la placa y su tapa en gramos.



**Foto 2.23.** Utilización de estufa para el secado de la muestra.

### 2.9.1.2. Método para la determinación de pH<sup>26</sup>

Para la determinación del pH se ha utilizado “el método potenciométrico o electroquímico”. Con este método se mide el potencial de un electrodo sensitivo a los iones  $H^+$  (electrodo de vidrio) presentes en una solución.

En la práctica se utilizan soluciones amortiguadoras de pH conocido, para calibrar el instrumento y luego comparar ya sea el potencial eléctrico o el pH directamente de la solución por evaluar.

- **Aparatos y equipos**

- Balanza analítica con sensibilidad de 0,001 g.
- Potenciómetro.
- Bomba de vacío.
- Agitador magnético.
- Vasos de precipitado de 250 ml.
- Probetas de 25 y 100 ml.
- Kitasato de 250 ml.
- Vaso de filtrado.
- Papel filtro para sólidos totales disueltos (diámetro de 47 mm).
- Piseta con agua destilada.

- **Reactivos**

- Solución amortiguadora de pH=4,0.
- Solución amortiguadora de pH=7,0.
- Solución amortiguadora de pH=11,0.

- **Procedimiento**

- Se calibra el potenciómetro con las soluciones amortiguadoras de pH=4, pH=7 y pH=11, antes de usarlo.
- Se pesan 10 g de la muestra y se colocan en un vaso de precipitado de 250 ml.
- Se añaden 90 ml de agua destilada, mezclar por medio de un agitador magnético durante 10 minutos y luego dejar reposar entre 10 y 15 minutos.
- Se introduce el papel filtro al vaso de filtrado y este se coloca en el kitasato, para posteriormente conectarlo a la manguera de la bomba de vacío.
- Se agrega una cantidad de la solución al vaso de filtrado y se espera aproximadamente 10 minutos que filtre por completo.
- Se separa el kitasato de la manguera de la bomba para agregar entre 12 ml y 15 ml de extracto en la probeta de 25 ml.
- Posteriormente se sumerge el electrodo a la probeta de 25 ml, el valor del pH de la solución es la lectura obtenida en la pantalla del potenciómetro. Ver **foto 2.24**.

- Se saca el electrodo del extracto y se lava con agua destilada. La diferencia máxima permisible en el resultado de pruebas efectuadas por duplicado o triplicado no debe exceder 0,1 unidades de pH, en caso contrario se debe repetir nuevamente la operación.



**Foto 2.24.** Lectura del potenciómetro para determinación de pH.

### **2.9.1.3. Método para la determinación de nitrógeno total<sup>27</sup>**

La cantidad de nitrógeno presente en la muestra se determinó con “el método modificado de Kjeldhal”. Este método se emplea en la determinación del contenido de nitrógeno en sustancias de origen animal o vegetal y en forma de compuestos orgánicos.

El método de kjeldhal está basado en la combustión húmeda de la muestra, calentándola con ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) concentrado, en presencia de catalizadores metálicos para efectuar la reducción del nitrógeno orgánico de la muestra a amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), el cual es retenido en solución como sulfato de amonio  $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ . La solución de la digestión se hace alcalina y se destila para liberar el amoníaco que es atrapado y posteriormente titulado.

Este método comprende tres fases fundamentales:

#### Digestión

La muestra se somete a una digestión por calentamiento con ácido sulfúrico y por una mezcla de sales que aceleran y facilitan tanto la oxidación de la materia orgánica como la conversión de todas las formas de nitrógeno en  $\text{NH}_3$ , que en medio ácido se encuentran en forma de radical amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), es decir, se llevan las formas orgánicas a formas minerales de nitrógeno.

#### Destilación

Una vez transformado el nitrógeno en  $\text{NH}_4^+$ , se expone a una base fuerte como el hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) para formar hidróxido de amonio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), que por la acción del calor se descompone en amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y agua.

### Titulación

El amoníaco desprendido por la reacción se recoge en un volumen conocido de solución valorada de ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ), y por comparación con un blanco se determina la cantidad de ácido que reaccionó con el amoníaco.

#### • **Aparatos y equipos**

- Balanza analítica con sensibilidad de 0,001 g.
- Digestor.
- Tubos de digestión (6).
- Destilador.
- 6 Frascos Erlenmeyer de 250 ml.
- Agitador magnético.
- Soporte universal de pinza.
- Pisseta con agua destilada.

#### • **Soluciones y reactivos**

- Sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ).
- Ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).
- Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) al 40%.
- Ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) al 2%.
- Indicador rojo de metilo.
- Indicador azul de metilo.
- Ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) 0,1 N.
- Selenio metálico o negro (catalizador).

#### • **Procedimiento**

##### **Preparación de la muestra**

- Se pesa con exactitud 0,2 g de la muestra previamente secada a 75 °C, durante dos horas y luego se agrega la muestra en un tubo de digestión.

##### **Preparación del blanco**

- En el tubo de digestión destinado para el blanco no se agrega ninguna cantidad de muestra, únicamente los reactivos y soluciones con los que se trabajarán.

##### **Digestión**

- Se agrega al tubo de digestión de las muestras y el blanco 0,4 g de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ); 0,1 g de selenio metálico; 2 ml de agua destilada y 4 ml de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), con la finalidad de convertir las aminas de los materiales orgánicos en sulfatos de amonio.
- Se procede a realizar la digestión de las muestras y el blanco, llevando los tubos de digestión a la cocción del digestor. Se realizan 5 repeticiones y un blanco (el sistema de digestión está formado por 6 tubos). Ver **foto 2.25**.

- El sistema se lleva a una temperatura de 175 °C por un espacio de 6 horas. En ese tiempo se observa la formación de humos blancos.
- Seguidamente se retiran los tubos de la cocinilla y se dejan enfriar.

### Destilación

- Se agregan 20 ml de agua destilada a los tubos de digestión ya enfriados. Estos tubos se conectan cuidadosamente a un sistema de destilación.
- Antes de destilar se le agrega a las muestras y al blanco en el tubo de digestión, 20 ml de hidróxido de sodio (NaOH) al 40%, con la finalidad de realizar la destilación en un medio alcalino.
- En el punto final del condensador del sistema de destilación se coloca un frasco Erlenmeyer de 250 ml, con 20 ml de ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) al 2%, 0,5 ml de indicador rojo de metilo y 0,25 ml de indicador azul de metilo. Toda esta mezcla se torna un color fucsia en donde será absorbido el amoníaco.
- La destilación se mantiene durante 10 minutos, que es tiempo suficiente para que destile todo el amoníaco presente en la solución tratada.
- Se aplica el mismo procedimiento de destilación a cada uno de los 6 tubos de digestión. Ver **foto 2.26**.

### Titulación

- Finalmente se retira el frasco Erlenmeyer con la solución ácida y se lleva a titular con ácido clorhídrico 0,1 N anotando el gasto (G). Ver **foto 2.27**.
- De la misma manera se realiza para el blanco, anotando el gasto ( $G_0$ ).

### • Cálculo

El nitrógeno total presente en la muestra se calcula mediante la fórmula:

$$NT(\%) = \frac{(G - G_0)}{P} \times 1,4 \times 100$$

Donde:

NT = Porcentaje de nitrógeno total en la muestra.

G = Gasto de ácido clorhídrico durante la valoración de la muestra.

$G_0$  = Gasto de ácido clorhídrico durante la valoración del blanco.

1,4 = Factor de relación mg de nitrógeno / ml de ácido clorhídrico 0,1 N.

P = 200 mg (Peso de la muestra inicial en mg).



**Foto 2.25.** Colocación de los tubos en el digestor.



**Foto 2.26.** Retiro del frasco Erlenmeyer del destilador.



**Foto 2.27.** Titulación con ácido clorhídrico 0,1 N.

#### **2.9.1.4. Método para la determinación de cenizas<sup>28</sup>**

Para la determinación de cenizas se ha utilizado “el método de calcinación” mediante una mufla con indicador de altas temperaturas.

- **Aparatos y equipos**

- Estufa.
- Desecador.
- Balanza analítica con sensibilidad de 0,001 g.
- Mufla con indicador de temperatura.
- Crisoles de porcelana.
- Placas Petri.
- Mortero de porcelana.

- **Procedimiento**

- Se seca el crisol de porcelana en la mufla a 600 °C por una hora y se deja enfriar para posteriormente llevarlo al desecador.
- Se pesa el crisol en la balanza analítica y se anota el peso (Pc).
- Se muele la muestra en un mortero de porcelana hasta pulverizarla.
- Se coloca una cantidad de muestra considerable (10 g aproximadamente) en una placa Petri y se lleva a la estufa para secarla a 75 °C por dos horas.
- Se obtienen 4 g de la muestra ya secada anteriormente, se ponen en el crisol ya enfriado y se seca nuevamente en la estufa a 75 °C por dos horas, luego se deja enfriar en el desecador y se vuelve a pesar, a este peso se descuenta el peso del crisol (Pc) para obtener el peso de la muestra inicial (Pi) con la que se va a trabajar en el cálculo de cenizas.
- A continuación se enciende la mufla y se lleva a una temperatura de 600 °C para luego poner el crisol que contiene la muestra por un tiempo de dos horas. Ver **foto 2.28**.
- Finalmente, se deja enfriar el crisol con la muestra y posteriormente se pesan, descontando el peso del crisol (Pc) para obtener el peso de la muestra final (Pf) secada a 600 °C.

- **Cálculo**

El porcentaje de cenizas presente en la muestra se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Cenizas (\%)} = (Pf / Pi) \times 100$$

Donde:

Cenizas = Porcentaje de cenizas en la muestra.

Pf = Peso de la muestra final secada a 600 °C.

Pi = Peso de la muestra inicial.



**Foto 2.28.** Colocación de los crisoles en la mufla.

#### **2.9.1.5. Determinación de materia orgánica**

Los sólidos volátiles es lo mismo que la materia orgánica (MO), puesto que la calcinación de la muestra es realizada para eliminar la materia orgánica presente.

La materia orgánica presente en la muestra se calcula mediante la fórmula:

$$MO (\%) = 100 - \text{Cenizas} (\%)$$

Donde:

MO = Porcentaje de materia orgánica en la muestra.

#### **2.9.1.6. Método para la determinación de carbono orgánico**

El carbono orgánico (CO) multiplicado por 1,72 proporciona una estimación de la materia orgánica. Esta definición se basa en “el método de Walkley – Black”. En este caso se tiene el dato de la materia orgánica, por lo que se puede determinar el CO.

El carbono orgánico presente en la muestra se calcula mediante la fórmula:

$$CO (\%) = \frac{MO (\%)}{1,72}$$

Donde:

CO = Porcentaje de carbono orgánico en la muestra.

#### **2.9.1.7. Relación carbono / nitrógeno**

La relación carbono/nitrógeno (C/N) presente en la muestra se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Relación C/N} = \frac{CO (\%)}{NT (\%)}$$

### 2.9.1.8. Método para la determinación de fósforo total<sup>29</sup>

La cantidad de fósforo presente en la muestra se determinó por el “método modificado de Olsen”.

- **Aparatos y equipos**

- Balanza analítica con sensibilidad de 0,001 g.
- Fiolas volumétricas de 1000 ml.
- Potenciómetro.
- Soporte universal y agitador magnético.
- Vasos de precipitado de 250 ml.
- Frascos Erlenmeyer de 100 ml.
- Bomba de vacío.
- Kitasato.
- Espectrofotómetro.
- Celdas.

- **Preparación de soluciones y reactivos**

#### **Para el blanco y muestras**

- **Bicarbonato sódico 0,1 N (para 1000 ml de solución)**

Pesar 42,5 g de bicarbonato sódico ( $\text{NaHCO}_3$ ) libre de fosfatos. Diluir a 1000 ml utilizando una fiola volumétrica y ajustar el pH a 8,5 con hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) 1 N.

- **Carbón activado o decolorador**

Deberá ser lavado previamente con la solución de bicarbonato sódico y luego con agua destilada. Repetir esta operación varias veces hasta que el extracto tenga menos de 2 ppm de fósforo. Luego se seca en la estufa a 60 °C por dos horas.

Para este análisis se estableció que se debe lavar el carbón al menos 5 veces con bicarbonato sódico (40 ml por lavada) y abundante agua destilada, utilizando papel filtro en un kitasato donde es vaciado el carbón y obteniendo el extracto por medio de una bomba de vacío (en cada lavada se analizaba el extracto obtenido para determinar la cantidad de fósforo que contenía, hasta que sea menor al 2 ppm).

- **Solución de molibdato de amonio-ácido sulfúrico (para 1000 ml de solución)**

En un vaso de precipitado de 250 ml se disuelve 1 g de heptamolibdato de amonio  $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}]$  en agua destilada. A la solución se le agrega 0,024 g de tartrato de antimonio y potasio  $[\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{O}_6]$ , disolviéndolos. Posteriormente se agregan 16 ml de ácido sulfúrico concentrado ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y se completa con agua destilada hasta 1 litro en fiola volumétrica.

**NOTA:** Inmediatamente antes de usarse este reactivo, se agrega 1 g de ácido ascórbico ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ ) para 1 litro de esta solución.

### Para la curva patrón

- **Solución estándar de fosfato de 50 ppm (para 500 ml de solución)**

Se disuelven 0,1097 g de fosfato de potasio dihidrógeno ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) en 500 ml de bicarbonato sódico. Esta solución contiene 50 ppm de fósforo.

- **Solución de 5 ppm de fósforo**

Se diluye la solución estándar de fosfato de 50 ppm con agua destilada en la proporción 1:10.

### • Procedimiento

#### Determinación de la curva patrón

- Se deben establecer los estándares de 0 - 0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8 y 1 ppm para la curva patrón que se utilizará.
- En cada vaso de precipitado de 250 ml se agregan las cantidades de solución 5 ppm de fósforo, agua destilada y solución de molibdato de amonio – ácido sulfúrico indicadas en la **tabla 2.4**. Ver **foto 2.29**.
- Se agita la mezcla contenida en cada vaso de precipitado por 20 minutos y luego se coloca una alícuota en cada celda.
- Tomar lectura de la absorbancia para cada celda, colocándolas en el espectrofotómetro para obtener la curva con la que se trabajará.

**Tabla 2.4.** Cantidades utilizadas para la curva de fósforo (P).

| Punto | Concentración (ppm) | Solución 5 ppm de P (ml) | Agua destilada (ml) | Solución de molibdato de amonio – ácido sulfúrico (ml) |
|-------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------|
| 0     | 0,0                 | 0                        | 20                  | 80                                                     |
| 1     | 0,2                 | 4                        | 0                   | 96                                                     |
| 2     | 0,4                 | 8                        | 0                   | 92                                                     |
| 3     | 0,6                 | 12                       | 0                   | 88                                                     |
| 4     | 0,8                 | 16                       | 0                   | 84                                                     |
| 5     | 1,0                 | 20                       | 0                   | 80                                                     |

#### Preparación del blanco

- Colocar en un frasco Erlenmeyer de 100 ml, 1 g de carbón decolorador.
- Agregar 25 ml de bicarbonato sódico.
- Agitar durante 30 minutos.

- Filtrar en bomba de vacío y recibir el extracto en frasco Erlenmeyer de 100 ml.
- Tomar 2 ml de alícuota del extracto en un frasco Erlenmeyer de 100 ml.
- Añadir 8 ml de solución de molibdato de amonio – ácido sulfúrico.
- Agitar la mezcla por 20 minutos y luego colocar una cantidad en las celdas.
- Tomar lectura introduciendo las celdas al espectrofotómetro.

### **Preparación de la muestra**

- Colocar en un frasco Erlenmeyer de 100 ml 0,5 g de muestra tamizado en tamiz de 2 mm.
- Agregar 1 g de carbón decolorador.
- Agregar 25 ml de solución de bicarbonato sódico.
- Agitar por 30 minutos.
- Filtrar en bomba de vacío y recibir el extracto en un frasco Erlenmeyer de 100 ml.
- Tomar 2 ml de alícuota del extracto en un frasco Erlenmeyer de 100 ml.
- Añadir 8 ml de la solución de molibdato de amonio – ácido sulfúrico.
- Agitar la mezcla por 20 minutos y luego colocar una cantidad en las celdas.
- Tomar lectura introduciendo las celdas al espectrofotómetro.



**Foto 2.29.** Preparación de los estándares para curva patrón.

## **2.9.2. Parámetros microbiológicos y métodos empleados para su medición**

Los análisis microbiológicos que se realizaron en todo el proceso para determinar la población microbiana en el compost, se llevaron a cabo en el área de microbiología del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria (LIS).

### **2.9.2.1. Método para la determinación de la población total de bacterias<sup>30</sup>**

La determinación de las bacterias totales de un sistema, básicamente se refiere a las bacterias heterótrofas que pueden estar presentes en el suelo, sedimentos, aguas residuales y compost, es decir, son aquellos microorganismos que obtienen su fuente de carbono a partir de compuestos orgánicos.

Para realizar el conteo de la población total de bacterias contenidas en el compost se utilizó el “método de dilución por placa”, que consiste en la preparación de una serie de diluciones de una muestra de compost en un diluyente apropiado, esparciendo una alícuota de una dilución sobre la superficie de un medio de cultivo sólido e incubando la placa de agar bajo condiciones ambientales apropiadas. La dilución debe permitir generar colonias separadas, la cual se contará como una bacteria.

El medio de cultivo más utilizado es el agar nutritivo o caldo nutritivo, ya que es un medio rico en nutrientes de carbono y proteínas, capaz de permitir el desarrollo de muchas bacterias heterótrofas en muy corto tiempo.

#### **• Aparatos y equipos**

- Balanza analítica.
- Agitador magnético.
- Autoclave.
- Incubadora.
- Campana de flujo laminar o área estéril.
- Equipo vórtex.
- Placas Petri.
- Matraces de 250 ml.
- Tubos de vidrio de 15 ml.
- Pipeta de 10 ml.
- Varilla de vidrio.
- Tips estériles.
- Guantes.
- Papel aluminio estéril.

#### **• Preparación de soluciones**

**Preparación del medio de cultivo:** El medio de cultivo utilizado es el plate count agar (PCA), cuya preparación es la siguiente:

- Pesar 22,5 g de PCA y agregar un litro (1000 ml) de agua destilada, homogeneizar con varilla de vidrio, se debe de medir el pH debiendo estar entre 6,8 y 7,2.
- Llevar la solución a ebullición hasta que se hayan disuelto todos los gránulos del agar PCA.

- Introducir la solución a la autoclave sometiéndola a temperatura de 121 °C y a presión de 101,3 kPa, por un tiempo de 15 minutos.
- Retirar la solución de la autoclave y mantenerla a temperatura entre 45 °C y 50 °C, para luego verter en las placas.
- Su aspecto es amarillo claro.

**Preparación de solución salina fisiológica (0,85%):**

- Adicionar 8,5 g de cloruro de sodio (NaCl) en un litro de agua destilada.
- Llenar los tubos de vidrio requeridos con 9 ml de la solución utilizando una pipeta de 10 ml, cerrando los tubos con sus tapas.
- Agregar 90 ml de la solución a un matraz de vidrio (el número de matraces depende del número de muestras que se van a analizar), luego se sella la boca del matraz con papel aluminio.
- Introducir a la autoclave los tubos y los matraces que se van a requerir, sometiéndola a temperatura de 121 °C y a presión de 101,3 kPa, por un tiempo de 15 minutos.

• **Procedimiento**

- Se debe utilizar un cubículo o campana de flujo laminar para garantizar un ambiente de trabajo estéril.
- Se pesan 10 g de muestra, utilizando la balanza analítica.
- Se agregan los 10 g a un matraz con 90 ml de solución salina fisiológica, para posteriormente disolver la muestra utilizando un agitador magnético por un tiempo de 10 minutos.
- Tomar una alícuota de 1 ml de la dilución utilizando tips y transferirlo a un tubo de vidrio con 9 ml de solución salina fisiológica (dilución  $10^{-2}$ ), agitando la dilución con un equipo vórtex.
- Tomar 1 ml de la dilución anterior y colocarlo en un nuevo tubo de vidrio con 9 ml de solución salina fisiológica (dilución  $10^{-3}$ ), de ahí se hacen las diluciones sucesivas hasta completar diluciones decimales de  $10^{-10}$  o las que se necesiten, asegurándose de utilizar tips diferentes en cada dilución sucesiva, agitando de forma constante con el equipo vórtex en cada sucesión.
- Tomar aproximadamente 0,1 ml de dilución de los tubos seriados y colocarla en la placa Petri, luego se vierte el medio de cultivo previamente preparado a la placa, de tal forma de mezclarlos.
- Se tapa la placa y se procede a homogeneizar, esparciendo la mezcla por toda la base de la placa dando giros circulares a la derecha y luego a la izquierda y por último de arriba hacia abajo, de tal manera que no quede ninguna área de la placa descubierta.
- Dejar reposar por 10 minutos hasta que la mezcla solidifique.
- Incubar las placas de forma invertida a 35 °C durante 48 horas. Ver **foto 2.30**.

- **Cálculo**

- Una vez cumplido el tiempo de incubación, se cuentan las colonias que han crecido en cada placa, para el caso de las bacterias deben considerarse las placas que contengan el número de colonias (NC) entre 30 y 300.

$$\text{UFC} / \text{g.c} = (\text{NC} \times 1/\text{FD} \times \text{V})$$

Donde:

UFC/g.c = Unidades formadoras de colonia / gramo de compost.

NC = Número de colonias.

FD = Factor de dilución que corresponde a la dilución de donde se tomó la muestra con la que inocula la placa ( $10^{-2}$  a  $10^{-10}$ ).

V = Volumen de la alícuota = 1 ml.



**Foto 2.30.** Incubación de las placas.

#### **2.9.2.2. Método para la determinación de la población total de hongos**

La mayoría de hongos existentes en el ambiente están presentes en el suelo y desempeñan una actividad muy importante que es la mineralización del carbono orgánico, estos microorganismos requieren de nutrientes muy simples, pero su desarrollo es más lento, requiriendo de mayor tiempo de incubación para su cultivo.

El medio de cultivo utilizado para el crecimiento de las colonias de hongos en las placas es el agar nutritivo dicloran - rojo de bengala – cloranfenicol (DRBC), este medio contiene antibióticos que reducen significativamente el crecimiento de bacterias y actinomicetos que pueden estar presentes en la muestra, permitiendo realizar un mejor conteo del número de colonias presentes en las placas.

Para realizar el conteo de la población total de hongos contenidos en el compost, se aplicó el mismo método utilizado para el conteo de bacterias, requiriendo los mismos equipos y cálculos para expresarlos en unidades formadoras de colonia (UFC) / gramo de compost.

- **Preparación de solución**

**Preparación del medio de cultivo:**

- Pesar 31,6 g de DRBC y agregar un litro (1000 ml) de agua destilada, homogeneizar con varilla de vidrio.
- Llevar la solución a ebullición hasta que se hayan disuelto todos los gránulos del agar DRBC.
- Introducir la solución a la autoclave sometiéndola a temperatura de 121 °C y a presión de 101,3 kPa, por un tiempo de 15 minutos.
- Retirar la solución de la autoclave y mantenerla a temperatura entre 45 °C y 50 °C para luego verter en las placas.
- Su apariencia es claro rosa.

- **Procedimiento**

- Los pasos son los mismos que se mencionaron para el conteo de bacterias, con la diferencia que no se necesita de una incubadora, dado que el crecimiento se lleva a cabo a temperatura ambiente, por lo que solo se dejan las placas vertidas en un lugar fresco y bajo sombra por un tiempo de cinco días como mínimo. Es recomendable que a un costado de las placas se coloque una bandeja con agua para mantener la humedad ideal en el ambiente.

- **Cálculo**

- Una vez pasado el tiempo de incubación de las placas, se cuentan las colonias que han crecido, para el caso de los hongos deben considerarse las placas que contengan el número de colonias (NC) entre 10 y 100. Luego se aplica la misma fórmula descrita anteriormente.

## Capítulo 3

### Resultados obtenidos en la fase de campo y laboratorio

#### 3.1. Resultados de los análisis físico-químicos de los materiales a compostar

Antes del inicio del proceso de compostaje, se evaluaron los cuatro materiales mencionados en el apartado 2.1: residuos de jardín, hojarasca de algarrobo, ramillas de algarrobo y estiércol de ganado vacuno.

La evaluación consistió en la caracterización físico-química de estos materiales. Los indicadores considerados fueron: porcentaje de humedad, pH, porcentaje de nitrógeno total, cenizas, materia orgánica, carbono orgánico, fósforo total y relación carbono-nitrógeno. La información obtenida fue utilizada para definir la cantidad de cada material que sería incorporada a la pila de compostaje.

Para llevar a cabo la caracterización de los materiales, previamente se debía asegurar la adecuada textura de los mismos, por lo que fue necesario la preparación de cada uno de ellos antes de tomar la muestra que iba a ser sometida a los ensayos físico-químicos respectivos. Para el caso de los residuos de jardín se procedió a licuarlos, las ramillas de algarrobo se pulverizaron y la hojarasca de algarrobo junto con el estiércol de ganado vacuno se molieron, obteniendo las texturas adecuadas, tal como se pueden apreciar en las fotos 3.1 – 3.4.



**Foto 3.1.** Residuos de jardín licuados.



**Foto 3.2.** Ramillas de algarrobo pulverizadas.



**Foto 3.3.** Hojarasca de algarrobo molida.



**Foto 3.4.** Estiércol vacuno molido.

Los ensayos de caracterización físico-química se realizaron en dos fechas:

- La primera se realizó entre noviembre y diciembre de 2011. El objetivo principal de esta etapa de ensayos fue el adiestramiento y preparación en las diferentes técnicas de ensayo a aplicar durante el trabajo de investigación.
- La segunda se realizó entre febrero y marzo de 2012, y definió la composición físico-química inicial de los materiales a compostar.

Los métodos utilizados fueron los descritos en el apartado 2.9.1 (parámetros físico-químicos y métodos empleados para su medición). En las tablas 3.1 - 3.4 se presentan los resultados obtenidos en cada etapa de ensayo y para cada uno de los materiales.

**Tabla 3.1.** Resultados de los ensayos físico-químicos de los residuos de jardín.

| Fecha de ensayos | Parámetros  |      |                     |             |                      |                      |              |                   |
|------------------|-------------|------|---------------------|-------------|----------------------|----------------------|--------------|-------------------|
|                  | Humedad (%) | pH   | Nitrógeno total (%) | Cenizas (%) | Materia orgánica (%) | Carbono orgánico (%) | Relación C/N | Fósforo total (%) |
| 03/11/2011       | 18,8        | 6,76 | 2,38                | 41,10       | 58,89                | 34,24                | 14,38        | 0,19              |
| 03/02/2012       | 23,98       | 6,83 | 1,22                | 20,11       | 79,89                | 46,45                | 38,07        | -                 |

**Tabla 3.2.** Resultados de los análisis físico-químicos de las ramillas de algarrobo.

| Fecha de análisis | Parámetros  |      |                     |             |                      |                      |              |                   |
|-------------------|-------------|------|---------------------|-------------|----------------------|----------------------|--------------|-------------------|
|                   | Humedad (%) | pH   | Nitrógeno total (%) | Cenizas (%) | Materia orgánica (%) | Carbono orgánico (%) | Relación C/N | Fósforo total (%) |
| 10/11/2011        | 1,63        | 5,3  | 0,86                | 14,63       | 95,36                | 55,44                | 64,46        | 0,0039            |
| 15/02/2012        | 5,75        | 6,36 | 0,51                | 12,37       | 87,62                | 50,94                | 99,88        | -                 |

**Tabla 3.3.** Resultados de los análisis físico-químicos de la hojarasca de algarrobo.

| Fecha de análisis | Parámetros  |      |                     |             |                      |                      |              |                   |
|-------------------|-------------|------|---------------------|-------------|----------------------|----------------------|--------------|-------------------|
|                   | Humedad (%) | pH   | Nitrógeno total (%) | Cenizas (%) | Materia orgánica (%) | Carbono orgánico (%) | Relación C/N | Fósforo total (%) |
| 28/11/2011        | 6,44        | 5,90 | 2,26                | 41,83       | 58,16                | 33,81                | 15,02        | 0,023             |
| 23/02/2012        | 7,10        | 7,60 | 2,19                | 48,42       | 51,57                | 29,80                | 13,63        | -                 |

**Tabla 3.4.** Resultados de los análisis físico-químicos del estiércol de ganado vacuno.

| Fecha de análisis | Parámetros  |      |                     |             |                      |                      |              |                   |
|-------------------|-------------|------|---------------------|-------------|----------------------|----------------------|--------------|-------------------|
|                   | Humedad (%) | pH   | Nitrógeno total (%) | Cenizas (%) | Materia orgánica (%) | Carbono orgánico (%) | Relación C/N | Fósforo total (%) |
| 07/12/2011        | 11,76       | 8,59 | 1,93                | 44,82       | 55,16                | 32,06                | 16,6         | 0,22              |
| 02/03/2012        | 10,93       | 7,87 | 2,10                | 53,67       | 46,33                | 26,77                | 13,37        | -                 |

De los resultados obtenidos en los ensayos realizados en noviembre y diciembre de 2011, se puede observar mayor acidez en los residuos de jardín, ramillas de algarrobo y hojarasca de algarrobo. Todos estos materiales fueron obtenidos del campus UDEP y en las siguientes condiciones:

- Las muestras de materiales vegetales tomadas en el período (noviembre-diciembre), corresponden a un período de ausencia de lluvias.
- Los materiales analizados en el período noviembre – diciembre no eran frescos, pues habían sido acopiados varios días antes, por lo que habían estado expuestos al sol. Ello justifica la menor humedad registrada en los residuos vegetales, en relación a los analizados posteriormente.

- Las muestras tomadas en el período febrero - marzo de 2012 corresponden a un período de lluvias.
- Los materiales analizados en el período febrero - marzo de 2012 eran frescos, es decir, que las muestras se tomaron inmediatamente después de ser podado el jardín y los algarrobos.
- Para el caso del estiércol vacuno, ambos muestreos se realizaron de sacos almacenados con anterioridad a cada muestreo.
- Los materiales analizados en el primer muestreo (noviembre – diciembre 2011), no tuvieron pretratamiento; mientras que los correspondientes al segundo muestreo fueron modificados físicamente, es decir, los residuos de jardín fueron licuados (sin agregar agua), las ramillas fueron pulverizadas y el estiércol y la hojarasca se molieron, para mejorar la textura de los materiales.

Por lo que, la variación de los resultados en ambos muestreos puede ser asignada a estos factores, que indican claramente que las condiciones de las muestras de los materiales no fueron las mismas.

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados a los materiales en el periodo de febrero y marzo de 2012, donde hubo presencia de lluvias, indican:

- El pH de los cuatro materiales a compostar se encuentra en un rango de 6,36 y 7,87, es decir, no son materiales muy ácidos ni muy alcalinos. Esto favorece al proceso, ya que es conveniente que el compost como producto final debe mantenerse en un valor muy cercano a 7. En este periodo, el pH se tornó menos ácido respecto al primer análisis.
- Los residuos vegetales obtenidos en el campus UDEP presentan contenido de material orgánico mayor del 50%, por lo que sí pueden ser considerados materiales degradantes para obtener compost, tal como lo estipula el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Los residuos de jardín, la hojarasca de algarrobo y el estiércol de ganado vacuno, son los materiales que más aportan nitrógeno, mientras que las ramillas de algarrobo es el material que más aporta carbono, siendo estos resultados los que determinaron las proporciones de los materiales utilizados para el compostaje.
- Los resultados de la relación carbono/nitrógeno presente en los residuos de jardín, de hojarasca de algarrobo y de estiércol de ganado vacuno, son semejantes a los valores estimados que se mencionaron en la tabla 1.4 (contenido de C/N de algunos materiales orgánicos), considerando la hojarasca como hojas secas. Para el caso de ramillas de algarrobo, no se ha encontrado estándar alguno.

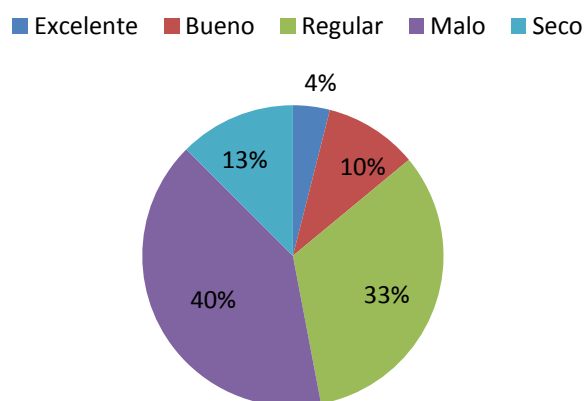
### **3.2. Resultados obtenidos de la actualización del inventario de árboles**

La actualización de inventario de árboles se realizó en las cuatro fases que dividen el bosque plantado de la Universidad de Piura y se utilizó la metodología descrita en el apartado 2.2.1, obteniéndose los resultados que se presentan en la **tabla 3.5**.

**Tabla 3.5.** Cantidad de árboles de algarrobo existentes en las cuatro fases.

| Fase                    | Clasificación |            |             |             |            |
|-------------------------|---------------|------------|-------------|-------------|------------|
|                         | Excelente     | Bueno      | Regular     | Malo        | Seco       |
| <b>1</b>                | 84            | 327        | 1371        | 878         | 320        |
| <b>2</b>                | 48            | 58         | 181         | 625         | 54         |
| <b>3</b>                | 64            | 121        | 137         | 222         | 200        |
| <b>4</b>                | 33            | 75         | 221         | 618         | 150        |
| <b>Total de árboles</b> | <b>229</b>    | <b>581</b> | <b>1910</b> | <b>2343</b> | <b>724</b> |

**Gráfico 3.1.** Cuadro estadístico de la actualización del inventario de árboles de algarrobo. (Periodo noviembre 2011 – enero 2012).



- Como se mencionó anteriormente, estas calificaciones no son permanentes, dado que la brotación de las copas de los árboles van cambiando según las condiciones climatológicas, es decir, en época de lluvias, que por lo general son de febrero a abril, el porcentaje de brotación presente en las copas va aumentando de manera significativa. El periodo en el que se llevó a cabo la actualización fue de noviembre a enero, es por ello que dichas calificaciones son válidas para este periodo, por lo que el objetivo principal de realizar esta actividad fue de cuantificar el total de árboles de algarrobo en las cuatro fases, existiendo 5063 árboles vivos (excelentes, buenos, regulares y malos) y 724 muertos (secos).

### 3.3. Resultados obtenidos de la biomasa generada en la Universidad de Piura

#### 3.3.1. Residuos de jardín

Para obtener un estimado de la cantidad de residuos de podas de jardín que el campus genera periódicamente, se utilizó el método descrito en el apartado 2.3.1 (método empleado para la obtención de la biomasa de podas de jardín), se consideraron cuatro zonas de áreas verdes (AV) donde se realizan las podas mensualmente, además la cancha de fútbol con la que cuenta la universidad, tal como se puede apreciar en la **figura 3.1**.



**Figura 3.1.** Lugares de muestreo en las áreas verdes del campus UDEP.

Los resultados obtenidos de los muestreos realizados en las zonas establecidas, se muestran en la **tabla 3.6**, la cantidad de residuos obtenidos en un área de  $0,25 \text{ m}^2$  se presentan tanto en base húmeda como en base seca. Se utilizó el método de la estufa para determinar el porcentaje de humedad que estos contienen.

**Tabla 3.6.** Resultados obtenidos de las podas en los jardines.

| Zona                   | Lugar de muestreo | Pesos (g) en base húmeda por área de $0,25 \text{ m}^2$ | Promedio (g) | Humedad (%) | Pesos (g) en base seca por área de $0,25 \text{ m}^2$ |
|------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------|--------------|-------------|-------------------------------------------------------|
| Edificio de Gobierno   | AV1               | 7,2                                                     | 7,8          | 59,5        | 3,2                                                   |
|                        |                   | 6,3                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 5,1                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 10,0                                                    |              |             |                                                       |
|                        |                   | 6,7                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 12,0                                                    |              |             |                                                       |
| Edificio de Educación  | AV2               | 2,4                                                     | 7,4          | 67,9        | 2,4                                                   |
|                        |                   | 3,2                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 1,5                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 4,7                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 1,6                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 3,6                                                     |              |             |                                                       |
| Edificio de Hidráulica | AV3               | 3,6                                                     | 13,0         | 66,7        | 4,3                                                   |
|                        |                   | 2,1                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 2,6                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 7,2                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 6,3                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 5,1                                                     |              |             |                                                       |
| Edificio Principal     | AV4               | 19,0                                                    | 9,8          | 65,42       | 3,3                                                   |
|                        |                   | 6,7                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 12,0                                                    |              |             |                                                       |
|                        |                   | 2,4                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 3,2                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 15,0                                                    |              |             |                                                       |
|                        |                   | 4,7                                                     |              |             |                                                       |
|                        |                   | 16,0                                                    |              |             |                                                       |

Para el caso de las muestras tomadas en la cancha de fútbol, se podaron tres áreas rectangulares en distintos lugares, con dimensiones de 70 m de largo por 1,7 m de ancho, considerando que el césped es podado una vez por semana, la cantidad de residuos obtenidos en un área de 119 m<sup>2</sup> se presentan tanto en base húmeda como en base seca, tal como se muestra en la **tabla 3.7**.

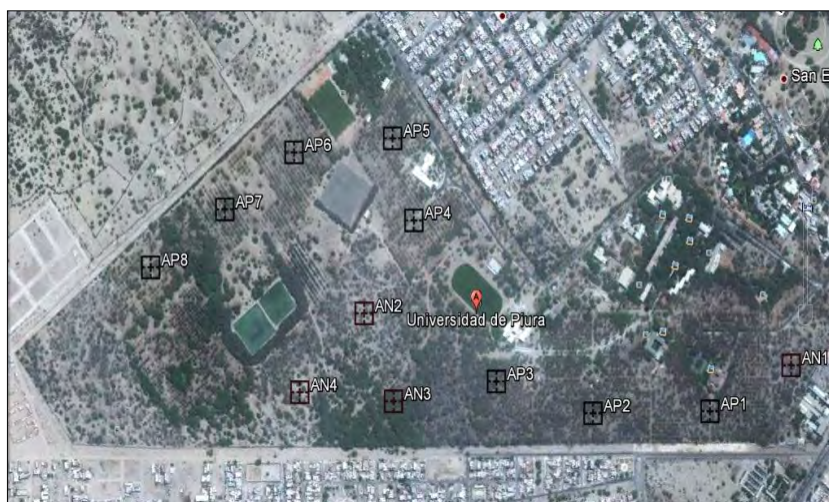
**Tabla 3.7.** Resultados obtenidos de la poda en la cancha de fútbol (UDEP).

| Zona             | Lugar de muestreo | Pesos (kg) en base húmeda por área de 119 m <sup>2</sup> | Promedio (kg) | Humedad (%) | Peso (kg) en base seca por área de 119 m <sup>2</sup> |
|------------------|-------------------|----------------------------------------------------------|---------------|-------------|-------------------------------------------------------|
| Cancha de fútbol | AV5               | 2,4                                                      | 2,5           | 58,93       | 1,02                                                  |
|                  |                   | 2,7                                                      |               |             |                                                       |
|                  |                   | 2,5                                                      |               |             |                                                       |

- Para el caso de las cuatro zonas donde se tomaron las muestras, el resultado promedio en base húmeda es de 0,0095 kg (0,0033 kg en base seca) contenida en un área de 0,25 m<sup>2</sup>, tomando en cuenta que estas cantidades se obtienen mensualmente y extrapolando este resultado con las cinco hectáreas de áreas verdes con la que cuenta el campus aproximadamente, se estima que la universidad puede generar 1900 kg/mes de residuos de jardín en base húmeda (660 kg/mes en base seca).
- Para el caso del área de césped con la que cuenta la cancha de fútbol, que es aproximadamente una hectárea, se estima que puede generar 840 kg/mes de césped en base húmeda (345 kg/mes en base seca).
- En total, se puede estimar que mensualmente se generan 2740 kg de residuos de jardín en base húmeda, en toda el área verde del campus de la Universidad de Piura.

### 3.3.2. Hojarasca de algarrobo

Para obtener un estimado de la cantidad de hojarasca de algarrobo que el bosque genera, se utilizó el método descrito en el apartado 2.3.2 (método empleado para la obtención de la biomasa de la hojarasca de algarrobo), considerando el área de árboles plantados (AP) y el área de árboles naturales (AN). En la primera, se seleccionaron ocho puntos de muestreo que estuvieron distribuidos en las cuatro fases, mientras que en la segunda área, se seleccionaron cuatro puntos de muestreo, tal como se muestra en la **figura 3.4**. En total fueron doce puntos, tomando tres muestras en cada uno de ellos.



**Figura 3.2.** Lugares de muestreo en el bosque de algarrobo.

Los resultados obtenidos de los muestreos realizados en el bosque se presentan en la **tabla 3.8**. La cantidad de hojarasca obtenida en un área de  $0,25 \text{ m}^2$  se presenta tanto en base húmeda como en base seca, utilizando el método de la estufa para determinar el porcentaje de humedad que puedan tener.

**Tabla 3.8.** Resultados obtenidos de la hojarasca de algarrobo.

| Área                           | Lugares de muestreo | Fase del bosque | Pesos (g) en base húmeda por área de $0,25 \text{ m}^2$ |     |     | Promedio (g) | Humedad (%) | Pesos (g) en base seca por área de $0,25 \text{ m}^2$ |
|--------------------------------|---------------------|-----------------|---------------------------------------------------------|-----|-----|--------------|-------------|-------------------------------------------------------|
| Área de árboles plantados (AP) | AP1                 | Fase 1          | 320                                                     | 190 | 90  | 200          | 0,44        | 190                                                   |
|                                | AP2                 | Fase 1          | 110                                                     | 130 | 190 | 140          | 0,14        | 130                                                   |
|                                | AP3                 | Fase 1          | 210                                                     | 270 | 350 | 270          | 0,27        | 260                                                   |
|                                | AP4                 | Fase 2          | 80                                                      | 170 | 50  | 100          | 0,35        | 90                                                    |
|                                | AP5                 | Fase 2          | 140                                                     | 90  | 130 | 120          | 0,52        | 110                                                   |
|                                | AP6                 | Fase 4          | 270                                                     | 120 | 170 | 180          | 0,18        | 170                                                   |
|                                | AP7                 | Fase 4          | 130                                                     | 300 | 50  | 160          | 0,33        | 150                                                   |
|                                | AP8                 | Fase 3          | 140                                                     | 270 | 220 | 210          | 0,21        | 200                                                   |
| Área de árboles naturales (AN) | AN1                 | -               | 90                                                      | 140 | 190 | 140          | 0,14        | 130                                                   |
|                                | AN2                 | -               | 250                                                     | 260 | 150 | 220          | 0,22        | 210                                                   |
|                                | AN3                 | -               | 130                                                     | 100 | 220 | 150          | 0,56        | 140                                                   |
|                                | AN4                 | -               | 60                                                      | 270 | 180 | 170          | 0,37        | 160                                                   |

- Se estableció tomar las muestras tanto en el área de árboles plantados como en la de naturales para obtener datos desde distintos puntos del bosque, de tal forma que los lugares de muestreo sean lo más representativos posible. El resultado promedio en base húmeda fue de  $0,17 \text{ kg}$  ( $0,16 \text{ kg}$  en base seca) contenida en un área de  $0,25 \text{ m}^2$ .

- Extrapolando estos resultados para las 100 hectáreas de bosque con que cuenta el campus aproximadamente, se estima que actualmente la universidad posee en su bosque, 68 000 kg de hojarasca de algarrobo en base húmeda.

### 3.3.3. Ramillas de algarrobo

Para obtener un estimado de la cantidad de ramillas de algarrobo que el bosque de la universidad genera, se utilizó el método descrito en el apartado 2.3.3 (método empleado para la obtención de la biomasa de las ramillas). Para esto se seleccionaron como muestra 50 árboles de algarrobo para su respectivo podado, los cuales se encuentran distribuidos en distintas áreas de las cuatro fases.

Los resultados obtenidos en la cuantificación de la cantidad de ramas y ramillas obtenidas durante la poda de cada árbol se presentan en las tablas **3.9 – 3.11**. Al momento de pesar las ramas generadas durante la poda se separaron según su diámetro:

- Ramas gruesas: aquellas de 5 cm a más.
- Ramas delgadas: entre 3 cm y menos de 5 cm.
- Ramas finas: entre 1 cm y menos de 3 cm.
- Ramillas: diámetros menores a 1 cm.

**Tabla 3.9.** Resultados obtenidos de la Fase 1.

| Árbol | Ramas gruesas |                    |           | Ramas delgadas |                    |           | Ramas finas |                    |           | Ramillas  | Peso total (kg) |
|-------|---------------|--------------------|-----------|----------------|--------------------|-----------|-------------|--------------------|-----------|-----------|-----------------|
|       | Nº de ramas   | Largo promedio (m) | Peso (kg) | Nº de ramas    | Largo promedio (m) | Peso (kg) | Nº de ramas | Largo promedio (m) | Peso (kg) | Peso (kg) |                 |
| 1     | 3             | 1,30               | 11,5      | 4              | 1,29               | 6,5       | 23          | 1,16               | 19,0      | 8,5       | 45,5            |
| 2     | 1             | 1,68               | 4,0       | 1              | 1,55               | 2,0       | 4           | 1,61               | 2,0       | 4,5       | 12,5            |
| 3     | 1             | 0,98               | 1,5       | 5              | 0,96               | 7,5       | 8           | 0,96               | 2,5       | 5,5       | 17,0            |
| 4     | 4             | 1,85               | 16,0      | 4              | 1,67               | 6,0       | 10          | 1,33               | 6,0       | 7,5       | 35,5            |
| 5     | -             | -                  | -         | 7              | 1,68               | 16,5      | 5           | 1,30               | 3,0       | 5,0       | 24,5            |
| 6     | 4             | 1,42               | 16,5      | 10             | 1,65               | 18,5      | 9           | 1,39               | 8,0       | 17,0      | 60,0            |
| 7     | 5             | 1,62               | 19,0      | 8              | 1,47               | 14,5      | 31          | 1,34               | 14,0      | 3,5       | 51,0            |
| 8     | -             | -                  | -         | 3              | 1,79               | 11,0      | 6           | 1,18               | 2,5       | 4,0       | 17,5            |
| 9     | -             | -                  | -         | 2              | 0,98               | 3,0       | 2           | 1,24               | 1,0       | 8,0       | 12,0            |
| 10    | 5             | 1,76               | 21,0      | 9              | 1,58               | 13,5      | 16          | 1,52               | 7,0       | 9,5       | 51,0            |
| 11    | 1             | 1,50               | 2,5       | 3              | 1,69               | 4,5       | 2           | 1,35               | 2,0       | 12,0      | 21,0            |
| 12    | 2             | 1,47               | 6,5       | 2              | 1,62               | 3,5       | 2           | 1,47               | 3,0       | 5,5       | 16,5            |

**Tabla 3.10.** Resultados obtenidos de la Fase 2.

| Árbol | Ramas gruesas |                    |           | Ramas delgadas |                    |           | Ramas finas |                    |           | Ramillas  | Peso total (kg) |
|-------|---------------|--------------------|-----------|----------------|--------------------|-----------|-------------|--------------------|-----------|-----------|-----------------|
|       | Nº de ramas   | Largo promedio (m) | Peso (kg) | Nº de ramas    | Largo promedio (m) | Peso (kg) | Nº de ramas | Largo promedio (m) | Peso (kg) | Peso (kg) |                 |
| 13    | -             | -                  | -         | -              | -                  | -         | -           | -                  | -         | 3,5       | 3,5             |
| 14    | 1             | 1,38               | 5,5       | -              | -                  | -         | 1           | 2,40               | 4,0       | 9,0       | 18,5            |
| 15    | -             | -                  | -         | 1              | 2,20               | 4,0       | -           | -                  | -         | 9,0       | 13,0            |
| 16    | -             | -                  | -         | -              | -                  | -         | -           | -                  | -         | 6,0       | 6,0             |
| 17    | 2             | 1,30               | 8,5       | 3              | 1,46               | 5,0       | 2           | 1,38               | 3,0       | 9,0       | 25,5            |
| 18    | 2             | 1,31               | 13        | 4              | 1,71               | 6,5       | 2           | 1,98               | 5,0       | 12,0      | 36,5            |
| 19    | 2             | 1,64               | 14        | 5              | 1,43               | 7,0       | -           | -                  | -         | 10,5      | 31,5            |
| 20    | -             | -                  | -         | -              | -                  | -         | -           | -                  | -         | 13,0      | 13,0            |
| 21    | -             | -                  | -         | -              | -                  | -         | -           | -                  | -         | 5,0       | 5,0             |
| 22    | 1             | 1,36               | 3         | 3              | 1,44               | 2,5       | -           | -                  | -         | 6,5       | 12,0            |
| 23    | 3             | 1,87               | 18        | 4              | 1,51               | 11,0      | 1           | 1,42               | 2,0       | 10,0      | 41,0            |
| 24    | -             | -                  | -         | -              | -                  | -         | -           | -                  | -         | 7,0       | 7,0             |
| 25    | 4             | 1,96               | 16        | 5              | 1,68               | 14,0      | 1           | 1,32               | 1,5       | 9,0       | 40,5            |
| 26    | -             | -                  | -         | 1              | 1,26               | 2,5       | -           | -                  | -         | 6,0       | 8,5             |
| 27    | 6             | 1,89               | 16        | 4              | 1,46               | 8,5       | 2           | 1,78               | 4,0       | 6,0       | 32,5            |
| 28    | -             | -                  | -         | 2              | 1,47               | 4,5       | -           | -                  | -         | 8,0       | 12,5            |
| 29    | -             | -                  | -         | 2              | 1,51               | 4,5       | -           | -                  | -         | 5,0       | 9,5             |
| 30    | -             | -                  | -         | -              | -                  | -         | -           | -                  | -         | 3,5       | 3,5             |
| 31    | -             | -                  | -         | -              | -                  | -         | -           | -                  | -         | 6,0       | 6,0             |
| 32    | 7             | 1,96               | 22        | 6              | 1,97               | 14,0      | 9           | 1,86               | 10,0      | 10,0      | 51,0            |

**Tabla 3.11.** Resultados obtenidos de la Fase 4.

| Árbol | Ramas gruesas |                    |           | Ramas delgadas |                    |           | Ramas finas |                    |           | Ramillas  | Peso total (kg) |
|-------|---------------|--------------------|-----------|----------------|--------------------|-----------|-------------|--------------------|-----------|-----------|-----------------|
|       | N° de ramas   | Largo promedio (m) | Peso (kg) | N° de ramas    | Largo promedio (m) | Peso (kg) | N° de ramas | Largo promedio (m) | Peso (kg) | Peso (kg) |                 |
| 33    | 3             | 1,52               | 9         | 3              | 1,33               | 3,5       | 4           | 1,10               | 2,0       | 11,0      | 25,5            |
| 34    | 1             | 1,81               | 5         | 2              | 1,50               | 3,5       | 4           | 1,50               | 2,5       | 7,5       | 16,0            |
| 35    | -             | -                  | -         | 1              | 1,10               | 1,5       | -           | -                  | -         | 8,0       | 10,5            |
| 36    | 2             | 1,72               | 9         | 1              | 1,78               | 1,0       | -           | -                  | -         | 6,5       | 16,5            |
| 37    | 3             | 1,98               | 17        | 5              | 1,39               | 8,5       | 5           | 1,61               | 3,0       | 9,0       | 28,0            |
| 38    | -             | -                  | -         | -              | -                  | -         | -           | -                  | -         | 8,0       | 8,0             |
| 39    | -             | -                  | -         | -              | -                  | -         | -           | -                  | -         | 12,0      | 12,0            |
| 40    | -             | -                  | -         | -              | -                  | -         | -           | -                  | -         | 9,5       | 9,5             |
| 41    | 2             | 1,59               | 7         | 3              | 1,30               | 3,5       | -           | -                  | -         | 7,0       | 17,5            |
| 42    | 2             | 1,50               | 12        | 5              | 1,25               | 6,0       | 4           | 1,41               | 4,0       | 13,0      | 35,0            |
| 43    | 2             | 1,60               | 9         | 3              | 1,62               | 6,0       | -           | -                  | -         | 9,0       | 24 ,0           |
| 44    | 2             | 1,40               | 7         | 4              | 1,60               | 6,0       | -           | -                  | -         | 10,0      | 23,0            |
| 45    | 3             | 1,72               | 25        | 5              | 1,45               | 12,0      | -           | -                  | -         | 8,0       | 45,0            |
| 46    | 3             | 0,92               | 17        | 3              | 1,68               | 7,0       | -           | -                  | -         | 18,0      | 39,0            |
| 47    | 2             | 1,80               | 11        | 3              | 1,40               | 4,5       | -           | -                  | -         | 13,0      | 28,5            |
| 48    | 3             | 1,72               | 12        | 5              | 1,39               | 5,5       | -           | -                  | -         | 8,0       | 25,5            |
| 49    | 9             | 1,73               | 34        | 12             | 1,94               | 21,0      | 5           | 1,61               | 6,0       | 15,0      | 76,0            |
| 50    | 2             | 1,63               | 14        | 3              | 1,35               | 4,0       | -           | -                  | -         | 9,0       | 27,0            |

Utilizando el método de la estufa se determinó el porcentaje de humedad promedio que contiene tanto las ramas como las ramillas. En la **tabla 3.12** se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 3.12.** Porcentaje de humedad promedio en las ramas y ramillas de algarrobo.

|                    | Ramas gruesas | Ramas delgadas | Ramas finas | Ramillas |
|--------------------|---------------|----------------|-------------|----------|
| <b>Humedad (%)</b> | 6,38          | 5,78           | 5,2         | 2,3      |

- La poda realizada a cada árbol de algarrobo puede generar en promedio 8,2 kg de ramillas en base húmeda (8 kg en base seca). Considerando que esta limpieza se realiza en el área de árboles plantados, donde existen un total aproximado de 5 000 de ellos, tal como se puede apreciar en la tabla 3.5, se estima que la universidad puede generar aproximadamente 41 000 kg de ramillas al momento de realizar las podas, únicamente en los árboles que se encuentran en esta área.

### 3.4. Resultados obtenidos de la cantidad de compost en los cuatro tratamientos

Finalizado el proceso de compostaje, cuya duración fue de dos meses, se obtuvo en los cuatro tratamientos un compost con una textura suave y de fácil manejabilidad. Estas características fueron verificadas luego de realizar el último muestreo y posteriormente pesar los sacos para determinar la cantidad de compost en base húmeda obtenida. Ver fotos 3.5 – 3.6.



**Foto 3.5.** Toma de muestra del compost.



**Foto 3.6.** Textura final del compost.

Las cantidades de compost obtenidas luego del pesaje de los sacos correspondientes a cada tratamiento, se presentan en la **tabla 3.13**. Se determinó la humedad respectiva que tuvo el compost en cada tratamiento, para obtener el peso total en base seca, utilizando el método de la estufa.

**Tabla 3.13.** Pesos finales del compost obtenido (base húmeda y seca).

| Tratamientos                     | Peso total del compost húmedo (kg) | Humedad final del compost (%) | Peso total del compost seco (kg) |
|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| <b>Tratamiento 0</b><br>(Pila 1) | 149                                | 44,4                          | 82,84                            |
| <b>Tratamiento 1</b><br>(Pila 2) | 145                                | 39,94                         | 87,08                            |
| <b>Tratamiento 2</b><br>(Pila 3) | 135                                | 43,17                         | 76,72                            |
| <b>Tratamiento 3</b><br>(Pila 4) | 148                                | 41,36                         | 86,78                            |

Se procedió a pesar los residuos obtenidos del tamizado, constituido por las ramillas que no llegaron a degradarse en su totalidad en el tiempo de compostaje establecido. En la **tabla 3.14** se presentan los resultados obtenidos. Para el cálculo de los pesos de estas ramillas en base seca, se determinó el porcentaje de humedad que estas tenían en la etapa final del proceso, utilizando el método de la estufa.

**Tabla 3.14.** Pesos finales de las ramillas obtenidas en el tamizado (base húmeda y seca).

| Tratamientos                     | Peso total de ramillas húmedas (kg) | Humedad final de las ramillas (%) | Peso seco final de las ramillas (kg) |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Tratamiento 0</b><br>(Pila 1) | 66                                  | 33,33                             | 44                                   |
| <b>Tratamiento 1</b><br>(Pila 2) | 75                                  | 41,59                             | 43,8                                 |
| <b>Tratamiento 2</b><br>(Pila 3) | 73                                  | 50,97                             | 35,8                                 |
| <b>Tratamiento 3</b><br>(Pila 4) | 85                                  | 53,47                             | 39,5                                 |

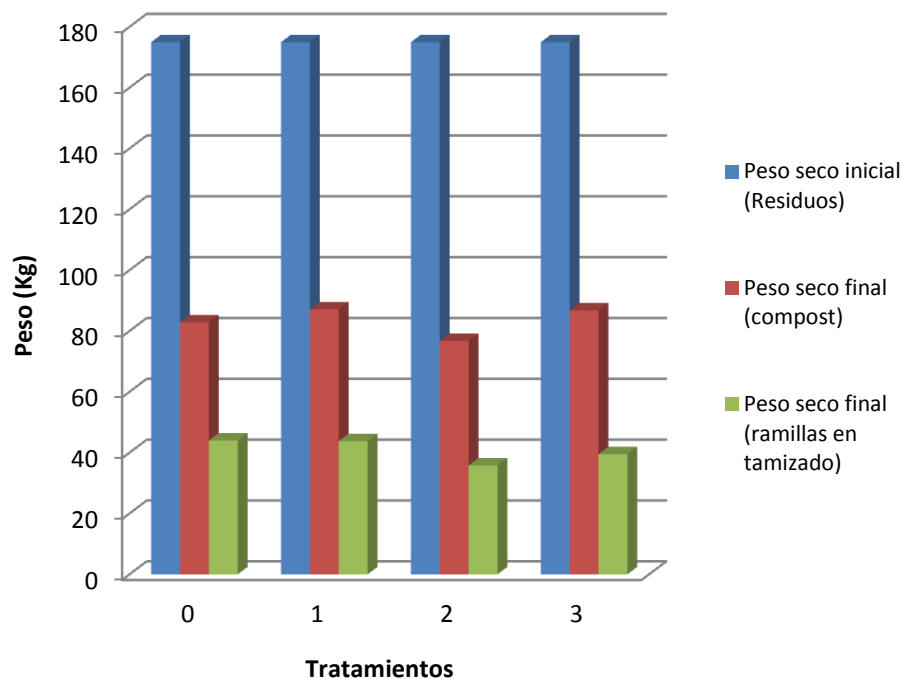
Para determinar la eficiencia de los cuatro tratamientos, es necesario contar con los pesos iniciales en base seca de los residuos que conformaron las pilas antes del inicio del proceso de compostaje. Desde un inicio cada pila debió contener un total de 200 kg de los cuatro residuos a compostar, para obtener los pesos en base seca de cada material, se contó con la determinación del porcentaje de humedad obtenido en los análisis realizados a estos materiales en el periodo febrero y marzo de 2012, tal como se pudieron apreciar anteriormente en las tablas 3.1 – 3.4. Las cantidades en base seca de cada material al inicio del proceso se muestran en la **tabla 3.15**.

**Tabla 3.15.** Cantidad inicial de material en la pila de compost (en base seca).

| Material                   | Peso (kg)     |
|----------------------------|---------------|
| Residuos de jardín         | 45,61         |
| Hojasca del algarrobo      | 37,16         |
| Ramillas de algarrobo      | 56,55         |
| Estiércol de ganado vacuno | 35,63         |
| <b>TOTAL</b>               | <b>174,95</b> |

A continuación se presenta en el **gráfico 3.2** la eficiencia de los cuatro tratamientos que se obtuvieron finalizado el proceso de compostaje. Los pesos se presentan en base seca.

**Gráfico 3.2.** Eficiencia de los tratamientos.



- El compost obtenido en las cuatro pilas muestran un color marrón oscuro, un olor agradable a tierra húmeda, no se logran distinguir los materiales inicialmente usados, no presentan materiales inertes y contienen una humedad sin saturación, tal como se puede apreciar en la foto 3.6.
- En la **tabla 3.16** se puede apreciar la cantidad de ramillas degradadas en el proceso de compostaje, expresadas en porcentajes, teniendo como resultado que el tratamiento 2 tuvo mayor eficiencia, habiendo mayor porcentaje de degradación de este material.

**Tabla 3.16.** Cantidad de ramillas degradadas en el proceso de compostaje.

| <b>Tratamientos</b>              | <b>Peso total de ramillas degradadas (base seca), kg</b> | <b>Porcentaje de ramillas degradadas (%)</b> |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Tratamiento 0</b><br>(Pila 1) | 12,55                                                    | 22,19                                        |
| <b>Tratamiento 1</b><br>(Pila 2) | 12,75                                                    | 22,54                                        |
| <b>Tratamiento 2</b><br>(Pila 3) | 20,75                                                    | 36,7                                         |
| <b>Tratamiento 3</b><br>(Pila 4) | 17,05                                                    | 30,17                                        |

- Para determinar la eficiencia en el compostaje se debe determinar la cantidad de residuos que no se degradaron durante el proceso, siendo para este caso, la cantidad de ramillas obtenidas en el tamizado (ver tabla 3.14), respecto a la cantidad inicial de material utilizado para el compostaje (ver tabla 3.15), es decir, mientras menos residuos se obtengan en el tamizado, la eficiencia del proceso de compostaje es más óptima. A continuación se presentan las eficiencias de los cuatro tratamientos utilizando las cantidades de los materiales en base seca.

- Tratamiento 0 (Pila 1):  $(174,95 - 44,0) / 174,95 \times 100 = 74,8\%$
- Tratamiento 1 (Pila 2):  $(174,95 - 43,8) / 174,95 \times 100 = 74,9\%$
- Tratamiento 2 (Pila 3):  $(174,95 - 35,8) / 174,95 \times 100 = 79,5\%$
- Tratamiento 3 (Pila 4):  $(174,95 - 39,5) / 174,95 \times 100 = 77,4\%$

Hay que tener en cuenta que mientras mayor sea el resultado, se debe considerar que el proceso es el mejor y por lo tanto más eficiente, para lograr degradar en mayor parte la materia orgánica en un tiempo de dos meses. El tratamiento 2 resultó ser el más eficiente, obteniendo el mayor resultado.

### **3.5. Resultados de los análisis físicos y químicos en las pilas de compostaje**

Los análisis realizados para determinar los parámetros físicos y químicos se llevaron a cabo tal cual se estableció en la tabla 2.3 (cronograma establecido para la toma de muestras), considerando que se realizaron cuatro muestreos durante los 54 días que duró todo el proceso de compostaje. A continuación se muestra en los gráficos **3.3 – 3.13** los resultados obtenidos de los análisis realizados, considerando que la temperatura se realizó de manera inter diaria y dos veces al día (mañana y tarde).

3.5.1. Temperatura

Gráfico 3.3. Medición de la temperatura en el tratamiento 0 (Pila 1).

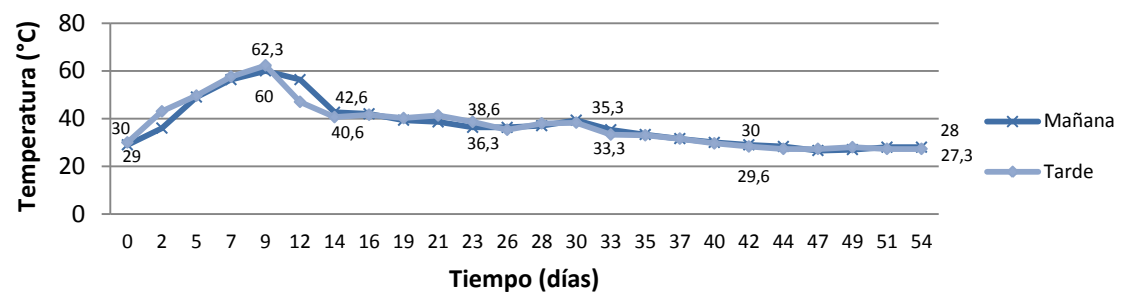


Gráfico 3.4. Medición de la temperatura en el tratamiento 1 (Pila 2).

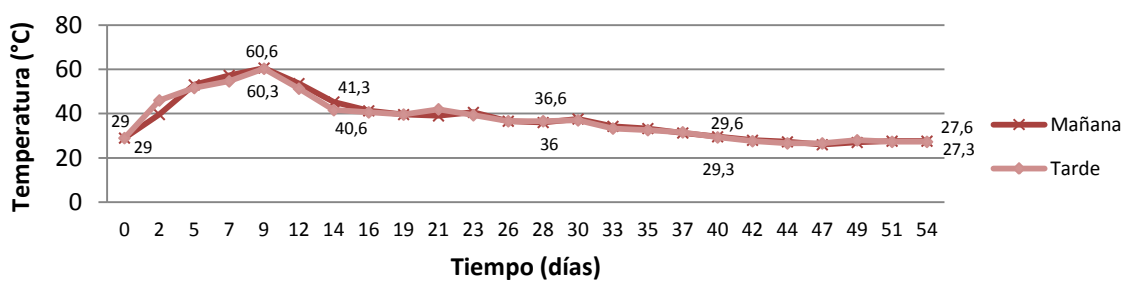


Gráfico 3.5. Medición de la temperatura en el tratamiento 2 (Pila 3).

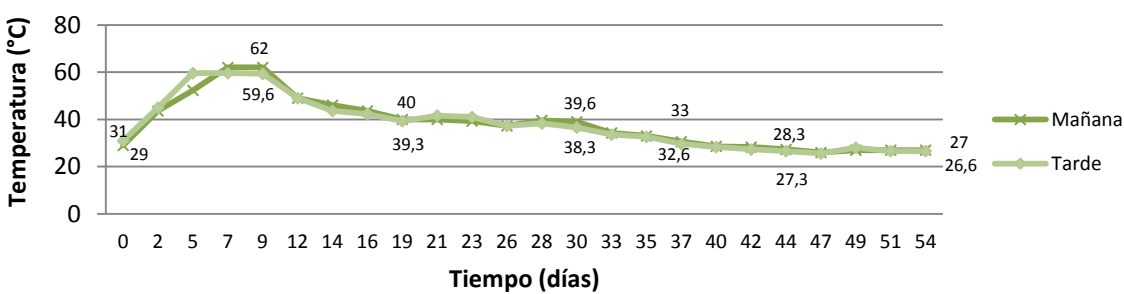
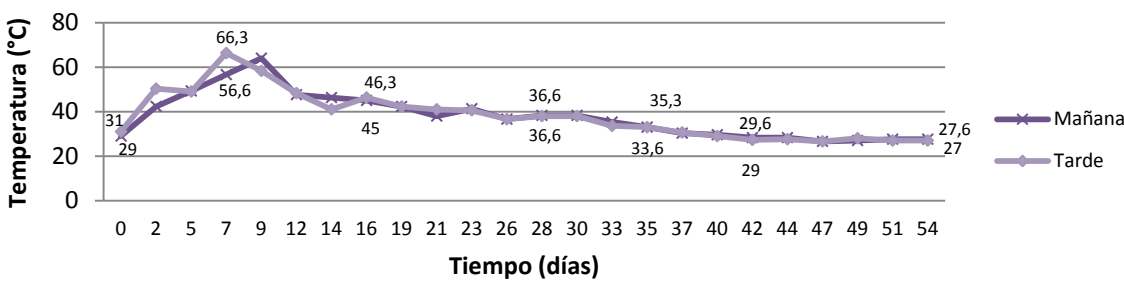
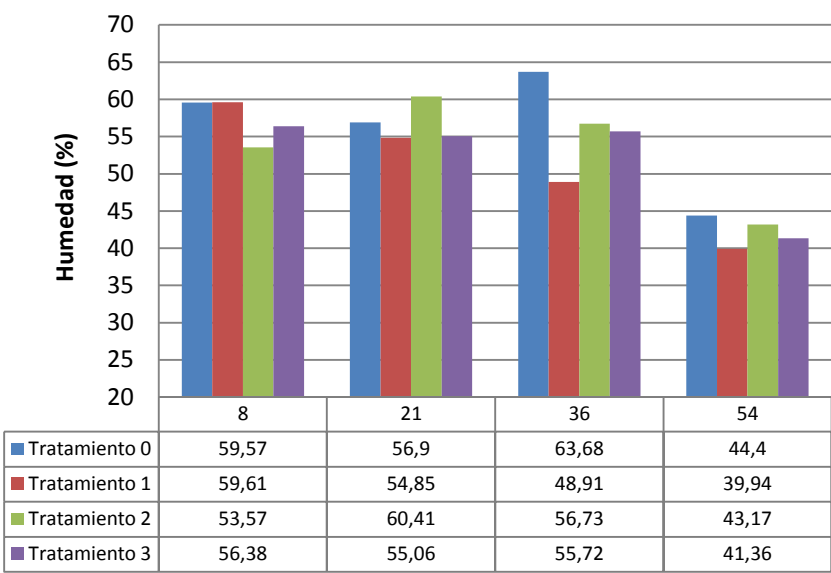


Gráfico 3.6. Medición de la temperatura en el tratamiento 3 (Pila 4).



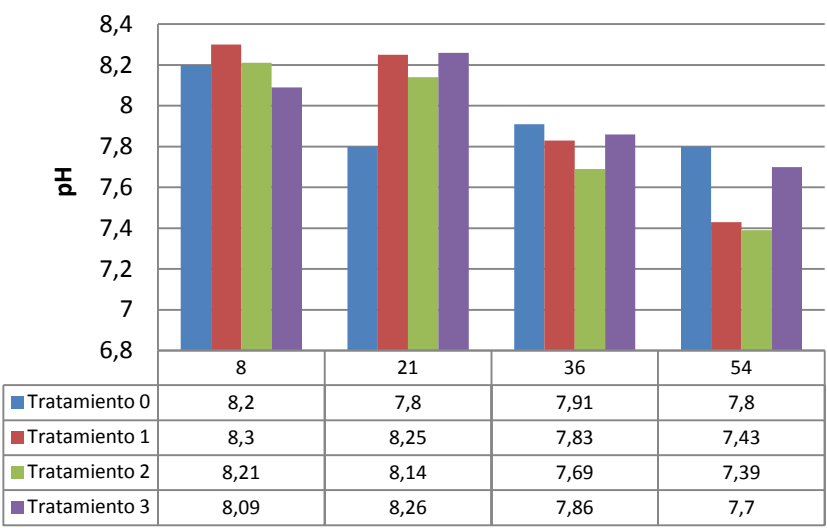
3.5.2. Humedad

Gráfico 3.7. Determinación de humedad.



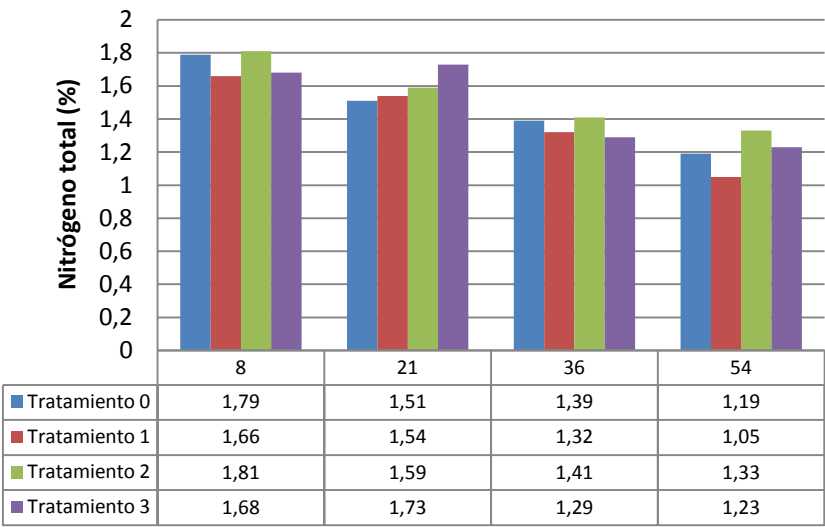
3.5.3. pH

Gráfico 3.8. Determinación de pH.



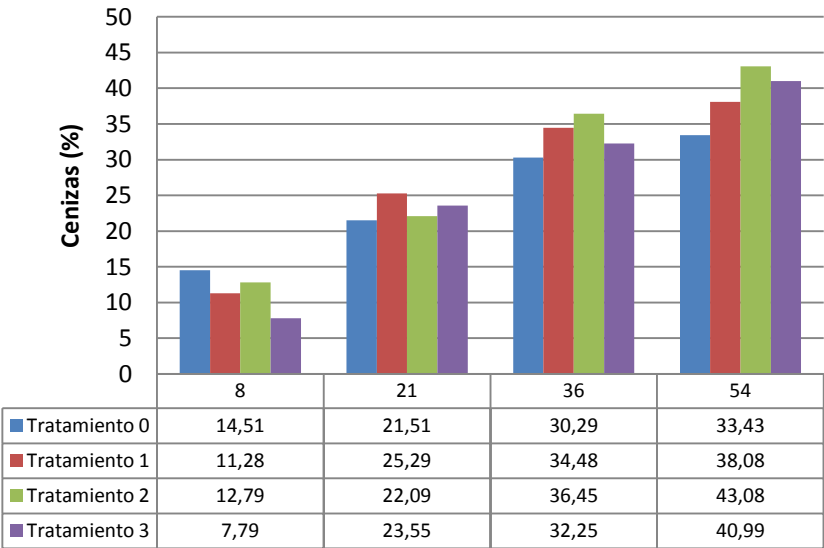
3.5.4. Nitrógeno total

Gráfico 3.9. Determinación de nitrógeno total.



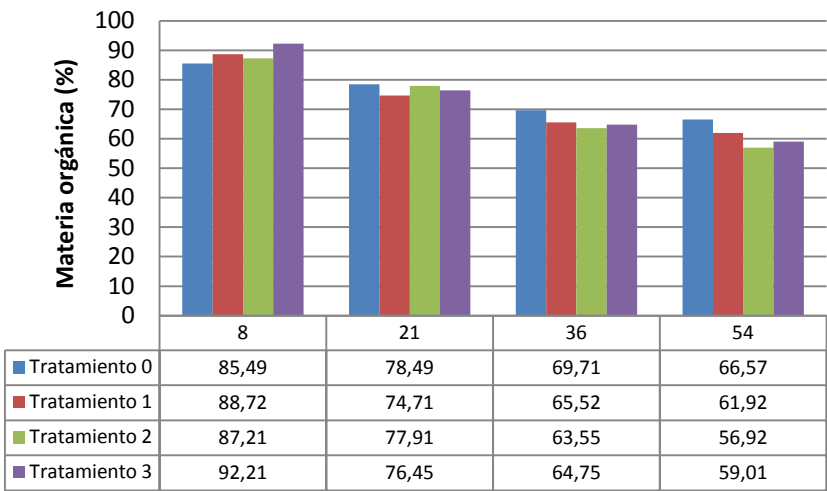
3.5.5. Cenizas

Gráfico 3.10. Determinación de cenizas.



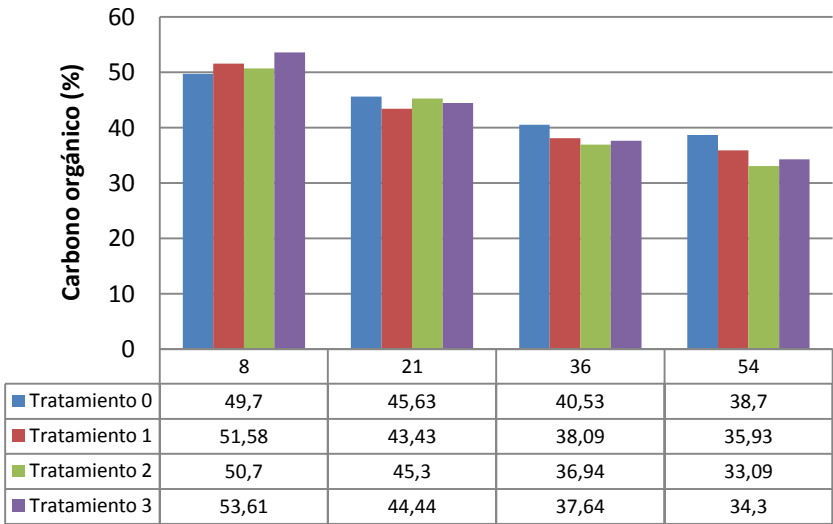
3.5.6. Materia orgánica

Gráfico 3.11. Determinación de materia orgánica.



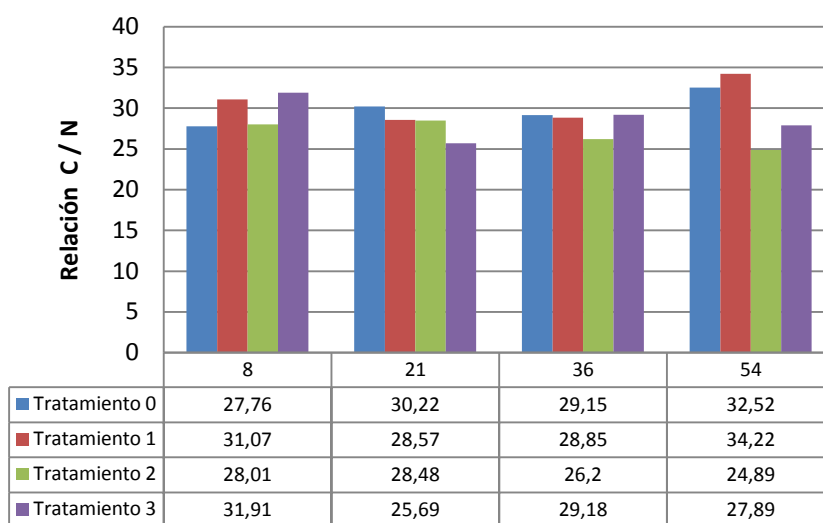
3.5.7. Carbono orgánico

Gráfico 3.12. Determinación de carbono orgánico.



### 3.5.8. Relación carbono/nitrógeno

**Gráfico 3.13.** Determinación de relación carbono/nitrógeno.



- La temperatura en los cuatro tratamientos tuvo el siguiente comportamiento respecto a las etapas del proceso de compostaje:
  - Desde el inicio del proceso hasta el día 4, se mantuvo una temperatura entre 29 °C y 42 °C, encontrándose en la etapa mesofílica;
  - Del día 5 al día 9, mantuvo una temperatura entre 45 °C y 66 °C encontrándose en la etapa termofílica;
  - Del día 10 al día 32, mantuvo una temperatura entre 58 °C y 38 °C encontrándose en la etapa de enfriamiento;
  - Del día 33 al día 54, mantuvo una temperatura entre 35 °C y 27 °C encontrándose finalmente en la etapa de maduración.
- La humedad en los cuatro tratamientos se mantuvo en condiciones ideales, es decir, entre 40% y 60%, con la finalidad de que no haya una saturación de agua ni reseque de los materiales que se utilizaron durante el proceso de compostaje.
- Como podemos apreciar en los resultados de los análisis del pH, a excepción del primer muestreo que tienen valores por encima de 8, han estado en los límites permisibles (6,5 y 8), por lo que nos garantiza que los microorganismos han estado trabajando en un medio cercano al neutro, teniendo el “tratamiento 2” un pH más cercano a 7 en la etapa final del proceso.
- En el transcurso de todo el proceso, los microorganismos utilizan el nitrógeno para la síntesis de proteínas, es conveniente que los materiales a compostar tengan cantidades considerables de este elemento, dado que si sucede lo contrario ocurriría un deficiente crecimiento microbiano aumentando el tiempo de degradación. Los resultados de los análisis que se realizaron, demuestran que los tratamientos 2 y 3 presentan una estabilización respecto al tiempo de este elemento en la etapa final del proceso, estableciendo que ya no existe un consumo de este elemento por parte de los microorganismos existentes.

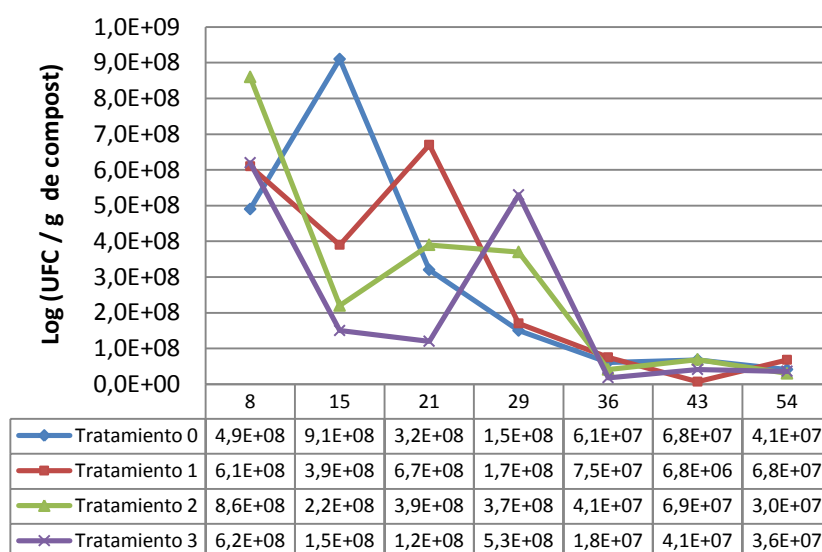
- El crecimiento microbiano y su función principal de degradar la materia orgánica presente en los materiales, se refleja en los resultados de los análisis, siendo el “tratamiento 2” quien presenta el más bajo porcentaje de materia orgánica (56%) en la etapa final del compost, esto demuestra que ha habido una mayor actividad microbiana, los límites permisibles de materia orgánica que el compost debe contener en su etapa final es entre 25% y 50%.
- La cantidad de carbono orgánico presente en la etapa final del compostaje nos confirma que ha habido una disminución de este elemento, debido a su consumo por parte de los microorganismos presentes en el proceso para obtener energía, siendo los tratamientos 1, 2 y 3 quienes presentan un mayor consumo respecto al tratamiento 0 (blanco), por lo que se puede establecer que existe una mayor población de microorganismos debido a la aplicación del EMA.
- La relación carbono/nitrógeno expresa las unidades de carbono por unidad de nitrógeno que contiene el material y sirve como un indicador del grado de avance del proceso, las condiciones óptimas en el que la relación C/N debe mantenerse en la etapa final del proceso es de 25:1 a 30:1, por lo que los resultados de los análisis realizados demuestran que el “tratamiento 3” ha estado dentro de los rangos permisibles, seguido del “tratamiento 2” que en su etapa final obtuvo un valor de 24,89 pudiendo ser considerado como aceptable por estar muy cercano al rango permisible.

### 3.6. Resultados de los análisis microbiológicos en las pilas de compostaje

Los análisis realizados para determinar los parámetros microbiológicos se llevaron a cabo según lo descrito en tabla 2.3. Se realizaron un total de siete muestreos durante los 54 días que duró todo el proceso de compostaje. A continuación se muestra en los gráficos 3.14 – 3.16 los resultados obtenidos de los análisis realizados.

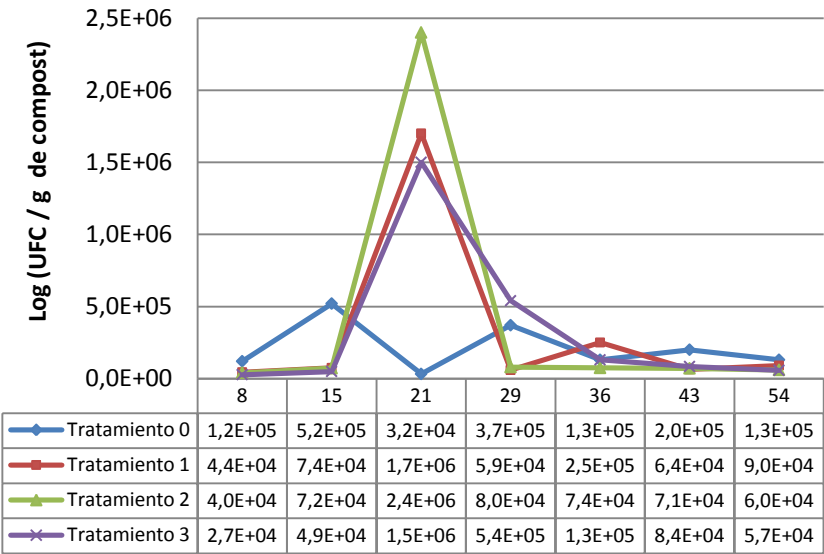
#### 3.6.1. Población total de bacterias

**Gráfico 3.14.** Determinación de la población total de bacterias.



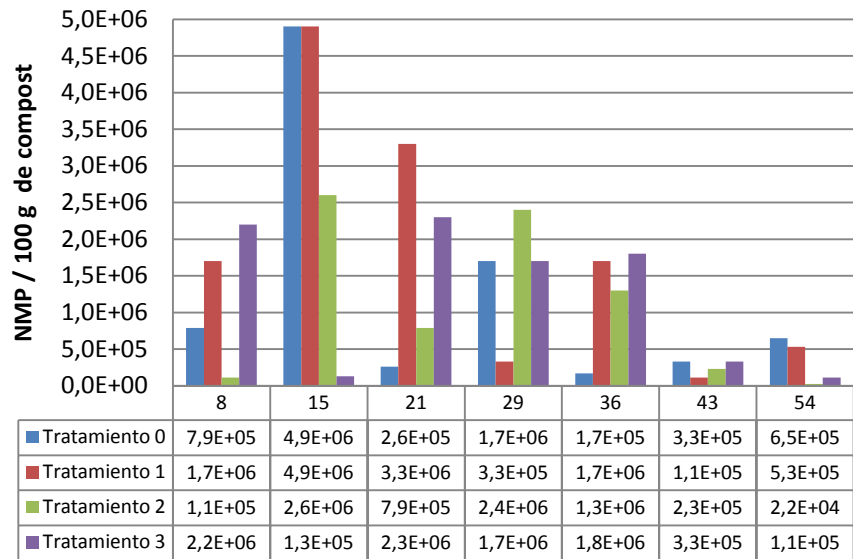
3.6.2. Población total de hongos

Gráfico 3.15. Determinación de la población total de hongos.



3.6.3. Microorganismos termotolerantes

Gráfico 3.16. Determinación de los microorganismos termotolerantes.



- La población total de bacterias y hongos en los tratamientos 1, 2 y 3 no tuvieron un comportamiento similar, debido a que a cada uno se les aplicó dosis distintas de microorganismos eficaces los cuales contienen bacterias y hongos, y por tanto, cada vez que se aplicaba este producto aumentaba la población de microorganismos, acelerando el proceso de degradación de la materia orgánica. Finalmente, fueron disminuyendo debido a que en la etapa final la temperatura fue decayendo hasta llegar a temperatura ambiente, y en la última semana del proceso no se regó, disminuyendo también la

humedad. En los cuatro tratamientos se obtuvieron cantidades de poblaciones totales considerables y permisibles para el uso del compost.

- Del ensayo de microorganismos termotolerantes realizado a los tratamientos se ha verificado que el contenido de estos microorganismos está presente en las cuatro pilas, siendo el “tratamiento 2” el único que está por debajo de los límites permisibles para un compost previo a su uso final en la aplicación de los suelos, según la EPA (Agencia de Protección Ambiental), la Norma 503, nos indica que el contenido de microorganismos termotolerantes en el compost debe ser menor a  $1 \times 10^5$  NMP/100 g de compost.
- De los resultados obtenidos del análisis de microorganismos termotolerantes, se puede observar que los tratamientos 0 y 1 no tienen una tendencia a disminuir, por lo que su cuantificación no logra tener una tendencia definida, en comparación con los tratamientos 2 y 3 que sí se observa una disminución progresiva, garantizando que estos microorganismos pueden ir disminuyendo hasta alcanzar el límite permisible en un tiempo más corto.

## Capítulo 4

### Diseño de una planta procesadora de compost en la Universidad de Piura

Este trabajo de investigación desarrolla una alternativa para mejorar el manejo actual de los residuos vegetales generados durante las actividades de mantenimiento del bosque y jardines de la Universidad de Piura, proponiendo el diseño de una planta procesadora de compost como una forma de aprovechamiento de estos residuos, que contribuiría a evitar su quema indebida, así como los impactos ambientales negativos generados como consecuencia de esta actividad.

A partir de los resultados obtenidos en cada uno de los cuatro tratamientos evaluados, se ha seleccionado el *tratamiento 2* como el mejor. Este tratamiento reportó las condiciones ideales para obtener un compost de buena calidad y garantiza que puede ser almacenado y aplicado a la tierra sin ocasionar efectos ambientales adversos. Se propone un sistema continuo de producción de compost, que aproveche toda la oferta de residuos de podas de jardín que se genera mensualmente y los residuos de hojarasca y ramillas de algarrobo generados en el bosque periódicamente.

Existen tres tipos de planta de producción de compost. Estas son:

- planta de operación manual,
- planta parcialmente mecanizada, y
- planta mecanizada.

El diseño propuesto se basa en el segundo sistema, que contará con maquinaria que realice las siguientes operaciones unitarias tales como: triturado, pesaje, volteo y tamizado. Este sistema permite reducir el número de operarios necesarios para llevar a cabo estas operaciones, junto con el tiempo que demande realizar el proceso de compostaje.

El sistema propuesto consiste en construir pilas de compost a mayor escala, considerando un tiempo de compostaje de dos meses, realizando volteos semanales, riegos diarios con excepción de la última semana del proceso, la aplicación de microorganismos eficaces para acelerar el proceso y evitar la presencia de insectos, y con unas condiciones ambientales similares a las aplicadas al *tratamiento 2* (pila 3).

#### **4.1. Diseño del proceso**

Se define como proceso, al conjunto de tareas u operaciones conectadas mediante un flujo de insumos e información, transformándolos en bienes o servicios útiles.<sup>31</sup> Es necesario representar el sistema operativo mediante un diagrama del flujo del proceso.

Para realizar el diseño de la planta procesadora de compost, es necesario tener conocimiento del proceso de producción que se llevará a cabo, es por ello que se describe a continuación las operaciones unitarias que conforman este proceso, que abarca desde la recepción de la materia prima (residuos vegetales y estiércol de ganado vacuno) hasta la obtención del producto final (compost) que será envasado en sacos para su almacenamiento y posterior uso.

##### **4.1.1. Recepción y almacenamiento de los materiales a compostar**

Esta tarea consiste en almacenar los sacos de estiércol vacuno obtenidos de los establos de la zona y recibir los residuos vegetales generados en el campus de la Udep, para posteriormente ser pesados y distribuir las cantidades requeridas a cada pila de compostaje que se formarán para llevar a cabo el proceso.

##### **4.1.2. Trituración**

Las ramillas de algarrobo que han sido recogidas en el campus son cortadas en partes más pequeñas utilizando una máquina trituradora, los otros materiales se incorporan a las composteras tal como se han recepcionado, es decir, sin reducirlos de tamaño, ya que se demostró que no es necesario que sean triturados para incorporarlos al proceso.

##### **4.1.3. Pesaje de los materiales a compostar**

Antes de la formación de las pilas de compostaje los materiales serán pesados hasta obtener la cantidad requerida de cada uno, los que serán colocados en capas posteriormente. Se utilizará una balanza de plataforma para llevar a cabo esta operación.

##### **4.1.4. Formación de las pilas de compost**

Las pilas de compost se formarán colocando los materiales por capas, haciendo un total de doce, la primera de residuos de jardín, seguida de hojarasca de algarrobo, luego una de ramillas trituradas y otra de estiércol, posteriormente se repetirá el mismo orden hasta completar las doce capas. Esta operación se realizará manualmente utilizando operarios que se encargarán de trasladar los sacos requeridos del almacén de materia prima hacia el área destinada para la construcción de las pilas.

##### **4.1.5. Riego**

La adición de agua se realizará manualmente, contando con un operario que se encargará de regar diariamente las pilas de compostaje, de tal forma que se suministre la cantidad de agua necesaria para evitar la resequedad del material o el exceso de agua. Se recomienda hacerlo de esta manera, ya que el mismo operario controlará la aplicación homogénea del agua a las pilas.

#### **4.1.6. Aplicación de microorganismos eficaces**

Se aplicará la solución de *EM-compost activado* durante cuatro semanas, a razón de una vez por semana, utilizando una mochila de fumigar con capacidad de 20 litros. Se aprovecharán los volteos para aplicarlo de manera homogénea en toda la pila de compostaje.

#### **4.1.7. Aireación**

La aireación de las pilas se consigue mediante operaciones de volteo que serán realizados una vez por semana utilizando una máquina aireadora – volteadora, que garantizará la adición de oxígeno en la pilas de compostaje.

#### **4.1.8. Secado**

Luego de siete semanas se deja de adicionar agua, dejando secar el compost una semana antes de realizar el tamizado. El volteo correspondiente a esta semana sí se realizará.

#### **4.1.9. Tamizado**

El tamizado se realizará una vez culminada la semana de secado, con la finalidad de separar los residuos que no llegaron a degradarse en su totalidad y del compost. Se utilizará una máquina vibro-tamizadora para realizar esta operación.

#### **4.1.10. Control de parámetros físico – químicos**

Una vez obtenido el compost, después del proceso de tamizado, se realizará la toma de muestras para el análisis de los siguientes parámetros físico-químicos: porcentaje de humedad, pH, nitrógeno total y carbono orgánico. Finalmente, se calculará la relación carbono/nitrógeno.

La temperatura se medirá tres veces por semana durante todo el proceso de compostaje, con la finalidad de controlar que no se eleve demasiado, dado que no es favorable para el proceso. Se utilizará un termómetro especial para compost.

#### **4.1.11. Envasado, pesaje y almacenamiento del producto terminado**

Una vez obtenido el compost tamizado, se envasa en sacos para luego ser pesados, utilizando una balanza de plataforma y finalmente trasladarlos al almacén de producto terminado. Los sacos deben contener 45 kg de compost. Es recomendable no sellarlos completamente. En caso de ser almacenados por largo tiempo, se deben dejar abiertos para que oxigenen y no generen malos olores.

#### **4.1.12. Diagrama de flujo del proceso**

El diagrama de flujo del proceso es una representación gráfica de la secuencia de las actividades dentro de un proceso. Describe todas las tareas involucradas, tales como: operaciones, transporte, inspección, demora y almacenaje, que se realizan sobre el producto o el servicio, teniendo un orden cronológico. A continuación se detalla el significado de cada uno.

- **Operaciones:** actividades realizadas en la elaboración de un producto o servicio, asignado comúnmente a una sola estación de trabajo.
- **Transporte:** movimiento del producto o cualquiera de sus partes de un lugar a otro en el proceso de producción.
- **Inspección:** actividad que se realiza para verificar que el producto pueda satisfacer los requerimientos mecánicos, dimensionales o de funcionamiento.
- **Demora:** actividad considerada cuando hay un almacenamiento temporal antes o después de una operación de producción.
- **Almacenaje:** tiempo que el producto o cualquiera de sus partes está en espera o inmóvil, se considera cuando las partes u objetos que formarán parte del producto son almacenados desde el inicio y/o cuando el producto terminado permanece en un depósito de almacenamiento durante uno o más días.
- **Operación e inspección:** verificación y supervisión durante las operaciones del proceso.

A continuación se muestra en la **tabla 4.1** la simbología de las actividades descritas anteriormente, para realizar el diseño del proceso de producción del compost, garantizando que tanto la interpretación como el análisis del diagrama se realicen de manera clara y precisa.

**Tabla 4.1.** Simbología de las actividades.

| Actividad              | Símbolo                                                                               |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Operación              |  |
| Transporte             |  |
| Inspección             |  |
| Demora                 |  |
| Almacenaje             |  |
| Operación e inspección |  |

A continuación se presenta el diseño propuesto del proceso de producción para la obtención de compost en la Universidad de Piura, representado por el siguiente diagrama de flujo.

|                 |                                             |
|-----------------|---------------------------------------------|
| <b>Trabajo</b>  | Diseño del proceso de producción de compost |
| <b>Analista</b> | Marcos A. Mendoza Juárez                    |
| <b>Método</b>   | Propuesto                                   |
| <b>Fecha</b>    | 01/08/2012                                  |

|                |                        |   |    |
|----------------|------------------------|---|----|
| <b>Resumen</b> | Operaciones            | ○ | 10 |
|                | Transporte             | ⇒ | 3  |
|                | Operación e inspección | ◻ | 1  |
|                | Inspección             | □ | 2  |
|                | Demora                 | D | 0  |
|                | Almacenaje             | ▽ | 2  |

| Actividad                               | Operación | Operación e inspección | Transporte | Inspección | Demora | Almacenaje | Observación                                                                                                             |
|-----------------------------------------|-----------|------------------------|------------|------------|--------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Recepción de la materia prima.          | ●         | ◻                      | ⇒          | □          | D      | ▽          | Se reciben los residuos vegetales y el estiércol de ganado vacuno.                                                      |
| Almacenaje de la materia prima.         | ○         | ◻                      | ⇒          | □          | D      | ▼          | Los materiales son almacenados en sacos en el área destinada para guardar la materia prima.                             |
| Envío a trituración.                    | ○         | ◻                      | ➡          | □          | D      | ▽          | Las ramillas de algarrobo son enviadas a la máquina trituradora.                                                        |
| Trituración.                            | ●         | ◻                      | ⇒          | □          | D      | ▽          | Las ramillas de algarrobo son cortadas en partes más pequeñas para luego ser incorporadas en el proceso de compostaje.  |
| Pesaje de la materia prima.             | ●         | ◻                      | ⇒          | □          | D      | ▽          | Se pesan las cantidades requeridas de los materiales para formar la pila de compostaje.                                 |
| Envío de la materia prima.              | ○         | ◻                      | ➡          | □          | D      | ▽          | Las cantidades requeridas de cada material son enviadas al área destinada para la formación de las pilas de compostaje. |
| Formación de las pilas de compostaje.   | ●         | ◻                      | ⇒          | □          | D      | ▽          | Las pilas son formadas incorporando inicialmente los materiales por capas.                                              |
| Riego a las pilas de compostaje.        | ○         | ■                      | ⇒          | □          | D      | ▽          | La adición de agua será diaria, controlando la humedad con la que cuenta la pila de compostaje.                         |
| Aplicación de microorganismos eficaces. | ●         | ◻                      | ⇒          | □          | D      | ▽          | La aplicación de EM-compost activado se realizará una vez por semana durante las cuatro primeras semanas.               |
| Medición de la temperatura.             | ○         | ◻                      | ⇒          | ■          | D      | ▽          | Se medirá la temperatura tres veces por semana controlando, que no aumente demasiado.                                   |
| Aireación a las pilas de compostaje.    | ●         | ◻                      | ⇒          | □          | D      | ▽          | Los volteos se realizarán una vez por semana durante todo el proceso de compostaje.                                     |
| Secado del compost.                     | ●         | ◻                      | ⇒          | □          | D      | ▽          | En la última semana del proceso se dejará de adicionar agua.                                                            |
| Tamizado del compost.                   | ●         | ◻                      | ⇒          | □          | D      | ▽          | Se cernirá el compost para separar los residuos que no lograron degradarse por completo.                                |
| Control de parámetros físico-químicos.  | ○         | ◻                      | ⇒          | ■          | D      | ▽          | Se tomarán muestras del compost para analizar la humedad final, pH, nitrógeno total, carbono orgánico y relación C/N.   |

|                                        |   |   |   |   |   |   |                                                                                                     |
|----------------------------------------|---|---|---|---|---|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Envasado del compost.                  | ● | ◻ | ⇒ | ◻ | ◐ | ▽ | El compost será envasado en sacos.                                                                  |
| Pesaje del compost.                    | ● | ◻ | ⇒ | ◻ | ◐ | ▽ | Se pesarán los sacos obteniendo 45 kg de compost en cada uno.                                       |
| Envío de los sacos de compost.         | ○ | ◻ | ⇒ | ◻ | ◐ | ▽ | Los sacos serán transportados al área de almacén de producto terminado.                             |
| Almacenamiento del producto terminado. | ○ | ◻ | ⇒ | ◻ | ◐ | ▼ | Los sacos de compost se almacenarán sin cerrarlos completamente, de tal forma que obtengan oxígeno. |

## 4.2. Hoja del proceso

Describe las principales variables y acciones que se llevan a cabo durante el tiempo que se realiza el proceso de compostaje y está organizado de manera secuencial, por lo que tiene como referencia el tiempo del proceso.<sup>32</sup> Para este caso, se considerarán las variables de medición de temperatura, frecuencia de riego y de aireación. Haciendo un seguimiento y control de estas tres variables se puede garantizar un proceso de producción de compost óptimo, garantizando así una buena calidad del compost como producto final.

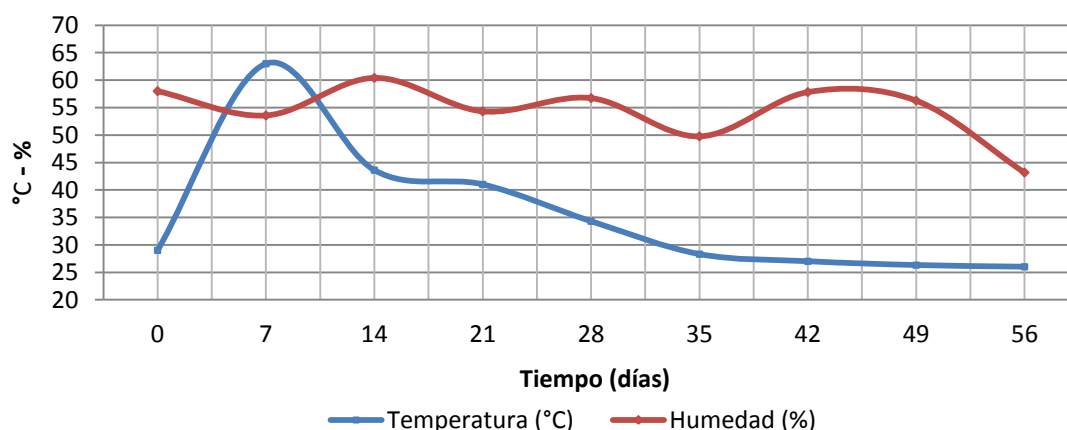
El **gráfico 4.1** muestra el comportamiento de la temperatura y la humedad a lo largo de todo el proceso de producción de compost y es útil para realizar un mejor seguimiento y control de estos parámetros. Ambos comportamientos han sido tomados como referencia del *Tratamiento 2* (pila 3).

Para mantener la humedad en un rango de 40% y 60% durante el proceso, se debe adicionar agua diariamente hasta el día 49, dejando de regar la última semana para el secado del compost.

Para mantener una buena oxigenación en la pila de compostaje se debe realizar los volteos cada semana, es decir, los días 7, 21, 28, 35, 42 y 49.

Respecto a la temperatura, ésta no debe de sobrepasar los 70 °C, si sucediese esto, se debe adicionar más agua y realizar un volteo para disminuirla, por lo que se recomienda medirla de manera inter diaria.

**Gráfico 4.1.** Comportamiento requerido de la temperatura y humedad.



### 4.3. Requerimiento de maquinaria

El principal criterio para seleccionar la maquinaria que se requiere está relacionado con la capacidad de cada máquina, en ton/h, para llevar a cabo las operaciones que forman parte del proceso de producción. A continuación se presentan las especificaciones técnicas de la maquinaria y equipos necesarios en el proceso de compostaje.

#### 4.3.1. Balanza de plataforma

Se necesita una balanza electrónica de plataforma, tal como se muestra en la **figura 4.1**, la cual será utilizada desde un inicio para pesar las cantidades de los materiales requeridos para la formación de las pilas de compostaje y para pesar el compost obtenido después del tamizado que será envasado en sacos de 45 kg cada uno.

A continuación se describen las características de la balanza de plataforma:

- **Marca:** Lexus electronic scales.
- **Modelo:** XTEEL-P-060.
- **Dimensiones:** Plataforma de 40 cm x 50 cm x 75 cm.
- **Capacidad:** 100 kg.



**Figura 4.1.** Balanza electrónica.

#### 4.3.2. Máquina trituradora

Para triturar las ramas de algarrobo se necesita una máquina que logre cortar estas ramas en trozos muy pequeños, para garantizar su degradación durante el proceso de compostaje.

Esta máquina se muestra en la **figura 4.2**, en las figuras **4.3** y **4.4** se observa la alimentación de las ramas en la trituradora.

A continuación se describe las características de la máquina trituradora:

- **Marca:** Honda.
- **Modelo:** Chipper Jo Beau M300.
- **Peso neto:** 120 kg.
- **Dimensiones:** 177 cm x 72 cm x 123 cm.
- **Capacidad:** 3 m<sup>3</sup>/h.
- **Diámetro máx. de rama:** 8 cm.



**Figura 4.2.** Máquina trituradora.



**Figura 4.3.** Trituración de las ramas.



**Figura 4.4.** Ramas trituradas.

#### 4.3.3. Máquina aireadora-volteadora

Se necesita una máquina como la que se muestra en la **figura 4.5**. Esta máquina realiza los volteos del material con la finalidad de adicionarle oxígeno a las pilas de compostaje, teniendo en cuenta que las pilas tendrán un ancho de 1,8 m y una altura de 1,05 m, entonces se requiere que la máquina tenga como mínimo estas dimensiones para lograr realizar un volteo eficiente y ejecutado en un tiempo muy corto. Si se realizara manualmente, o sea, utilizando trinchas, esto demandaría de mucho tiempo, dado que las pilas serán de mayores dimensiones.

A continuación se describe las características de la máquina volteadora:

- **Marca:** Compost Systems.
- **Modelo:** ST200.
- **Dimensiones:** 180 cm x 330 cm x 200 cm.
- **Capacidad:** 2625 m<sup>3</sup>/h.



**Figura 4.5.** Máquina aireadora.

#### 4.3.4. Máquina vibro-tamizador

Se necesita una máquina tamizadora como la mostrada en la **figura 4.6**. Esta máquina realiza la separación de los residuos que no se lograron degradar por completo y del compost, transportando estos materiales a sus respectivos depósitos.

Esta máquina cuenta con dos mallas de tamizado que son seleccionadas por el cliente de acuerdo a la abertura requerida, en nuestro caso particular, se considera la necesidad de una malla superior con una abertura de 30 mm y una malla inferior de 10 mm, tal como se trabajó en las pilas a pequeña escala.

A continuación se describe las características de la máquina vibro-tamizadora:

- **Marca:** Azlo.
- **Modelo:** JLT 00300.
- **Dimensiones:** 300 cm x 100 cm x 180 cm.
- **Capacidad:** 0,5 tn/h – 2 tn/h.



**Figura 4.6.** Máquina vibro-tamizadora.

#### 4.3.5. Mochila de fumigación

Se necesita una mochila de fumigación, tal como se muestra en la **figura 4.7** para la aplicación de los microorganismos eficaces semanalmente.

Este equipo se utilizará cuando se esté realizando el volteo de la pila de compostaje, para que su aplicación se realice de forma homogénea sobre el material compostado.

A continuación se describen las características de la mochila de fumigar:

- **Marca:** Jacto.
- **Peso neto:** 4,6 kg.
- **Caudal de la boquilla:** 615 ml/min.
- **Dimensiones:** 35 cm x 20 cm x 54 cm.
- **Capacidad:** 20 litros.



**Figura 4.7.** Mochila de fumigación.

#### 4.3.6. Termómetro para compost

Para el control frecuente de la temperatura en la pila de compostaje se requerirá de un termómetro especial para compost, tal como el mostrado en la **figura 4.8**, el cual pueda ser introducido en distintos puntos de la pila.

A continuación se describe las características del termómetro para compost:

- **Marca:** ComposTumbler.
- **Escala:** -10 °C a +90 °C.
- **Dimensiones:** 40 cm de largo.



**Figura 4.8.** Termómetro para compost.

#### 4.4. Oferta de materiales para el compostaje

Para diseñar las pilas de compostaje a mayor escala se ha tomado como referencia las proporciones que se utilizaron en las pilas que sirvieron de prueba en este trabajo de investigación, siendo 30% de residuos de jardín, 20% de hojarasca de algarrobo, 30% de ramillas de algarrobo previo triturado y 20% de estiércol de ganado vacuno.

Los residuos de jardín generados de las podas y limpiezas de las áreas verdes son obtenidos mensualmente, debido a que estas áreas deben de mantenerse limpias y el césped podado, de tal forma de brindar un ambiente agradable al campus universitario, por lo que las cantidades de los otros materiales están en función de éste, teniendo en cuenta las proporciones que deben formar las pilas de compostaje. En la **tabla 4.2** se muestran las cantidades requeridas.

**Tabla 4.2.** Cantidad de materiales requeridos al mes (pesos en base húmeda).

| Material                   | Proporción (%) | Cantidad (kg/mes) |
|----------------------------|----------------|-------------------|
| Residuos de jardín         | 30             | 2700              |
| Hojarasca de algarrobo     | 20             | 1800              |
| Ramillas de algarrobo      | 30             | 2700              |
| Estiércol de ganado vacuno | 20             | 1800              |
| <b>TOTAL</b>               | <b>100</b>     | <b>9000</b>       |

#### 4.5. Formación y dimensiones de las pilas de compostaje

Para compostar los 9000 kilogramos de residuos se ha planteado la formación de cinco composteras cada mes, de tal forma que todo el material sea procesado y se obtenga compost en un periodo de dos meses. Para formar una pila de compostaje se necesitan 1800 kg de material distribuidos en las siguientes cantidades:

- Residuos de jardín: 540 kg.
- Hojarasca de algarrobo: 360 kg.
- Ramillas de algarrobo: 540 kg.
- Estiércol de vacuno: 360 kg.

Estos materiales, en las cantidades indicadas, son incorporados por capas para la formación de cada pila de compostaje. En la **tabla 4.3** se indica el orden de colocación de las capas de materiales, la distribución de la cantidad de cada material y la altura aproximada de cada capa para obtener la altura total de la pila.

Al triturar las ramillas, éstas reducirán su tamaño considerablemente, y por lo tanto, al momento de colocarlas en capas se estima que su altura aproximada será de 10 cm.

**Tabla 4.3.** Distribución por capas de los materiales en una pila de compostaje.

| Nº de capa   | Material               | Cantidad (kg) | Altura (m)  |
|--------------|------------------------|---------------|-------------|
| 1            | Residuos de jardín     | 180           | 0,15        |
| 2            | Hojarasca de algarrobo | 120           | 0,07        |
| 3            | Ramillas de algarrobo  | 180           | 0,10        |
| 4            | Estiércol de vacuno    | 120           | 0,03        |
| 5            | Residuos de jardín     | 180           | 0,15        |
| 6            | Hojarasca de algarrobo | 120           | 0,07        |
| 7            | Ramillas de algarrobo  | 180           | 0,10        |
| 8            | Estiércol de vacuno    | 120           | 0,03        |
| 9            | Residuos de jardín     | 180           | 0,15        |
| 10           | Hojarasca de algarrobo | 120           | 0,07        |
| 11           | Ramillas de algarrobo  | 180           | 0,10        |
| 12           | Estiércol de vacuno    | 120           | 0,03        |
| <b>TOTAL</b> |                        | <b>1800</b>   | <b>1,05</b> |

Considerando que las dimensiones de las pilas de compost a pequeña escala fueron: 2,2 m de largo y 1,2 m de ancho y que la primera capa de residuos de césped que se colocó en la base fue de 30 kg, para determinar las dimensiones de las pilas a mayor escala, se ha establecido que el ancho debe ser de 1,8 metros, determinando el largo de la siguiente manera:

- Área de la base de la pila a pequeña escala =  $1,2 \text{ m} \times 2,2 \text{ m} = 2,64 \text{ m}^2$ .
- Cantidad de material agregado en el área = 30 kg de residuos de jardín.

Si la primera capa de residuos de jardín incorporado a la pila es de 180 kg, entonces por regla de tres simple se necesitará un área aproximada de  $16 \text{ m}^2$ . Si se ha considerado un ancho de 1,8 m; entonces tendrá un largo aproximado de 9 m.

En conclusión, la pila de compostaje tendrá las siguientes dimensiones:

- Largo: 9 m.
- Ancho: 1,8 m.
- Altura: 1,05 m.

#### 4.6. Estimación del compost obtenido al final del proceso

Para estimar la cantidad de compost que puede obtenerse al final del proceso se debe de establecer las salidas junto con las entradas en cada operación unitaria, haciendo un balance de materiales en las operaciones donde exista alguna pérdida o ganancia, ya sea en peso, volumen, humedad, transformación física, etc.

A continuación se estiman las entradas y salidas de las operaciones unitarias donde se generan algunas pérdidas o ganancias durante el proceso de compostaje.

##### • Triturado

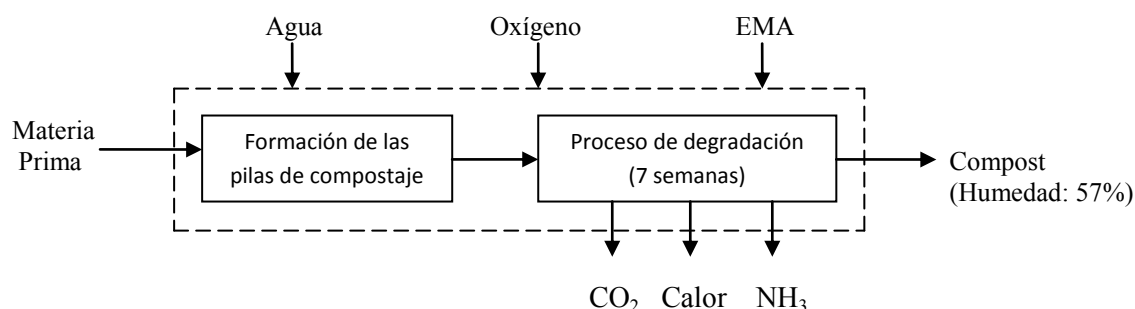
Esta operación unitaria transforma físicamente las ramillas que, previo a su compostaje, deben ser cortadas en piezas pequeñas, entre 1 cm y 3 cm de largo. Este material se caracteriza por tener un diámetro menor o igual a 1 cm.

Cuando se incorporó este material en las pilas a pequeña escala, se trocearon manualmente, obteniendo ramillas entre 6 cm y 13 cm de largo. Con estas características se obtuvo un 36,7% de ramillas degradadas en el *tratamiento 2*. Con la máquina trituradora propuesta para esta operación, se estima que las ramillas después del triturado, obtengan entre 1 cm y 3 cm de largo, tal como se observa en la figura 4.4. Esta operación contribuye a mejorar el contacto con los microorganismos biodegradantes, y como consecuencia un mayor porcentaje de ramillas degradadas durante el proceso.

Se puede considerar que al ser procesadas en esta operación, la cantidad que entra inicialmente será igual a la cantidad que sale, habiendo solo un cambio físico por la reducción de las dimensiones de este material, no ocasionando pérdidas en peso.

##### • Formación de las pilas y proceso de degradación

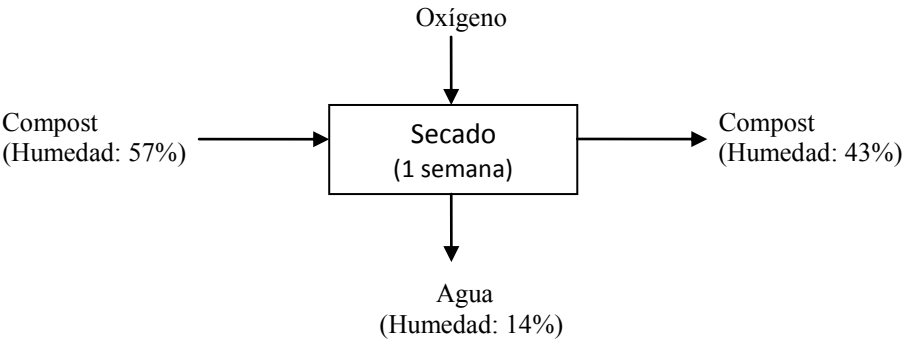
Se ha considerado la formación de las pilas junto con el proceso de degradación como una sola operación unitaria, dado que la segunda es realizada por los microorganismos presentes en la pila de compostaje, no dependiendo de un operador. Es por ello, que se presenta a continuación los elementos que son adicionados manualmente y los que son expulsados al medio ambiente.



La materia prima está compuesta por los cuatro materiales utilizados para el compostaje, siendo un total de 9000 kg (en base húmeda) que entra a esta operación. Pasada las siete semanas, se obtiene un compost con una humedad entre 55% y 60%, según el Gráfico 4.1 mostrado anteriormente (comportamiento requerido de la temperatura y humedad).

• **Secado**

En esta operación unitaria la humedad puede descender hasta 40% (según el Gráfico 4.1), considerando que el compost alcanzó un 43% de humedad como en el tratamiento 2. El volteo correspondiente a esta semana sí se lleva a cabo, de tal forma de seguirle suministrando oxígeno a la pila de compostaje.



• **Tamizado**

En esta operación unitaria se obtienen tanto el compost como los residuos que no lograron degradarse por completo, pudiendo ser algunas ramillas, dado que este material es el más complejo para su degradación por su tamaño y dureza.

Considerando que después del triturado las ramillas disminuyen considerablemente su tamaño, se puede estimar que un 90% de este material sí logra degradarse, por lo que un 10% es la merma que generaría esta operación.

Para estimar la cantidad de compost obtenido al final de la operación de tamizado es necesario utilizar los resultados que se obtuvieron del *tratamiento 2* (pila 3), siendo los que se muestran en la **tabla 4.4** para tomarlo como referencia y a partir de estos resultados hacer un estimado de la cantidad de compost que se logra obtener culminado el proceso de producción.

**Tabla 4.4.** Resultados obtenidos en el tratamiento 2 (pesos en base seca).

| Operación unitaria     | Formación de las pilas     | Proceso de degradación           | Tamizado                            |                             |
|------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Materiales             | Peso inicial de la MP (kg) | Ramillas degradadas (36,7 %), kg | Ramillas no degradadas (63,3 %), kg | Peso final del compost (kg) |
| Residuos de jardín     | 45,61                      | 20,75                            | 35,8                                | 76,72                       |
| Hojarasca de algarrobo | 37,16                      |                                  |                                     |                             |
| Estiércol vacuno       | 35,63                      |                                  |                                     |                             |
| Ramillas de algarrobo  | 56,55                      |                                  |                                     |                             |

Como se ha establecido que se necesitan un total de 9000 kg de material mensualmente para llevar a cabo el compostaje, se debe establecer las cantidades de cada material utilizadas inicialmente en base seca, considerando las humedades que se obtuvieron en el *tratamiento 2*, siendo las siguientes: residuos de jardín (23,98%), hojarasca de algarrobo (7,1%), estiércol de vacuno (10,93%) y las ramillas de algarrobo (5,75%). A continuación se muestra en la **tabla 4.5** las cantidades obtenidas en el proceso de compostaje propuesto.

**Tabla 4.5.** Resultados obtenidos al final del proceso (pesos en base seca).

| Operación unitaria     | Formación de las pilas     | Proceso de degradación        | Tamizado                         |                             |
|------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Materiales             | Peso inicial de la MP (kg) | Ramillas degradadas (90%), kg | Ramillas no degradadas (10%), kg | Peso final del compost (kg) |
| Residuos de jardín     | 2053                       | 2291                          | 254                              | 4201                        |
| Hojarasca de algarrobo | 1672                       |                               |                                  |                             |
| Estiércol vacuno       | 1604                       |                               |                                  |                             |
| Ramillas de algarrobo  | 2545                       |                               |                                  |                             |

El peso final del compost se ha obtenido realizando una regla de tres simple respecto a los resultados que se obtuvieron del *tratamiento 2*, siendo el siguiente:

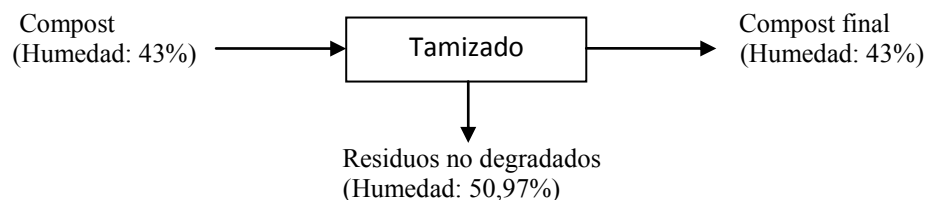
- Cantidad de material degradado en el tratamiento 2:

$$45,61 \text{ kg} + 37,16 \text{ kg} + 35,63 \text{ kg} + 20,75 \text{ kg} = \mathbf{139,15 \text{ kg.}}$$

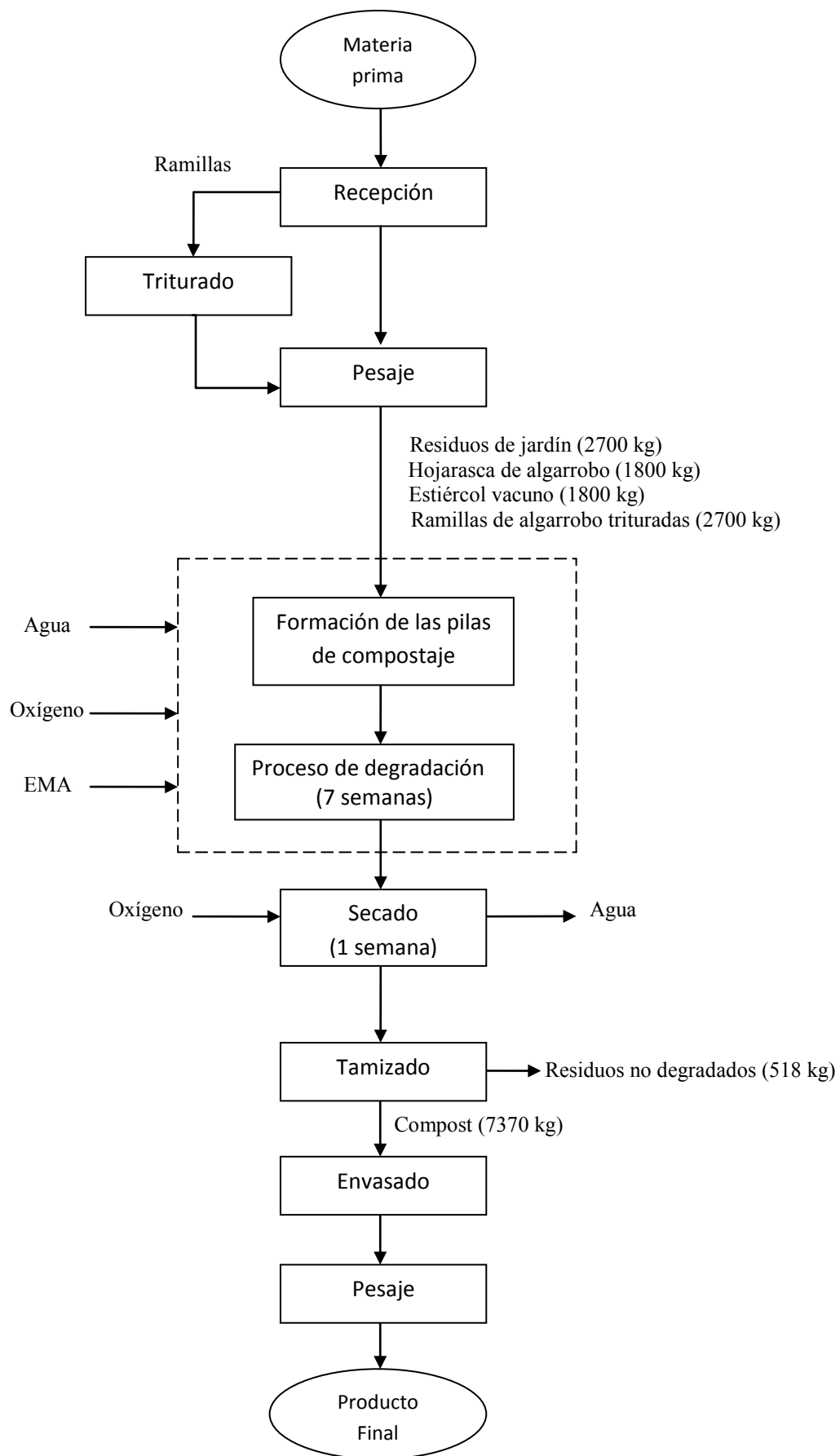
- Cantidad de material degradado en el proceso de compostaje propuesto:

$$2053 \text{ kg} + 1672 \text{ kg} + 1604 \text{ kg} + 2291 \text{ kg} = \mathbf{7620 \text{ kg.}}$$

Si de 139,15 kg de material degradado se ha obtenido 76,72 kg de compost, entonces en el proceso de compostaje propuesto, de 7620 kg de material degradado se obtendría un estimado de 4201 kg de compost en base seca.



A continuación se muestra en la **figura 4.9** el balance general donde relaciona todas las operaciones unitarias, siendo los materiales a compostar las entradas iniciales y el compost junto con los residuos no degradados las salidas finales del proceso. Todas las cantidades están expresadas en base húmeda.

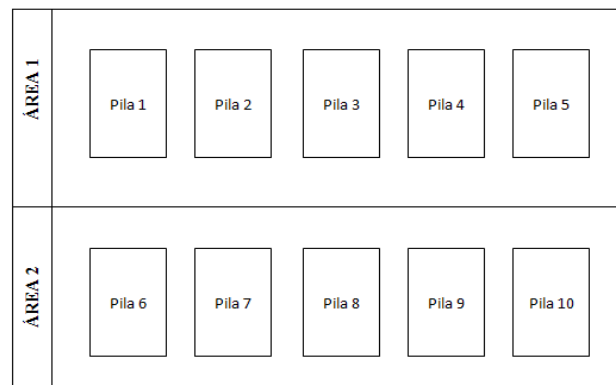


**Figura 4.9.** Esquema general de las operaciones unitarias.

#### 4.7. Metodología propuesta para obtener compost

La siguiente propuesta está basada en la producción de compost mensual aprovechando los residuos vegetales generados en la universidad. Se ha planteado la formación de cinco pilas de compostaje cada mes, las cuales deben tener las dimensiones requeridas para procesar los 9000 kg de material que se desea compostar, es decir, cada pila debe procesar 1800 kg al mes.

Para llevar a cabo esta propuesta de compostaje es necesario contar con un espacio para diez composteras con las dimensiones indicadas en el apartado 4.5, este espacio estará dividido en dos áreas y cada una estará destinada para la formación de cinco pilas de compostaje. Estas pilas estarán enumeradas del 1 al 10, ubicándose tal como se muestra en la **figura 4.10**.



**Figura 4.10.** Distribución de las pilas de compostaje.

La metodología propuesta inicia en el mes 0, procesando los 9000 kg de materia prima (7874 kg en base seca) que se obtienen en ese mes, utilizando el *Área 1* para realizar el proceso de compostaje. Teniendo en cuenta que mensualmente se debe procesar la misma cantidad de materia prima, el *Área 2* será utilizada para procesar la cantidad de material correspondiente al mes 1, considerando que el tiempo de compostaje demanda de dos meses, en el mes 2, se estaría obteniendo 7370 kg de compost (4201 kg en base seca) correspondiente al mes 0, al mismo tiempo el *Área 1* se estaría desocupando y volviéndose a utilizar para la cantidad de materia prima correspondiente al mes 2, siguiendo una secuencia de utilización de las áreas para compostar el material, tal como se aprecia en la **tabla 4.6**.

**Tabla 4.6.** Utilización de las áreas de compostaje.

| Mes                                                          | Mes 0         | Mes 1         | Mes 2           | Mes 3           | Mes 4           | Mes 5           | ..... |
|--------------------------------------------------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
| <b>Cantidad de materia prima (base húmeda) Requerida, kg</b> | 9000          | 9000          | 9000            | 9000            | 9000            | 9000            | ..... |
| <b>Área de compostaje Utilizado</b>                          | <i>Área 1</i> | <i>Área 2</i> | <i>Área 1</i>   | <i>Área 2</i>   | <i>Área 1</i>   | <i>Área 2</i>   | ..... |
| <b>Cantidad de compost (base húmeda) Obtenido, kg</b>        | -             | -             | 7370<br>(Mes 0) | 7370<br>(Mes 1) | 7370<br>(Mes 2) | 7370<br>(Mes 3) | ..... |

#### 4.8. Distribución en planta

Realizar una distribución en planta implica una ordenación física de los elementos que forman parte de una planta industrial, esta ordenación hace referencia a los espacios necesarios para el movimiento del material, el almacenamiento de la materia prima y/o el producto terminado y todos los elementos como la maquinaria de trabajo y el personal requerido, siendo el objetivo general, el de reducir los costos y tiempos de producción junto con brindar la seguridad de los empleados.<sup>33</sup>

Existen tres tipos de distribución en planta, dado que todos los procesos productivos no son iguales, ya sea por el espacio requerido de la planta, el tiempo que demanda procesar la materia prima, las unidades de producción obtenidas al final del proceso, las características del producto final, etc. Los tipos de distribución son los siguientes:

- **Distribución por proceso**

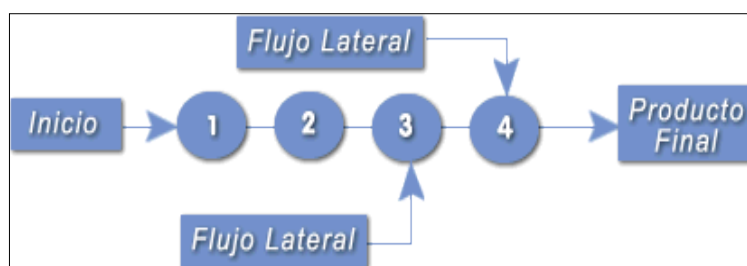
Esta distribución es ideal para fabricaciones de piezas en pequeños grupos o lotes, o si se desea producir diferentes tipos de piezas. Se destina al personal y los equipos que realizan una misma función a una misma área de trabajo, los distintos ítems deben moverse de un área a otra, teniendo en cuenta la secuencia de las operaciones establecidas en el proceso de producción. A continuación se muestra en la **figura 4.11** una distribución de este tipo, el cual detalla el recorrido del producto por las distintas áreas de trabajo.



**Figura 4.11.** Distribución por proceso.

- **Distribución por producto**

Esta distribución está relacionada con los procesos productivos de flujo lineal, es decir, se caracteriza porque se diseña para producir un determinado producto o servicio, el tipo y la cantidad de la maquinaria requerida, así como su distribución se realiza en base al producto que se desea obtener al final del proceso. Las máquinas son colocadas en línea, según la secuencia en que cada una se vaya requiriendo, el producto recorre la línea de producción de un área a otra a medida que sufre las modificaciones necesarias. A continuación se muestra en la **figura 4.12** un diagrama de flujo que grafica el recorrido del producto.



**Figura 4.12.** Distribución por producto.

### • Distribución por posición fija

El producto es fabricado en un sólo lugar, donde los trabajadores y la maquinaria deben de ir al área destinada para la fabricación del producto, esto se da generalmente debido a sus características físicas, ya sea por el peso, tamaño, forma o volumen.

A continuación se muestra en la **tabla 4.7** las principales ventajas y desventajas de los tres tipos de distribuciones expuestos anteriormente.

**Tabla 4.7.** Principales ventajas y desventajas de los tipos de distribución en planta.

| Tipo                                  | Ventajas                                                                                                                                                                                                                                                                            | Desventajas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Distribución por proceso</b>       | <ul style="list-style-type: none"><li>- Mayor fiabilidad en el sentido de que las averías de una máquina no tienen que detener todo el proceso.</li><li>- La diversidad de tareas asignadas a los trabajadores reduce la insatisfacción y la desmotivación para trabajar.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Los pedidos se mueven más lentamente a través del sistema, debido a la dificultad de programación, reajuste de los equipos y manejo de materiales.</li><li>- Baja productividad dado que cada trabajo o pedido puede ser diferente, requiriendo distinta organización y aprendizaje por parte de los operarios.</li></ul> |
| <b>Distribución por producto</b>      | <ul style="list-style-type: none"><li>- Reducción de tiempo de fabricación.</li><li>- Simplificación de tareas.</li><li>- Menor cantidad de trabajo en proceso.</li><li>- Se reduce el manejo de materiales.</li></ul>                                                              | <ul style="list-style-type: none"><li>- Poca flexibilidad en el proceso.</li><li>- La parada de alguna máquina puede parar toda la línea de producción.</li><li>- Trabajos muy monótonos.</li><li>- Inversión elevada.</li></ul>                                                                                                                                  |
| <b>Distribución por posición fija</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Se logra una mejor utilización de la maquinaria.</li><li>- Se adapta a gran variedad de productos.</li><li>- Se mantiene más fácil la continuidad de la producción.</li></ul>                                                               | <ul style="list-style-type: none"><li>- La calidad del producto depende directamente de la habilidad del trabajador y su efectividad en el proceso.</li><li>- Funciona de manera correcta si las operaciones de valor agregado son simples y requieren poca maquinaria.</li></ul>                                                                                 |

Según lo visto anteriormente, el tipo de distribución en planta que se debe realizar para la propuesta de compostaje en la Universidad de Piura, es la distribución “por producto”, debido a que se obtiene al final de proceso un solo producto, que es el compost en sacos.

#### 4.8.1. Determinación de los departamentos de la planta de compostaje

Se ha establecido los departamentos o áreas en los cuales se llevarán a cabo las operaciones unitarias descritas en el apartado 4.1 (diseño del proceso), siendo las siguientes:

- **Departamento de recepción, pesaje y almacén de materia prima:** Es el área destinada a almacenar los sacos de estiércol de ganado vacuno procedentes de los establos. Debe tener una capacidad de almacenar 40 sacos de este material, considerando que se necesitan 1800 kg mensualmente, y cada saco tiene unas dimensiones de 0,6 m x 0,4 m x 0,2 m (considerándolo echado) y puede pesar 45 kg.

Los residuos vegetales procedentes del campus son recogidos en sacos previo a la formación de las pilas de compostaje, luego son recibidos en esta área para ser pesados y obtener las cantidades requeridas para cada pila, posteriormente son llevados al departamento de compostaje.

- **Departamento de triturado:** Es el área destinada a recibir las ramillas de algarrobo que han sido recogidas del campus utilizando carretillas, son trituradas y colocadas en sacos para posteriormente ser llevadas al departamento de recepción y pesarlos para determinar la cantidad de este material que se requiere para la formación de las pilas.
- **Departamento de compostaje:** Es el área destinada a formar las pilas de compostaje, además es donde se realizarán los riegos, la aplicación del EMA, los volteos (aireación), la medición de la temperatura y el secado del compost. Tendrá la capacidad para formar diez composteras con las dimensiones que se han establecido anteriormente.
- **Departamento de tamizado y pesaje:** Es el área donde se realiza el cernido del compost utilizando la máquina vibro tamizadora, ya que ésta cuenta con una canaleta por donde sale el compost ya cernido y es recibido en sacos para posteriormente ser pesados en cantidades de 45 kg.
- **Departamento de almacén de producto terminado:** Es el área donde serán guardados los sacos de compost después de tamizarlo, considerando que se estima obtener 7370 kg al mes de este material (en base húmeda), cada saco tendrá un peso aproximado de 45 kg y las mismas dimensiones que los sacos de estiércol, este departamento tendrá la capacidad de almacenar la producción consecutiva de cuatro meses, es decir, debe almacenar 656 sacos de compost aproximadamente.
- **Área de mantenimiento:** Es el lugar donde se guardan los equipos tales como: la mochila de fumigación, el termómetro, palanas, sacos y otras herramientas que se utilizarán para hacerle mantenimiento y limpieza de la maquinaria como: la trituradora, la volteadora y la tamizadora.
- **Área de servicios higiénicos:** Se contará con este servicio para uso de los operadores que trabajan en la planta procesadora.

Es importante establecer la proximidad entre los departamentos que formarán parte de la planta procesadora, dado que se tiene que evaluar las ubicaciones de cada uno dentro de la planta, con la finalidad de obtener un adecuado flujo de los recursos, tanto de los materiales y del personal, para lograr así que el proceso sea el más óptimo.<sup>34</sup>

Para realizar una adecuada ubicación de los departamentos que contará la planta procesadora de compost, se realizará el análisis de relación de actividades, presentando un diagrama que se diseña por medio de códigos que establecen la importancia de la ubicación de un departamento con otro, como se puede apreciar en la **tabla 4.8**.

**Tabla 4.8.** Códigos de importancia de la ubicación entre departamentos.

| Código | Definición                                            |
|--------|-------------------------------------------------------|
| “A”    | Absolutamente importante que estén cerca uno de otro. |
| “E”    | Especialmente importante.                             |
| “I”    | Importante.                                           |
| “O”    | Ordinariamente importante.                            |
| “U”    | No importante.                                        |
| “X”    | Absolutamente importante que estén separados.         |

Se debe establecer unas razones de códigos, con la finalidad de explicar el motivo mediante el cual se justifica dicha proximidad de ambos departamentos. Se debe utilizar los que considere necesarios y codificarlos con números, tal como se muestra en la **tabla 4.9**.

**Tabla 4.9.** Códigos de los motivos de proximidad entre departamentos.

| <b>Código</b> | <b>Motivo</b>                                              |
|---------------|------------------------------------------------------------|
| 1             | Ahorro de tiempo y facilidad en el traslado de materiales. |
| 2             | Similitud de funciones.                                    |
| 3             | Evitar malos olores, contaminación y polvo.                |
| 4             | No existe un flujo de materiales entre departamentos.      |
| 5             | Utilizar herramientas y utensilios requeridos              |
| 6             | Por ser para empleados.                                    |

A continuación se muestra en la **tabla 4.10** las interrelaciones de los departamentos para la disposición de la planta procesadora de compost. La representación que se utilizó para relacionar los códigos de importancia y de motivo de proximidad es: Letra (Número).

**Tabla 4.10.** Tabla de interrelación.

| Nº         | Departamento de:                             | <b>I</b> | <b>II</b> | <b>III</b> | <b>IV</b> | <b>V</b> | <b>VI</b> | <b>VII</b> |
|------------|----------------------------------------------|----------|-----------|------------|-----------|----------|-----------|------------|
| <b>I</b>   | Recepción, pesaje y almacén de materia prima | -        | A(1)      | A(1)       | O(2)      | U(4)     | O(5)      | O(6)       |
| <b>II</b>  | Triturado                                    |          | -         | I(1)       | U(4)      | U(4)     | E(5)      | O(6)       |
| <b>III</b> | Compostaje                                   |          |           | -          | A(1)      | U(4)     | A(5)      | O(6)       |
| <b>IV</b>  | Tamizado y pesaje                            |          |           |            | -         | A(1)     | E(5)      | O(6)       |
| <b>V</b>   | Almacén de producto terminado                |          |           |            |           | -        | U(4)      | X(3)       |
| <b>VI</b>  | Mantenimiento                                |          |           |            |           |          | -         | O(4)       |
| <b>VII</b> | S.S.H.H                                      |          |           |            |           |          |           | -          |

#### **4.8.2. Determinación del espacio requerido para cada departamento**

Para determinar las áreas requeridas para cada departamento establecido se ha utilizado el método de P.F Guerchef.<sup>35</sup> Esta metodología propone el cálculo del área total necesaria para cada departamento como la suma de tres superficies parciales, siendo las siguientes:

- **Superficie estática (Ss):** Es el área que debe corresponder a los muebles, maquinarias, instalaciones y equipos dentro del departamento.

$$S_s = \text{Largo} \times \text{Ancho}$$

- **Superficie de gravitación (Sg):** Es la superficie utilizada alrededor de los puestos de trabajo por el empleado y para el material acopiado para las operaciones en curso.

$$S_g = S_s \times N$$

Siendo “N” el número de lados a partir de los cuales el mueble o la máquina deben ser utilizados.

- **Superficie de evolución (Se):** Es la superficie que hay que reservar entre los puestos de trabajo para considerar los desplazamientos del personal.

$$S_e = (S_s + S_g) \times K$$

Siendo “K” la relación entre las dimensiones de los hombres (altura promedio 1,65 m) u objetos (área) que se desplazan dentro del departamento y el doble del promedio de las alturas de los muebles o máquinas entre los cuales estos se desenvuelven y que están estáticas en el departamento.

- **Superficie total (St):** es la suma de la tres anteriores.

$$St = (S_s + S_g + S_e) \times n$$

Siendo “n” el número de máquinas o muebles requeridos en cada departamento.

A continuación detallaremos el cálculo del área requerida para cada departamento que ha sido establecido para el diseño de la planta procesadora de compost en la UDEP.

- Departamento de recepción, pesaje y almacén de materia prima

[illegible]

$$K = \frac{1,65}{2 \times 0,78} = 1,06$$

- Departamento de triturado

| Área para:                             | Largo (m) | Ancho (m) | Altura (m) | Ss (m <sup>2</sup> ) | N | Sg (m <sup>2</sup> ) | Ss+Sg (m <sup>2</sup> ) | K   | Se (m <sup>2</sup> ) | n | St (m <sup>2</sup> ) |
|----------------------------------------|-----------|-----------|------------|----------------------|---|----------------------|-------------------------|-----|----------------------|---|----------------------|
| Espacio de recepción de material       | 2         | 2         | 1,5        | 4                    | 4 | 16                   | 20                      | 0,6 | 12                   | 1 | 32                   |
| Máquina trituradora                    | 1,7       | 0,72      | 1,23       | 1,22                 | 4 | 4,8                  | 6                       | 0,6 | 3,6                  | 1 | 9,6                  |
| Área total requerida (m <sup>2</sup> ) |           |           |            |                      |   |                      |                         |     |                      |   | 41,6                 |

$$K = \frac{1,65}{2 \times 1,36} = 0,6$$

- Departamento de compostaje

| Área para:                             | Largo (m) | Ancho (m) | Altura (m) | Ss (m <sup>2</sup> ) | N | Sg (m <sup>2</sup> ) | Ss+Sg (m <sup>2</sup> ) | K    | Se (m <sup>2</sup> ) | n  | St (m <sup>2</sup> ) |
|----------------------------------------|-----------|-----------|------------|----------------------|---|----------------------|-------------------------|------|----------------------|----|----------------------|
| Pila de compostaje                     | 9         | 1,8       | 1,05       | 16,2                 | 4 | 64,8                 | 81                      | 0,65 | 52,65                | 10 | 1336,5               |
| Área total requerida (m <sup>2</sup> ) |           |           |            |                      |   |                      |                         |      |                      |    | 1336,5               |

$$K = \frac{2}{2 \times 1,53} = 0,65$$

- Departamento de tamizado y pesaje

| Área para:                             | Largo (m) | Ancho (m) | Altura (m) | Ss (m <sup>2</sup> ) | N | Sg (m <sup>2</sup> ) | Ss+Sg (m <sup>2</sup> ) | K    | Se (m <sup>2</sup> ) | n | St (m <sup>2</sup> ) |
|----------------------------------------|-----------|-----------|------------|----------------------|---|----------------------|-------------------------|------|----------------------|---|----------------------|
| Máquina vibro tamizadora               | 3         | 1         | 1,8        | 3                    | 4 | 12                   | 15                      | 0,64 | 9,6                  | 1 | 24,6                 |
| Balanza de plataforma                  | 0,4       | 0,5       | 0,75       | 0,2                  | 4 | 0,8                  | 1                       | 0,64 | 0,64                 | 1 | 1,64                 |
| Área total requerida (m <sup>2</sup> ) |           |           |            |                      |   |                      |                         |      |                      |   | 26,2                 |

$$K = \frac{1,65}{2 \times 1,28} = 0,64$$

- **Departamento de almacén de producto terminado**

| Área para:                                  | Largo (m) | Ancho (m) | Altura (m) | Ss (m <sup>2</sup> ) | N | Sg (m <sup>2</sup> ) | Ss+Sg (m <sup>2</sup> ) | K    | Se (m <sup>2</sup> ) | n | St (m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------------------|-----------|-----------|------------|----------------------|---|----------------------|-------------------------|------|----------------------|---|----------------------|
| Espacio de almacenaje                       | 3         | 1,6       | 1,6        | 4,8                  | 4 | 19,2                 | 24                      | 0,52 | 12,48                | 4 | 146,29               |
| <b>Área total requerida (m<sup>2</sup>)</b> |           |           |            |                      |   |                      |                         |      |                      |   | <b>145,92</b>        |

$$K = \frac{1,65}{2 \times 1,6} = 0,52$$

- **Área de mantenimiento**

| Área para:                                      | Largo (m) | Ancho (m) | Altura (m) | Ss (m <sup>2</sup> ) | N | Sg (m <sup>2</sup> ) | Ss+Sg (m <sup>2</sup> ) | K    | Se (m <sup>2</sup> ) | n | St (m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------------------------|-----------|-----------|------------|----------------------|---|----------------------|-------------------------|------|----------------------|---|----------------------|
| Espacio para utensilios de limpieza             | 1,5       | 1,5       | 1,5        | 2,25                 | 2 | 4,5                  | 6,75                    | 0,61 | 4,1                  | 1 | 10,85                |
| Estante de equipos y herramientas de maquinaria | 2         | 1,5       | 1,2        | 3                    | 2 | 6                    | 9                       | 0,61 | 5,49                 | 1 | 14,5                 |
| <b>Área total requerida (m<sup>2</sup>)</b>     |           |           |            |                      |   |                      |                         |      |                      |   | <b>25,4</b>          |

$$K = \frac{1,65}{2 \times 1,35} = 0,61$$

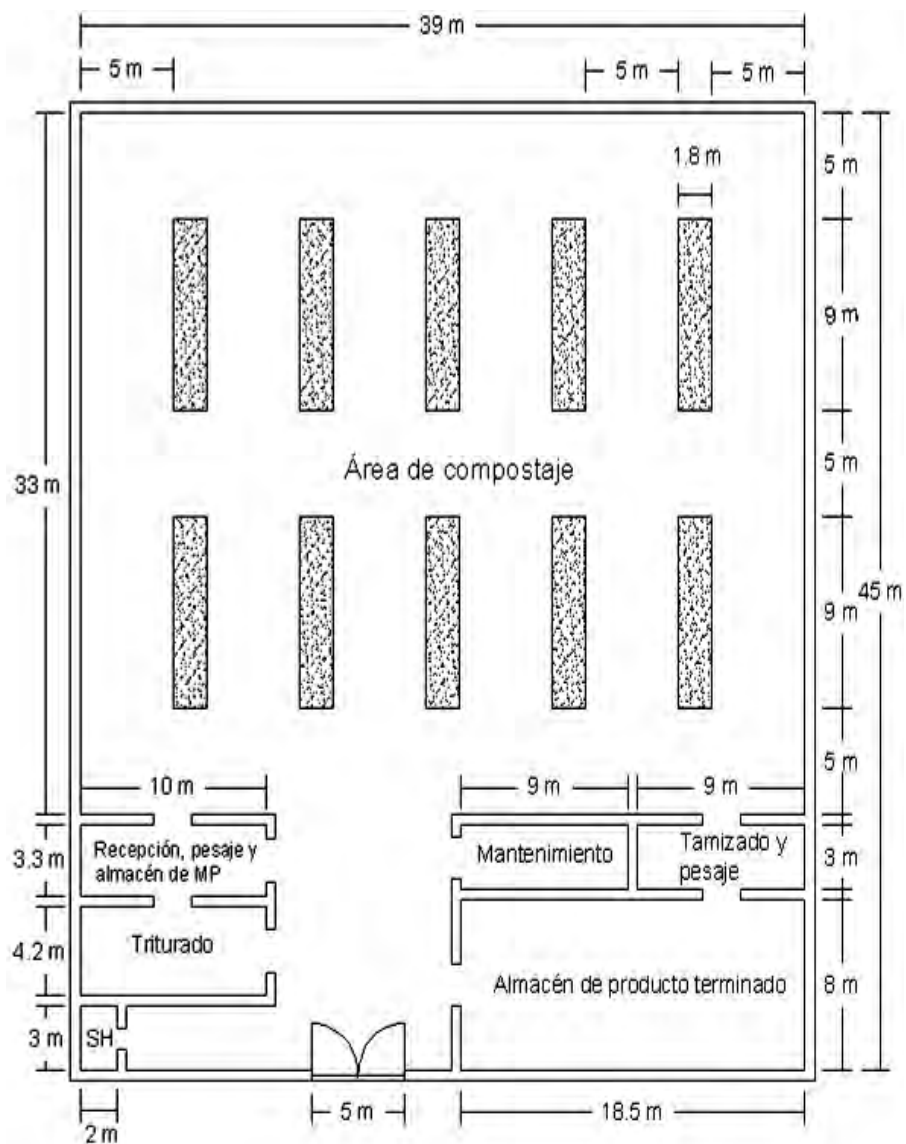
- **Área de S.S.H.H**

| Área para:                                  | Largo (m) | Ancho (m) | Altura (m) | Ss (m <sup>2</sup> ) | N | Sg (m <sup>2</sup> ) | Ss+Sg (m <sup>2</sup> ) | K    | Se (m <sup>2</sup> ) | n | St (m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------------------------|-----------|-----------|------------|----------------------|---|----------------------|-------------------------|------|----------------------|---|----------------------|
| Urinario                                    | 0,3       | 0,3       | 0,7        | 0,09                 | 2 | 0,18                 | 0,27                    | 1,06 | 0,28                 | 2 | 1,1                  |
| Inodoro                                     | 0,6       | 0,5       | 0,75       | 0,3                  | 2 | 0,6                  | 0,9                     | 1,06 | 0,95                 | 1 | 1,85                 |
| Lavatorio                                   | 0,5       | 0,4       | 0,9        | 0,2                  | 2 | 0,4                  | 0,6                     | 1,06 | 0,64                 | 1 | 1,24                 |
| <b>Área total requerida (m<sup>2</sup>)</b> |           |           |            |                      |   |                      |                         |      |                      |   | <b>4,2</b>           |

$$K = \frac{1,65}{2 \times 0,78} = 1,06$$

Habiendo calculado las áreas requeridas para cada departamento, se puede estimar que el área necesaria (para los departamentos) es aproximadamente 1612 m<sup>2</sup>.

Con la ayuda de la tabla de interrelaciones y las áreas de cada departamento se ha diseñado un plano en 2D para representar la planta procesadora, detallando las dimensiones de los departamentos y la proximidad que debe existir entre ellos.



|                                                                                               |                                                                                                 |                               |                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| <i>Fecha:</i><br>01/09/12                                                                     | <b>Universidad de Piura</b><br><i>Programa académico de Ingeniería Industrial y de Sistemas</i> |                               |                         |
| <i>Propuesta de compostaje de los residuos vegetales generados en la Universidad de Piura</i> |                                                                                                 | <i>Distribución de planta</i> | <i>Escala:</i><br>1:300 |
| <i>Marcos Antonio Mendoza Juárez</i>                                                          |                                                                                                 |                               | <i>Plano:</i><br>Nº 01  |

### 4.8.3. Localización de planta

Se ha considerado elegir la ubicación de la planta de compostaje al final del diseño, debido a que se necesita conocer las dimensiones con las que debe contar, siendo de 45 m x 39 m según el diseño del plano en 2D, requiriendo un área total de 1755 m<sup>2</sup>.

En la actualidad, la Universidad de Piura cuenta con espacio libre disponible para poder llevar a cabo en un futuro la implementación de la planta procesadora de compostaje, también cuenta con áreas que ya han sido delimitadas para futuras construcciones, es por ello que se ha elegido dos posibles zonas libres dentro del campus, tal como se puede apreciar en la **figura 4.13**, para ser evaluadas por medio de unas variables denominadas factores de localización con el fin de elegir la ubicación ideal.



**Figura 4.13.** Localización de planta.

Para llevar a cabo esta elección se ha utilizado el método de factores ponderados,<sup>36</sup> dado que nos permite de una manera fácil y sencilla poder identificar los costos que son difíciles de evaluar respecto a la localización de instalaciones, por lo que se ha seguido los siguientes pasos para realizar este método.

- Se ha desarrollado una lista de factores que están vinculados con las características de la zona.
- Se ha asignado a cada factor un peso ponderado para ver la importancia que tiene y poder cumplir con los objetivos del diseño.
- Se ha evaluado mediante una escala de calificación para cada factor que va de 1 a 10, asignándole la calificación más alta a la zona que tenga más opciones de cumplir con el factor de localización.
- Se multiplicó cada calificación por los pesos de cada factor, obteniendo la sumatoria para cada zona establecida.
- Por último, la elección se ha hecho para la máxima calificación en puntaje.

La ecuación utilizada para este método es el siguiente:

$$P_i = \sum W_j \times P_{ij}$$

$P_i$ : puntuación de cada zona.

$W_j$ : peso ponderado de cada factor  $i$ .

$P_{ij}$ : puntuación de zonas  $j$  por cada factor  $i$ .

A continuación se presenta en la **tabla 4.11** los factores de localización que se han establecidos según las zonas elegidas, además los pesos ponderados a cada factor para determinar la calificación.

**Tabla 4.11.** Calificación asignada a cada factor.

| Factores de localización           | Peso ponderado | Alternativas |            |
|------------------------------------|----------------|--------------|------------|
|                                    |                | Zona 1       | Zona 2     |
| Requerimiento de agua potable      | 0,4            | 3            | 3          |
| Requerimiento de energía eléctrica | 0,3            | 8            | 6          |
| Accesibilidad a la zona            | 0,2            | 9            | 5          |
| Proximidad a la materia prima      | 0,1            | 6            | 8          |
| <b>Total</b>                       | <b>1</b>       | <b>6</b>     | <b>4,8</b> |

Según los resultados obtenidos, la localización más óptima se presenta en la *Zona 1* por tener la máxima calificación en puntaje.

## **Conclusiones y recomendaciones**

### **Conclusiones**

- El pH es uno de los indicadores que permite controlar el proceso de compostaje, especialmente en la etapa final del mismo (6,8 – 8). Se ha verificado que el pH del compost en todo el proceso debe ser lo más cercano a 7. Si se aleja de este valor, el proceso se torna lento o puede detenerse, debido a que los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica no toleran valores muy ácidos ni muy alcalinos. Los materiales que se procesaron en este trabajo de investigación, sí mantuvieron el pH dentro del rango permisible, a excepción de las ramillas de algarrobo que inicialmente registró un valor de 6,36; sin embargo este pH fue neutralizado al mezclarse con los demás materiales, manteniendo el compost dentro del rango de pH aceptable.
- En los cuatro tratamientos ensayados se utilizó la misma metodología para el control y monitoreo de los parámetros físicos de temperatura y humedad. Los ensayos realizados demostraron que estos parámetros se mantuvieron en condiciones óptimas, garantizando que todos los tratamientos tuvieron las mismas condiciones ambientales.
- Los resultados obtenidos demuestran que el tratamiento 2 (pila 3) fue el que registró mayor porcentaje de ramillas degradadas (36,7%) durante los dos meses que duró el proceso de compostaje. Comparando este porcentaje de degradación con el obtenido en el tratamiento 0 (pila 1), el cual fue de 22,19% de ramillas degradadas, se observa la efectividad de la dosis de microorganismos eficaces aplicada en el tratamiento 2, asimismo, el tratamiento 2 registró el valor de pH más cercano al neutro (7,39) y una concentración de  $2,2E+04$  NMP/100 g de microorganismos termotolerantes inferior al límite permisible ( $1,0 E+05$  NMP/100 g).
- La relación carbono/nitrógeno es un indicador importante en el seguimiento del proceso de compostaje, éste tiende a disminuir hasta alcanzar valores entre 25 y 30 en el producto final. Este valor también depende de los materiales iniciales. Los tratamientos 2 y 3 fueron los más cercanos a este rango, siendo de 24,9 y 27,8 respectivamente, ayudando a establecer la culminación del proceso. Hay que tener en cuenta que si la relación es muy baja, nos indica que la composta se ha mineralizado excesivamente, y si es muy alta, puede indicar que no se ha descompuesto suficientemente. La estabilidad de este valor es un indicador de que la degradación irá disminuyendo lentamente con el tiempo.

- La estimación realizada para los residuos de bosque ha sido de utilidad para conocer la oferta de los materiales como la hojarasca y las ramillas de algarrobo, que según lo estimado, sí puede cubrir la cantidad mensual que se necesitaría para llevar a cabo la propuesta de compostaje en la UDEP.
- En este tipo de procesos es importante el tamaño de los materiales a compostar, para ello se ha considerado utilizar la máquina trituradora con la finalidad de moler las ramillas de algarrobo. El grado de trituración debe ser controlado, puesto que las partículas de tamaño pequeño (menores a 3 cm) proporcionan una mayor superficie de acceso a los microorganismos, y por lo tanto permiten degradaciones más rápidas y homogéneas. No conviene que las partículas sean demasiado pequeñas, dado que pueden originar problemas de compactación excesiva que impedirían el proceso de aireación necesario.
- Se ha considerado que dentro del diseño de la planta procesadora de compost se utilice la distribución en U, es decir, el recorrido que debe tener el material desde que inicia el proceso hasta su finalización debe tener esta forma, tal como se puede distinguir en el plano diseñado en 2D, considerando que los dos almacenes, tanto para la materia prima como para el producto terminado, se encuentren cerca a la puerta principal (entrada y salida) para que haya un mejor flujo de materiales.
- El almacén de producto terminado ha sido diseñado para una capacidad de almacenamiento de cuatro meses de compost. El tiempo de almacenamiento de este producto es importante, ya que se considera como *compost fresco* si tiene un tiempo de almacenaje corto (2 a 4 meses), *compost maduro* si tiene un tiempo de almacenaje mediano (5 a 12 meses) y *compost viejo* si tiene un tiempo de almacenaje largo (mayor al año).
- Esta propuesta de compostaje generaría algunos puestos de trabajo, por lo que requerirá de una organización y planificación de las personas que estarían a cargo de la planta procesadora, desde la recepción de materia prima hasta el almacenamiento del producto terminado. Se requerirá un total de tres a cuatro operarios que se encarguen de llevar a cabo las operaciones unitarias del proceso.
- En la actualidad, la universidad compra estiércol vacuno para abonar periódicamente las áreas verdes del campus, aplicándolo en forma directa, es por ello que se justifica la adición de este material al compostaje propuesto para que de esta manera se obtenga un abono más natural y estable, debido a la relación carbono/nitrógeno con el que cuenta el compost obtenido del proceso (24,9) en comparación al del estiércol vacuno (13,37).

## Recomendaciones

- Realizar la caracterización físico-química de los materiales previos a su compostaje para determinar las proporciones de cada material que conformará la pila de compostaje. Se recomienda evaluar inicialmente el porcentaje de nitrógeno y carbono que contienen estos materiales (ya que no todos cuentan con las mismas características), para que por medio de estos resultados se obtenga una relación en peso de los materiales ricos en nitrógeno y los que son ricos en carbono, con la finalidad de obtener una mezcla que tenga una relación en peso cercana a 2,4.

- Se recomienda no almacenar por períodos de tiempo largos los residuos de podas de jardín, ya que este tiende a secarse al perder humedad, por lo que debe ser utilizado inmediatamente después de ser podado o dejarlo al menos unos días acopiado para poder agregarlo posteriormente al compostaje y así aprovechar la humedad que estos contienen. Es apropiado que cuando se realice un compostaje haya una mezcla equilibrada de materiales frescos y secos.
- Se recomienda la aplicación de los microorganismos eficaces a las pilas de compostaje a mayor escala, ya que facilitan la reducción de malos olores y la presencia de algunos insectos, como se presentó en el *tratamiento 0* (pila1), se sugiere que se aplique por lo menos las cuatro primeras semanas, utilizando dosis de 1 litro en mochila de 20 litros (una aplicación por semana). Considerando que la cantidad de material a procesar es de 9000 kg al mes, se necesitarán 180 litros de EMA, es decir, 9 frascos de EM-compost de un litro cada mes.
- Para garantizar que el proceso de compostaje sea óptimo se sugiere realizar una evaluación rigurosa de los parámetros físicos: humedad, temperatura y oxigenación. El primero, utilizando el método empírico del puño, que nos da un estimado muy cercano a la realidad del contenido de agua en la pila; el segundo, se debe utilizar un termómetro especial para compost; y el tercero, asegurando que los volteos sean realizados de manera homogénea.
- Las pilas de compostaje deben ser protegidas de las lluvias y de la radiación solar, techando de manera artesanal el área de trabajo, tal como se procedió en las pilas a pequeña escala, es decir, utilizando material rudimentario para la disminución de costos de instalación.
- La merma obtenida en la operación de tamizado se puede volver a incorporar al proceso, triturándolas si es necesario, para colocarlas nuevamente en las pilas de compostaje.
- Finalmente, sí es factible la adquisición de maquinaria para llevar a cabo las operaciones unitarias que demanden mayor tiempo y mano de obra, para de esta manera facilitar el trabajo, ya que la cantidad de material a compostar mensualmente sí es significativa.

## Referencias bibliográficas

- <sup>1</sup> **Ruiz, A.** (2002). Tesis: “*Compostación de los residuos sólidos orgánicos generados en la Universidad de Piura*”. Universidad de Piura - Facultad de ingeniería. Piura-Perú. pp. 3.
- <sup>2</sup> **Chanduví, R.** (2010). *Compostaje y lombricultura piramidal*. Disponible en <<http://www.peihap.gob.pe/cartillaAbonosOrganicos.pdf>>. Consultado el 17/04/2012. pp. 4.
- <sup>3</sup> **Cantanhede, A; Monge, G; Wharwood, G.** (1993). Proyecto de investigación: “*Compostificación de residuos de mercado*”. Lima-Perú. Disponible en <<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/composti.pdf>>. Consultado el 25/03/2012. pp. 6.
- <sup>4</sup> **Silva, J; López, P; Valencia, P.** (2008). Tesis: “*Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje*”. Escuela de ingeniería de los recursos naturales y del ambiente (EIDENAR). Universidad del Valle - Facultad de ingeniería. Cali – Colombia. Disponible en <<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/compostaje.pdf>>. Consultado el 12/11/2011. pp.2.
- <sup>5</sup> **Dios, M.** (2008). Tesis doctoral: “*Estudio y desarrollo de técnicas respirométricas para el control de la estabilidad del compost*”. Universidad de Córdoba - Facultad de ciencias – Departamento de química inorgánica e ingeniería química. Córdoba – Argentina. pp. 49-53.
- <sup>6</sup> **Silva, J; López, P; Valencia, P.** (2008). Tesis: “*Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje*”. Escuela de ingeniería de los recursos naturales y del ambiente (EIDENAR). Universidad del Valle - Facultad de ingeniería. Cali – Colombia. Disponible en <<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/compostaje.pdf>>. Consultado el 05/04/2012. pp. 6-7.
- <sup>7</sup> **Bonilla, M; Mosquera, M.** (2007). Tesis: “*Seguimiento de la presencia de rotavirus a un proceso de compostaje realizado a partir de residuos orgánicos domiciliarios y contenido ruminal*”. Pontificia Universidad Javeriana – Facultad de ciencias. Bogotá-Colombia. Disponible en

<<http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis97.pdf>>. Consultado el 10/04/2012. pp. 44.

- <sup>8</sup> **Silva, J; López, P; Valencia, P.** (2008). Tesis: “*Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje*”. Escuela de ingeniería de los recursos naturales y del ambiente (EIDENAR). Universidad del Valle - Facultad de ingeniería. Cali – Colombia. Disponible en  
<<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/compostaje.pdf>>. Consultado el 06/02/2012. pp. 11-12.
- <sup>9</sup> **Álvarez, J.** (2009). Tesis: “*La calidad del suelo y del compost del parque de Itchimbía en su proceso de recuperación*”. Escuela politécnica del ejercito – Departamento de ciencias de la vida ingeniería en biotecnología. Quito – Ecuador. pp. 16-17.
- <sup>10</sup> **Saez, A.** (2000). Tesis doctoral: “*Optimización de los métodos para mejorar la calidad del compost de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos*”. Universidad politécnica de Madrid. Madrid – España. Disponible en  
<<http://oa.upm.es/613/1/04200011.pdf>>. Consultado el 15/04/2012. pp. 66.
- <sup>11</sup> **Álvarez, J.** (2009). Tesis: “*La calidad del suelo y del compost del parque de Itchimbía en su proceso de recuperación*”. Escuela politécnica del ejercito – Departamento de ciencias de la vida ingeniería en biotecnología. Quito – Ecuador. pp. 13-14.
- <sup>12</sup> **Cantanhede, A; Monge, G; Wharwood, G.** (1993). Proyecto de investigación: “*Compostificación de residuos de mercado*”. Lima-Perú. Disponible en  
<<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/composti.pdf>>. Consultado el 25/03/2012. pp. 29.
- <sup>13</sup> **Silva, J; López, P; Valencia, P.** (2008). Tesis: “*Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje*”. Escuela de ingeniería de los recursos naturales y del ambiente (EIDENAR). Universidad del Valle - Facultad de ingeniería. Cali – Colombia. Disponible en  
<<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/compostaje.pdf>>. Consultado el 06/02/2012. pp. 4.
- <sup>14</sup> **Dios, M.** (2008). Tesis doctoral: “*Estudio y desarrollo de técnicas respirométricas para el control de la estabilidad del compost*”. Universidad de Córdoba - Facultad de ciencias – Departamento de química inorgánica e ingeniería química. Córdoba – Argentina. pp. 60.
- <sup>15</sup> **Pacheco, F.** (2009). Tesis magistral: “*Evaluación de la eficacia de la aplicación de inóculos microbiales y de Eissenia fétida en el proceso de compostaje doméstico de desechos urbanos*”. Universidad pública de Navarra. – Máster en agro biología ambiental. Navarra – España. Disponible en  
<[http://www.rapaluru.org/.../PRACTICUM\\_FABIAN\\_PACHECO.pdf](http://www.rapaluru.org/.../PRACTICUM_FABIAN_PACHECO.pdf)>. Consultado el 15/04/2012. pp. 12.

- <sup>16</sup> **Dios, M.** (2008). Tesis doctoral: "*Estudio y desarrollo de técnicas respirométricas para el control de la estabilidad del compost*". Universidad de Córdoba - Facultad de ciencias – Departamento de química inorgánica e ingeniería química. Córdoba – Argentina. pp. 59-60.
- <sup>17</sup> **Programa de apoyo profesional para la inserción laboral en el Perú.** (2007). "*Manual para la producción de compost con microorganismos eficaces*". pp. 13.
- <sup>18</sup> **Álvarez, J.** (2009). Tesis: "*La calidad del suelo y del compost del parque de Itchimbía en su proceso de recuperación*". Escuela politécnica del ejército – Departamento de ciencias de la vida ingeniería en biotecnología. Quito – Ecuador. pp. 14.
- <sup>19</sup> **Bonilla, M; Mosquera, M.** (2007). Tesis: "*Seguimiento de la presencia de rotavirus a un proceso de compostaje realizado a partir de residuos orgánicos domiciliarios y contenido ruminal*". Pontificia Universidad Javeriana – Facultad de ciencias. Bogotá-Colombia. Disponible en  
<<http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis97.pdf>>. Consultado el 10/04/2012. pp.50.
- <sup>20</sup> **Gómez, J; Estrada, I.** (2005). II congreso sobre residuos biodegradables y compost. "*Índices de la calidad de suelos y compost desde la perspectiva agro ecológica*". Sevilla – España. Disponible en  
<[http://www.bpeninsular.com/pdfs/Ponencia\\_ISR\\_Sevilla.pdf](http://www.bpeninsular.com/pdfs/Ponencia_ISR_Sevilla.pdf)>. Consultado el 20/04/2012. pp. 6.
- <sup>21</sup> **Extraído de la página web de Bioem S. A. C.**  
<<http://www.bioem.com.pe/distribuidores.php>>. Consultado el 15/02/2012.
- <sup>22</sup> **Extraído de la página web de EM effective microorganisms.**  
<[http://www.em-la.com/aplicaciones\\_y\\_usos\\_del\\_emy1%C2%AE.php?idioma=1](http://www.em-la.com/aplicaciones_y_usos_del_emy1%C2%AE.php?idioma=1)>. Consultado el 15/02/2012.
- <sup>23</sup> **Extraído de la página web de EM effective microorganisms.**  
<[http://www.em-la.com/activacion\\_del\\_emy1%C2%AE.php?idioma=1](http://www.em-la.com/activacion_del_emy1%C2%AE.php?idioma=1)>. Consultado el 18/02/2012.
- <sup>24</sup> **Ruiz, A.** (2002). Tesis: "*Compostación de los residuos sólidos orgánicos generados en la Universidad de Piura*". Universidad de Piura - Facultad de ingeniería. Piura-Perú. pp. 65.
- <sup>25</sup> **Norma mexicana NMX-AA-016-1984.** *Determinación de humedad en residuos sólidos.*
- <sup>26</sup> **Norma mexicana NMX-AA-025-1984.** *Determinación de pH en residuos sólidos.*
- <sup>27</sup> **Ruiz, A.** (2002). Tesis: "*Compostación de los residuos sólidos orgánicos generados en la Universidad de Piura*". Universidad de Piura - Facultad de ingeniería. Piura-Perú. pp. 38.

- <sup>28</sup> **Norma mexicana NMX-AA-018-1984.** *Determinación de cenizas en residuos sólidos.*
- <sup>29</sup> **Ruiz, A.** (2002). Tesis: “*Compostación de los residuos sólidos orgánicos generados en la Universidad de Piura*”. Universidad de Piura - Facultad de ingeniería. Piura - Perú. pp. 46.
- <sup>30</sup> **Fernández, L; Rojas, N; Roldán, T; Ramírez M.** (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados.* (1ª ed.). México. pp. 121.
- <sup>31</sup> **Everett, E; Ronald, J.** (1994). *Administración de la producción y las operaciones: conceptos, modelos y funcionamiento.* (4ª ed.). Estados Unidos. pp. 139.
- <sup>32</sup> **Rodríguez, M; Córdova, A.** (2006). *Manual de compostaje municipal – Tratamiento de residuos sólidos urbanos.* (1ª ed.). México. pp. 51.
- <sup>33</sup> **Bravo, D; Sánchez, C.** (2011). *Distribución en planta – Introducción al diseño de plantas industriales, conceptos y métodos cuantitativos para la toma de decisiones.* (1ª ed.). Colombia. pp. 6.
- <sup>34</sup> **Muther, R.** (1970). *Técnicas de organización industrial - Distribución en planta.* (2ª ed.). España. pp. 241.
- <sup>35</sup> **Zaracóndegui, A.** (1991). Tesis: “*Estudio para la instalación de una planta de fabricación de planchas o coberturas de abasto-celulosa-cemento*”. Universidad de Piura – Facultad de ingeniería. Piura – Perú. pp. 88-89.
- <sup>36</sup> **Domínguez, J.** (1995). *Dirección de operaciones – Aspectos estratégicos en la producción y los servicios.* (3ª ed.). España. pp. 265.