



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

PROPUESTA DE COMPOSTAJE DE LOS LODOS REMOVIDOS DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE PIURA

Enrique Chunga Zapata

Piura, marzo de 2014

FACULTAD DE INGENIERÍA

Área Departamental de Ingeniería Industrial y Sistemas

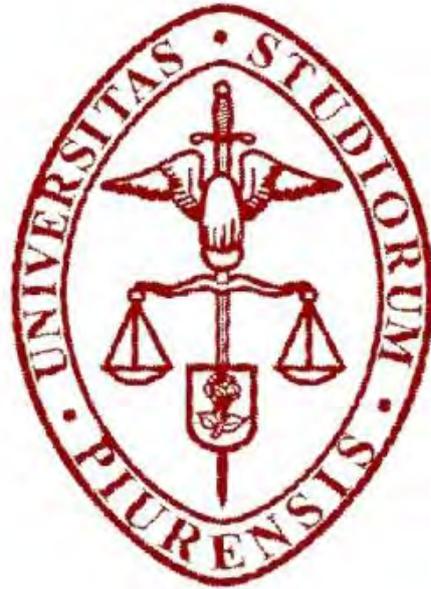
Chunga, E. (2014). *Propuesta de compostaje de los lodos removidos de las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura*. Tesis de pregrado en Ingeniería Industrial y de Sistemas. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Piura, Perú.



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 LODOS REMOVIDOS DE LAS
LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE PIURA**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Industrial y de Sistemas

Enrique Félix Chunga Zapata

Asesor: Dr. Ignacio Benavent Trullenque

Piura, marzo 2014

Prólogo

En enero del 2012 se inició el mantenimiento de las lagunas de estabilización ubicadas en el campus de la universidad, después de 25 años de funcionamiento. En este mantenimiento se removieron los lodos acumulados en el fondo de las lagunas, producto de la sedimentación de sólidos a lo largo de su etapa de funcionamiento.

Estos lodos, actualmente, se encuentran amontonados en un espacio, listos para su disposición. No es recomendable dejar los lodos expuestos al ambiente por mucho tiempo, ya que se pueden ocasionar problemas de contaminación al suelo y representar un riesgo para la flora y fauna que habita en los alrededores de este espacio de almacenamiento. Por tal motivo, es importante proveerles un tratamiento y establecer un protocolo en el que se determine un proceso estándar de mantenimiento eficiente de las lagunas de estabilización ubicadas en el campus.

Los lodos poseen un elevado porcentaje de materia orgánica, aproximadamente del 15 %; por tanto, en este estudio de tesis, se plantea como alternativa de solución, la utilización de los lodos como material base para la elaboración de compost.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento al personal que labora en el Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS) de la Universidad de Piura, por el apoyo incondicional brindado durante el desarrollo del presente trabajo de investigación, en especial a mi asesor, el Dr. Ing. Ignacio Benavent Trullenque, así como a la Dra. Ing. Doris Peña, quien me facilitó la realización de la fase de campo para esta investigación. Además, al personal encargado del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria, la bióloga Yuliana Mendoza y los técnicos Juan García y Oscar Crisanto, quienes me brindaron apoyo en la tarea de análisis de parámetros físicos, químicos y microbiológicos en diferentes etapas del proceso de compostaje. Así mismo, agradezco la colaboración del personal de mantenimiento del bosque y jardines de la Universidad de Piura, por su asistencia en el monitoreo y control del proceso de compostaje. A todos, muchas gracias por brindarme sus valiosos conocimientos y acertadas sugerencias.

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivos, la elaboración de un plan de acción para el mantenimiento de las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura y una propuesta de compostaje para los lodos obtenidos de dichos mantenimientos.

En la parte experimental del trabajo de tesis se realizó un proceso a escala de compostaje de los lodos mezclados con otros materiales, por medio de pilas de compostaje, en el que se procesaron 4 tratamientos en el que cada tratamiento se repitió 3 veces, por lo que se instalaron un total de 12 pilas de compostaje. Cada tratamiento se conformó con diferente proporción de materiales.

La metodología de compostaje utilizada, se basó en un proceso aeróbico, aproximadamente de 47 días. Se realizaron volteos semanales de forma manual, riegos diarios para mantener la humedad óptima, medición de temperatura tres veces por semana y toma de muestras cada dos semanas para el análisis físico-químico, y cada semana, para el análisis microbiológico.

Se determinó como más eficiente el tratamiento 1, cuya composición de materiales utilizados es del 10 % de lodo, 40 % de residuos de jardín y 50 % de hojarasca de algarrobo.

Índice

Prólogo	ii
Resumen	iii
Introducción.....	1
Capítulo 1 Marco teórico.....	3
1.1 Lagunas de estabilización	3
1.1.1 Concepto de laguna de estabilización	3
1.1.2 Proceso de autodepuración en las lagunas	3
1.1.3 Clasificación de las lagunas de estabilización.....	5
1.1.3.1 Lagunas anaerobias.....	5
1.1.3.2 Lagunas aerobias	8
1.1.3.3 Lagunas facultativas	9
1.1.3.4 Lagunas de maduración	13
1.1.4 Esquema de un sistema de depuración por lagunaje	14
1.1.5 Mantenimiento en los sistemas de lagunaje	15
1.2 Generación de lodos residuales en las lagunas de estabilización	16
1.2.1 Lodos residuales en una laguna de estabilización.....	16
1.2.2 Los objetivos de la remoción de lodos	16
1.2.3 Etapas en la remoción de lodos	16
1.2.3.1 Caracterización de las lagunas de estabilización.....	16
1.2.3.2 Determinación del volumen de lodos	17
1.2.3.3 Extracción de lodos	17
1.2.3.4 Caracterización de los lodos	21
1.2.4 Disposición final de los lodos	22
1.2.4.1 Estabilización del lodo	23
1.2.4.2 Espesado (concentración).....	24
1.2.4.3 Desinfección	24
1.3 Tratamiento de los lodos para su aprovechamiento en agricultura: Compostaje.....	25
1.3.1 Concepto de compostaje.....	25
1.3.2 El compost.....	25
1.3.3 Beneficios del compost	25
1.3.4 Sistemas de compostaje.....	26
1.3.4.1 Sistemas de compostaje abierto	26

1.3.4.2 Sistemas de compostaje cerrados	26
1.3.5 El proceso del compostaje	27
1.3.5.1 Descomposición de la materia orgánica	27
1.3.5.2 Maduración de la materia orgánica	28
1.3.6 Organismos patógenos en el compost	29
1.3.7 Índices de calidad del compost.....	30
1.3.7.1 Parámetros físicos.....	30
1.3.7.2 Parámetros químicos.....	32
1.3.7.3 Parámetros microbiológicos	34
1.3.8 Metodología general utilizada para la obtención del compost.....	36
1.3.8.1 Selección de las materias primas a utilizar	36
1.3.8.2 Construcción de la pila de compostaje (montículo)	37
1.3.8.3 Revolver el montículo	38
1.3.8.4 Curar la mezcla	38
1.3.8.5 Actividades a tomar en cuenta si el montículo no está caliente	38
 Capítulo 2 Metodología para las pilas de compostaje: Fase de campo y laboratorio.....	39
 2.1 Descripción de los materiales a utilizar en el compostaje	39
2.1.1 Lodos.....	39
2.1.2 Residuo de poda de jardín	40
2.1.3 Hojarasca de algarrobo.....	41
2.2 Cuantificación de los materiales utilizados en el compostaje.....	41
2.2.1 Cuantificación de lodos	41
2.2.2 Cuantificación de residuos de jardín y de hojarasca de algarrobo	41
2.3 Metodología utilizada para la construcción de pilas de compostaje.....	41
2.3.1 Ubicación de las pilas.....	42
2.3.2 Preparación del terreno.....	43
2.3.3 Distribución y dimensionamiento de las pilas	43
2.3.4 Recolección de los materiales	44
2.3.5 Composición y distribución de los materiales en las pilas de compostaje.....	45
2.3.6 Formación de las pilas de compostaje.....	46
2.4 Monitoreo y control del proceso de compostaje	47
2.4.1 Frecuencia de volteos	47
2.4.2 Regulación y medición de la humedad	48
2.4.3 Medición de la temperatura.....	49
2.5 Obtención de muestras para el laboratorio a lo largo del proceso	50
2.6 Pesaje y tamizado.....	51
2.7 Métodos empleados en la medición de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos	52
2.7.1 Método de determinación de la humedad	53
2.7.2 Método de determinación del fósforo total	54
2.7.3 Método de determinación del pH.....	57
2.7.4 Método de determinación de cenizas	58
2.7.5 Método de determinación de la materia orgánica	59
2.7.6 Método de determinación del carbono orgánico total.....	60
2.7.7 Método de determinación del nitrógeno total	60
2.7.8 Método de determinación de la población de coliformes	63

Capítulo 3 Resultados obtenidos en la fase de campo y de laboratorio	69
3.1 Resultados de los análisis iniciales en la materia prima	69
3.1.1 Caracterización de los lodos.....	69
3.1.2 Caracterización de los residuos de poda de jardín	74
3.1.3 Caracterización de la hojarasca de algarrobo.....	74
3.2 Resultados de los análisis a lo largo del proceso de compostaje.....	75
3.2.1 Temperatura	75
3.2.2 Humedad	76
3.2.3 pH	76
3.2.4 Fósforo total	77
3.2.5 Cenizas	77
3.2.6 Materia orgánica.....	78
3.2.7 Carbono orgánico total.....	78
3.2.8 Nitrógeno total.....	79
3.2.9 Relación carbono / nitrógeno	80
3.2.10 Coliformes totales y fecales	80
3.3 Análisis de resultados antes y después del proceso de compostaje.....	81
3.3.1 Análisis bajo el criterio de la humedad	82
3.3.2 Análisis bajo el criterio del pH.....	82
3.3.3 Análisis bajo el criterio del fósforo total.....	83
3.3.4 Análisis bajo el criterio de las cenizas	83
3.3.5 Análisis bajo el criterio de la materia orgánica total.....	84
3.3.6 Análisis bajo el criterio del carbono orgánico total.....	85
3.3.7 Análisis bajo el criterio del nitrógeno total	85
3.3.8 Análisis bajo el criterio de la relación carbono - nitrógeno	86
3.3.9 Análisis bajo el criterio de la densidad de coliformes.....	86
3.4 Elección del tratamiento óptimo	87
3.5 Resultados y análisis de la cantidad de compost en los tratamientos	88
 Capítulo 4 Diseño del proceso de mantenimiento del sistema de lagunaje de estabilización de la Universidad de Piura.....	 91
4.1 Actividades del proceso	91
4.1.1 Lista de actividades	91
4.1.2 Cursograma analítico del material.....	94
4.2 Requerimientos de materiales, recursos y mano de obra de las actividades del proceso.....	98
4.3 Metodología del diseño del proceso aplicado a la situación actual de la Universidad de Piura.	102
4.3.1 Planeamiento	102
4.3.1.1 Caracterización inicial de las lagunas.....	102
4.3.1.2 Medición de volúmenes y recojo de muestras de lodos.	103
4.3.1.3 Caracterización físico-química y microbiológica de los lodos.....	105
4.3.1.4 Estimación del tiempo requerido para el secado de los lodos antes de removerlos	106
4.3.1.4 Estimación del volumen final de lodos después del secado	108
4.3.2 Remoción de lodos.....	108
4.3.2.1 Desvío del afluente a otra laguna.	108
4.3.2.2 Drenaje de laguna	108

4.3.2.3 Recolección de muestras y análisis de lodos húmedos.....	108
4.3.2.4 Secado de lodos	110
4.3.2.6 Remoción de los lodos secos	111
4.3.2.7 Rellenado de la laguna.....	111
4.3.3 Disposición final de lodos	111
4.3.3.1 Almacenamiento	112
4.3.3.2 Recolección de muestras y análisis de lodos secos.	113
4.3.4 Compostación de los lodos.....	113
4.3.4.1 Distribución y dimensionamiento de pilas y áreas para el compostaje	114
4.3.4.2 Localización.....	127
Conclusiones y recomendaciones	129
Bibliografía.....	133

Introducción

El mantenimiento de las lagunas de estabilización es decisivo para el buen funcionamiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales con lagunas. Aunque la principal ventaja de este tratamiento es su simplicidad operativa, eso no quiere decir que su mantenimiento sea innecesario. Es un hecho que un gran número de instalaciones de lagunas en Latinoamérica ha fracasado por fallas en las tareas de mantenimiento.

Para evitar un fracaso en el mantenimiento adecuado de cualquier sistema de lagunas se requiere, por lo mínimo, de un plan adecuado para la remoción, tratamiento y disposición final de lodos cada cinco a diez años.

Para que los sistemas de lagunas sean sostenibles, es necesario planear la remoción de lodos desde el principio del diseño del sistema y continuamente durante su operación. Como objetivos, la remoción de lodos debe minimizar costos, proteger la salud pública y el medio ambiente, permitir el funcionamiento adecuado del sistema durante el período de limpieza, y dar una solución adecuada para la disposición final de los lodos.

En cuanto a la disposición final de los lodos, en la actualidad, el compostaje puede ser una alternativa ideal para abordar este propósito, ya que los lodos removidos de una laguna de estabilización pueden tener un fuerte impacto sobre el ambiente cuando su manejo no es el adecuado, trayendo como consecuencia la contaminación de la atmósfera y el suelo. El compostaje o compostación es un proceso biológico mediante el cual los residuos o basuras de origen orgánico son reducidos, a través de una acción bacteriológica, a un material estable 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.

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

En el primer capítulo, se presenta el marco teórico necesario para el desarrollo de la parte experimental del estudio de tesis, donde se toma en cuenta, definiciones, clasificaciones, desarrollo de procesos en lo referente a las lagunas de estabilización, la generación de lodos en las lagunas de estabilización y el compostaje de lodos para su aprovechamiento en la fertilización de suelos.

En el segundo capítulo se describen los métodos utilizados en la parte experimental del estudio de tesis (fase de campo y laboratorio). Se habla sobre la metodología que se utilizó para llevar a cabo todo el proceso de compostaje, desde la obtención de las materias primas

hasta la obtención del producto final (compost). También se describen sobre los métodos empleados para el análisis de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos desarrollados en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria (LIS) del Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS) de la Universidad de Piura.

En el tercer capítulo, se presentan y analizan los parámetros físicos, químicos y microbiológicos promedio medidos al inicio, durante y al final del proceso de compostaje en las 12 pilas, así mismo la cantidad de compost obtenido en los cuatro tratamientos establecidos en la etapa final del proceso.

Finalmente, en el capítulo 4 se propone un diseño del proceso de mantenimiento de las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura, enfocado principalmente en la remoción de los lodos acumulados en el fondo de estas. Este proceso abarca el planeamiento del mantenimiento, la remoción de los lodos y el compostaje final de los lodos, como un medio de tratamiento para su aprovechamiento en la fertilización de suelos.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1 Lagunas de estabilización

1.1.1 Concepto de laguna de estabilización

Las lagunas de estabilización son excavaciones poco profundas limitadas por taludes de tierra, en donde se almacenan aguas residuales por un tiempo determinado, denominado periodo de retención, con el objeto de mejorar sus características sanitarias. Para lograr esto, en una laguna de estabilización se aprovecha un proceso biológico, químico y físico conocido como autopurificación o autodepuración natural. (ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, 1996, pág. 1).

Estas lagunas, generalmente son de forma cuadrada o rectangular con una profundidad de 2 a 4 metros; y utilizan períodos de retención de varios días.

En la actualidad, el tratamiento de aguas residuales por medio de sistemas de lagunas se ha convertido en el más utilizado.

Las lagunas de estabilización reciben diferentes nombres, entre los que se encuentran: “lagunas de oxidación”, “lagunas de aguas negras”, “estanques de oxidación”, etc.

1.1.2 Proceso de autodepuración en las lagunas

En las aguas residuales estancadas se tiene un alto contenido de materia orgánica putrescible o biodegradable; es por ello que en estas lagunas se realiza, de forma espontánea, un proceso conocido como autodepuración o estabilización natural. En éste proceso ocurren fenómenos de tipo físico, químico, bioquímico y biológico, que son los encargados de mejorar las características sanitarias de dichas aguas.

Los fenómenos físicos son la sedimentación de sólidos suspendidos, la clarificación y otros efectos producidos por la luz del sol (desinfección). Los fenómenos químicos y biológicos tienen relación con seres vivos que se alimentan de sólidos orgánicos, conocidos como bacterias anaeróbicas.

En el proceso de depuración aparecen bacterias anaeróbicas que consumen el oxígeno del agua, las bacterias patógenas se presentan en grandes cantidades y se da lugar la sedimentación de sólidos suspendidos creándose bancos de lodo que se pudre y contribuye con ello a la degradación.

A medida que se agota el oxígeno disuelto se da lugar a la descomposición de la materia orgánica, con lo que desaparece la fauna acuática y se producen olores desagradables, resultado de la descomposición de estos sólidos orgánicos.

Posteriormente, aparece oxígeno disuelto en cantidades mayores, disminuyen los sólidos orgánicos al igual que los microorganismos por lo que se extinguen las especies anaeróbicas y reaparecen las aeróbicas. (ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, 1996, págs. 19-30).

El término “Laguna de Oxidación” se empleó debido a la gran cantidad de oxígeno que producen las algas a través de la fotosíntesis, el cual es un factor predominante en el proceso de degradación. Sin embargo, el uso de este término es incorrecto debido a que existen otros procesos que intervienen en la autodepuración de la materia.

El proceso de autodepuración permite:

- Remover de las aguas residuales la materia orgánica que ocasiona la contaminación.
- La sedimentación de los sólidos en suspensión.
- Eliminar microorganismos patógenos que representan un grave peligro para la salud.

Factores que favorecen la autodepuración

En la siguiente tabla se presentan los factores que favorecen el proceso de autodepuración de las aguas.

Tabla 1.1. Factores que favorecen el proceso de autodepuración del agua.

Tipo de factor	Factor	Descripción
Físico	Aireación	Penetración del aire en el agua por la acción de los vientos, la aireación ayuda a la eliminación de olores y sabores.
	Luz	Estimula el proceso de fotosíntesis, mediante el cual hay producción de oxígeno y eliminación del anhídrido carbónico del agua, favoreciendo el desarrollo de plantas verdes, contribuyendo a la eliminación de compuestos nitrogenados que son consumidos por esas plantas.
	Gravedad	Sedimenta la materia en suspensión.
Químico	Oxidación	Permite la transformación de la materia orgánica en mineral.
	Reducción	Acelera el proceso de descomposición de la materia orgánica, conduciendo a una licuefacción y posterior gasificación.
Biológico	Población microbiana	La capacidad de autopurificación se debe a la presencia de cantidades relativamente pequeñas de microorganismos que se alimentan de la materia orgánica contaminante que contiene el agua.

Fuente: ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. (1996). “Lagunas de estabilización”. Panamá. págs. 25 - 30

1.1.3 Clasificación de las lagunas de estabilización

1.1.3.1 Lagunas anaerobias

1.1.3.1.1 Fundamentos de las lagunas anaerobias

En estas lagunas el tratamiento se lleva a cabo por la acción de bacterias anaerobias. El contenido de oxígeno disuelto en este tipo de lagunas se mantiene muy bajo o nulo debido a la elevada carga orgánica y el corto periodo de retención del agua residual; motivo por el cual, este tipo de lagunas se usan como una primera depuración o pre tratamiento.

El objetivo perseguido es retener la mayor parte posible de los sólidos en suspensión, los cuales luego pasan a incorporarse a la capa de fangos acumulados en el fondo y así eliminar parte de la carga orgánica presente en la laguna.

Este tipo de lagunas se utilizan en pre tratamientos o en tratamientos primarios en una Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR).

1.1.3.1.2 Depuración en una laguna anaerobia

A continuación se muestran las etapas en las que tiene lugar la estabilización. (Collado Arias, pág. 8).

- **Hidrólisis**

Se refiere a la conversión de compuestos orgánicos complejos e insolubles en otros compuestos más sencillos y solubles en agua.

Esta etapa es fundamental para suministrar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaerobia de forma que puedan ser utilizados por las bacterias responsables de las dos etapas siguientes.

- **Formación de ácidos**

Los compuestos orgánicos sencillos generados en la etapa anterior son utilizados por las bacterias generadoras de ácidos. Como resultado se produce su conversión en ácidos orgánicos volátiles, fundamentalmente en ácidos acético, propiónico y butírico.

Son muchos los microorganismos capaces de realizar esta conversión y pueden ser anaeróbicos o facultativos. Su metabolismo es muy rápido.

- **Formación de metano**

Una nueva categoría de bacterias convierte los ácidos orgánicos en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). La liberación de estos gases es responsable de la aparición de burbujas, que son un síntoma de buen funcionamiento en las lagunas anaerobias.

A diferencia de lo que ocurre con la fase acidogénica, hay pocos microorganismos capaces de desarrollar la actividad metanogénica, su metabolismo es más lento. Las bacterias

metanógenas son anaerobias estrictas, es decir, mueren en presencia de oxígeno disuelto. Por otra parte, estas bacterias son también muy sensibles al pH.

Se estima que para valores de pH inferiores a 6.8 la actividad metanógena comienza a presentar problemas, y que por debajo de pH=6.2 se detiene completamente. Cuando esto ocurre se liberan no sólo ácidos orgánicos que pueden tener olores desagradables, sino otros compuestos como ácido sulfhídrico (SH₂), mercaptanos o escatol, que son los responsables principales de los olores que indican funcionamientos deficientes en las lagunas anaerobias.

1.1.3.1.3 Condiciones operativas en lagunas anaerobias

Los parámetros más utilizados para evaluar el comportamiento de las lagunas de estabilización de aguas residuales y la calidad de sus efluentes son la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), que caracteriza la carga orgánica; y el número más probable de coliformes fecales (NMP CF/100ml), que caracteriza la contaminación microbiológica. También tienen importancia los sólidos totales sedimentables, en suspensión y disueltos.

Cuando la carga orgánica es muy grande, la DBO excede la producción de oxígeno de las algas (y de la aeración superficial) y la laguna se torna totalmente anaerobia.

Se recomienda que las lagunas anaerobias estén diseñadas para cargas orgánicas mayores de 100 kg de DBO/ha/día para evitar problemas de malos olores y presencia de bacterias formadoras de sulfuros.

Entre otros parámetros de control en este tipo de lagunas tenemos:

- **pH:** Debe ser superior a 6.8, pues a valores inferiores la actividad metanógena disminuye y cesa, liberándose ácidos orgánicos y otros compuestos que pueden dar lugar a malos olores.
- **Temperatura:** Cuanto mayor es la temperatura, mejor es el crecimiento de las bacterias metanógenas, con un intervalo óptimo entre 30 a 35 °C.
- **Tiempos de retención:** Estos deben oscilar entre 2 a 5 días. Si el tiempo de retención es pequeño, solo se llevarán a cabo las dos primeras fases, lo que conllevará la aparición de malos olores y bajo rendimiento en eliminación de materia orgánica, en cambio, si el tiempo de retención es demasiado grande, comenzarán a aparecer algas en la superficie, siendo el oxígeno producido por estas la causa de muerte de las bacterias metanógenas.
- **Formación de espuma:** La formación de espuma es un indicador de buen funcionamiento en una laguna anaerobia, ya que evita las pérdidas de calor y la liberación de malos olores.

1.1.3.1.4 Problemas en lagunas anaerobias

En la **tabla 1.2** se muestran las principales anomalías y problemas presentes en las lagunas anaerobias, así mismo con los planes de acción que se deben tomar para contrarrestarlos.

Los problemas de aparición de malos olores y coloraciones en las lagunas y el desarrollo de mosquitos y otros insectos alrededor de estas son comunes en las lagunas anaerobias, y deben ser considerados en los planes de mantenimiento de las lagunas, de tal forma que asegure su correcto funcionamiento.

Tabla 1.2. Anomalías, problemas y soluciones presentes en lagunas anaerobias.

Problemas	Causas	Soluciones
Aparición de malos olores	Sobrecarga, tanto por aumento de carga orgánica, como por aumento del caudal.	Disminuir la carga aplicada, mediante un by-pass, hacia otra laguna anaerobia si es posible, o aumentando la profundidad de trabajo en la laguna anaerobia.
		Introducir una siembra de bacterias metanógenas.
		Ajustar el pH del medio, añadiendo disolución de amoníaco o carbonato sódico, hasta alcanzar un pH neutro (pH = 7).
	Defecto de carga orgánica en la alimentación o caudal inferior al mínimo utilizado en el diseño.	Aumentar la carga aplicada, reduciendo el número de lagunas anaerobias en servicio o disminuyendo la profundidad de trabajo.
		Introducir una siembra de bacterias metanógenas.
	Disminución de la temperatura ambiente, alterando el tiempo de retención.	Aislar las lagunas de la atmósfera colocando paja o poliestireno en la superficie, favoreciendo así la formación de costra aislante que mantiene la temperatura.
Variación de la composición del agua residual de entrada.	Es conveniente hacer un by-pass mientras se averigua el origen del vertido causante de las anomalías. Cuando se logre esto, las autoridades competentes les deben exigir que se depuren esos vertidos.	
Aparición de coloraciones rosa o rojo en las lagunas	Desarrollo de bacterias fotosintéticas del azufre, lo que constituye un síntoma de falta de carga en las lagunas anaerobias.	Aumentar la carga aplicada, reduciendo el número de lagunas anaerobias en servicio o disminuyendo la profundidad de trabajo.
		Introducir una siembra de bacterias metanógenas.
Desarrollo de mosquitos y otros insectos	Crecimiento de plantas acuáticas o terrestres que han alcanzado el borde del agua.	Mantener siempre libre de plantas los taludes y evitar que caigan plantas o ramas a las lagunas, que puedan servir de soporte para el desarrollo de mosquitos.
	La costra superficial puede servir de criadero de mosquitos.	Remover la costra con un rastrillo, para que las larvas de insectos se desprendan y sedimenten en la laguna. También se pueden utilizar insecticidas, procurando no contaminar el agua con él y utilizarlo exclusivamente en la costra de la laguna.

Fuente: Collado Arias, I. (s.f.). "Reingeniería de la E.D.A.R. de Tarija- Operación, mantenimiento y control de las lagunas". Escuela Internacional de Ingeniería del Agua de Andalucía. España. Disponible en http://prueba2.aguapedia.org/master/ebiblio/proyectos_Fc/proyecto_isabel_collado/DOCUMENTOS/ANEJOS/ANEJO%20N%C2%BA3%20LAGUNAS.pdf. Consultado el 26 de febrero de 2013. pág. 30.

1.1.3.2 Lagunas aerobias

1.1.3.2.1 Fundamentos de las lagunas aerobias

Son lagunas que operan en presencia de oxígeno, en ellas se produce la degradación de la materia orgánica mediante la actividad de bacterias aerobias que consumen el oxígeno producido por las algas, mediante la fotosíntesis.

Reciben aguas residuales que han sido sometidas a previo tratamiento y que contienen relativamente pocos sólidos en suspensión.

Son de poca profundidad, de 0.8 a 1.5 metros, y con tiempos de retención elevados, de 20 a 30 días.

Su desventaja es que requieren de un gran terreno.

Las lagunas aerobias se pueden clasificar en:

- Lagunas aerobias: donde la aireación es natural. El oxígeno es suministrado por la actividad fotosintética de las algas y por el aire.
- Lagunas aireadas: donde se suministra oxígeno de manera mecánica, ya que la cantidad de oxígeno suministrado de manera natural es insuficiente.

1.1.3.2.2 Depuración en lagunas aerobias

La descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo en una masa de agua que contiene oxígeno disuelto. En este proceso, en el que participan bacterias aerobias o facultativas, se originan compuestos inorgánicos que sirven de nutrientes a las algas, las cuales a su vez producen más oxígeno que facilita la actividad de las bacterias aerobias. Existe pues una simbiosis entre bacterias y algas que facilita la estabilización aerobia de la materia orgánica.

El desdoblamiento de la materia orgánica se lleva a cabo con intervención de enzimas producidas por las bacterias en sus procesos vitales. El oxígeno consumido es parte de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

Las algas logran, en presencia de la luz solar, utilizar los compuestos inorgánicos para sintetizar materia orgánica que incorporan a su protoplasma. A través de este proceso, conocido como fotosíntesis, las algas generan gran cantidad de oxígeno disuelto.

Como resultado final, se lleva a cabo la estabilización de la materia orgánica putrescible (muerta) originalmente presente en las aguas residuales, la cual se transforma en materia orgánica (viva) incorporada al protoplasma de las algas. (Collado Arias, págs. 14-15).

Las lagunas puramente aerobias no son muy utilizadas en la actualidad. En su lugar, como tratamientos secundarios o superiores, se utilizan lagunas facultativas, que arrojan un mejor rendimiento, como se verá más adelante.

1.1.3.3 Lagunas facultativas

1.1.3.3.1 Fundamentos de las lagunas facultativas

Se puede decir que es una combinación de las dos anteriores, poseen una zona aerobia (superficie), una anaerobia (fondo) y una zona intermedia.

La zona intermedia es parcialmente aerobia y anaerobia, en la que la descomposición de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas. Los sólidos de gran tamaño se sedimentan para formar una capa de fango anaerobio. Los materiales orgánicos sólidos y coloidales se oxidan por la acción de las bacterias aerobias y facultativas empleando el oxígeno generado por las algas presentes cerca de la superficie. (Tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades, pág. 50).

1.1.3.3.2 Depuración en una laguna facultativa

La degradación de la materia orgánica tiene lugar principalmente, por la actividad metabólica de bacterias heterótrofas facultativas, que pueden desarrollarse tanto en presencia como en ausencia de oxígeno disuelto, aunque su velocidad de crecimiento, y por tanto la velocidad de depuración, es mayor en condiciones aerobias.

Las dos fuentes de oxígeno en lagunas facultativas son la actividad fotosintética de las algas y la reaireación a través de la superficie.

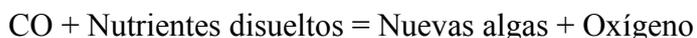
Este tipo de bacterias son capaces de autorregularse. La oxidación biológica es la conversión bacteriana de los compuestos orgánicos hasta compuestos inorgánicos oxidados, proceso que se conoce con el nombre de mineralización. Como ejemplo de estos procesos tenemos:



Las bacterias oxidan los productos de desecho para conseguir la energía y materias primas necesarias para la síntesis de las moléculas complejas de las que están formadas (proteínas, polisacáridos, etc.). El proceso global de oxidación bacteriana puede describirse mediante la siguiente ecuación:



Por su parte, las algas sintetizan la materia orgánica de la que están constituidas en presencia de luz, para lo que necesitan, además, dióxido de carbono y nutrientes disueltos:



De esta forma, si combinamos la actividad de algas y bacterias, el proceso global es el siguiente:

$$\text{Materia orgánica} = \text{Nuevas bacterias} + \text{Nuevas algas}$$

En conjunto se obtiene una estabilización de la materia orgánica, que se traduce en fuertes descensos de la DBO y DQO del agua a su paso por las lagunas facultativas. (Collado Arias, págs. 18-19).

1.1.3.3 Condiciones operativas en lagunas facultativas

Al igual que las lagunas anaerobias, los parámetros más utilizados para evaluar el comportamiento de las lagunas facultativas y la calidad de sus efluentes son la DBO y el NMP CF/100 ml. También tienen importancia los sólidos totales sedimentables, en suspensión y disueltos.

Se recomienda que las lagunas facultativas estén diseñadas para cargas orgánicas menores de 300 kg de DBO/ha-día para evitar problemas de malos olores y presencia de bacterias formadoras de sulfuros. Este límite es válido para temperaturas de 20 °C; a temperaturas mayores, el límite también aumenta.

A continuación se muestran otros parámetros de control en lagunas facultativas. (Collado Arias, pág. 23).

- **Temperatura**

Cuanto mayor sea la temperatura mayor será la actividad depuradora de las bacterias, aunque para temperaturas superiores a 28 °C las algas verdes son sustituidas por algas verdiazules con una menor actividad que las primeras.

- **Radiación solar**

La radiación solar es fundamental para la actividad fotosintética de las algas y, por tanto, para la producción de oxígeno de estas. Es por ello que el oxígeno disuelto en la laguna y el pH presentarán variaciones tanto a lo largo del día como en los diferentes periodos estacionales del año, repercutiendo esto sobre el rendimiento de la depuración.

- **Viento**

La acción del viento favorece la reaireación a través de la interface aire-agua y además su efecto de mezcla puede evitar el desarrollo de la estratificación térmica.

- **Evaporación**

Se considera que una evaporación de 5 mm diarios provoca efectos apreciables. El principal problema que puede causar la evaporación es el aumento de la salinidad del efluente en el caso de su reutilización para riego.

- **Precipitación**

Las lluvias provocan un aumento del caudal, disminuyendo el tiempo de retención y aumentando la carga orgánica debido a los sólidos que arrastran.

- **pH**

El pH de las lagunas facultativas está condicionado por la actividad fotosintética y la degradación de materia orgánica. Las algas en la fotosíntesis consumen CO₂ aumentando el pH, mientras que las bacterias al degradar la materia orgánica desprenden CO₂ disminuyendo el pH. Por tanto, cuanto mayor sea la intensidad luminosa mayor será el pH de la laguna.

Se considera que una laguna facultativa opera correctamente cuando tiene valores de pH entre 7.5 y 8.5.

- **Oxígeno disuelto**

El contenido en oxígeno disuelto es uno de los mejores indicadores del funcionamiento de la laguna. Tanto mayor sea la concentración de O₂, mayor será la depuración. Al igual que el pH, su valor oscila durante el día y durante los diferentes períodos estacionales.

- **Nutrientes**

La presencia de nutrientes (nitrógeno, fósforo y azufre) es indispensable para el buen funcionamiento de la laguna. El agotamiento sólo ocurre en épocas de gran actividad biológica y suele venir precedido por los máximos niveles de depuración.

- **Flujos**

Corrientes preferenciales que depende de la forma, el tamaño, la posición de las entradas y las salidas, etc.

- **Profundidad**

Además de influir en los fenómenos de estratificación también determinan el desarrollo de vegetación cuando es menor de un metro. Se diseñan con una profundidad de 1 a 2 metros.

- **Seres vivos**

Son fundamentales para el proceso de depuración: bacterias, algas, hongos y protozoos.

1.1.3.3.4 Problemas en lagunas facultativas

En la **tabla 1.3** se muestran las principales anomalías y problemas presentes en las lagunas facultativas, así mismo con los planes de acción que se deben tomar para contrarrestarlos.

De igual forma que en las lagunas anaerobias, las anomalías en las lagunas facultativas deben ser consideradas en los planes de mantenimiento de estas, de tal forma que asegure su correcto funcionamiento y así evite pérdida de dinero en reparaciones.

Tabla 1.3. Anomalías, problemas y soluciones presentes en lagunas facultativas.

Problemas	Causas	Soluciones
Aparición de malos olores	Sobrecarga, se detecta fácilmente por la disminución en la intensidad de la coloración verde, acompañada por un descenso en la concentración de oxígeno disuelto y el pH.	Aumentar el número de módulos de lagunas facultativas en servicio, si el diseño de la planta nos lo permite.
		Si la carga está ocasionada por vertidos estacionales, la primera medida a tomar es hacer un by-pass de la depuradora, paralizando la planta totalmente y dejando que las lagunas se recuperen por sí solas, hasta que se localicen las fuentes de estos efluentes y se tomen medidas al respecto.
		Si la sobrecarga se debe a un problema de diseño de las plantas, la única solución posible es intentar recircular parte del efluente a la entrada de las lagunas facultativas. Esto requiere la instalación de bombas, lo que no es posible, ya que muchas plantas de lagunaje no tienen instalación eléctrica.
	Cortocircuitos, pueden detectarse mediante la medida del oxígeno disuelto en varios puntos de la laguna. Las lecturas muy desiguales, pueden ser indicativas de esta anomalía en el régimen de flujo.	Rediseñar las entradas y salidas de laguna, con objeto de obtener una mejora en el régimen de flujo. En este proceso debe tenerse en cuenta el régimen de viento, y reorganizar la posición de la alimentación y el desagüe para que los vientos dominantes sean perpendiculares al eje principal de flujo.
		Intentar romper la estratificación térmica mediante la colocación de entradas y salidas en profundidad, mejorando así la mezcla en la laguna.
		Eliminar las plantas acuáticas.
	Períodos prolongados de mal tiempo, con bajas temperaturas e insolación.	Retirar los depósitos de sedimentos acumulados en el fondo.
Aislar las lagunas de la atmósfera colocando paja o poliestireno en la superficie, favoreciendo así la formación de costra aislante que mantiene la temperatura.		
Presencia de tóxicos o efluentes industriales en la alimentación	Es conveniente hacer un by-pass a la planta mientras se averigua el origen del vertido causante de las anomalías. Una vez localizado el culpable del vertido, las autoridades competentes les deben exigir que se depuren esos vertidos.	

Tabla 1.3-Continuación. Anomalías, problemas y soluciones presentes en lagunas facultativas

Problemas	Causas	Soluciones
Aparición de malos olores.	Reducción en la mezcla inducida por el viento, esto debido a árboles, vallas o edificios.	Siempre que el obstáculo que impide el libre acceso del viento a las lagunas sea eliminable, debe ser eliminado prontamente.
		Cuando el viento queda bloqueado por edificios, laderas de montaña u otros obstáculos de carácter permanente, debe considerarse la instalación de agitación artificial (aireadores de superficie), aunque se trate de una medida costosa y de mantenimiento complicado.
Acumulación de materias flotantes	Formación de costras debido a la acumulación de agregados de algas en superficie, especialmente después del desarrollo de algas verdiazules en épocas calurosas, que además de restringir el paso de la luz, pueden causar problemas de olores al pudrirse.	Los agregados de algas y los fangos flotantes pueden romperse mediante un chorro de agua de manguera dirigido hacia ellos desde la orilla de las lagunas, provocando su sedimentación en el fondo de las lagunas. Si la instalación no dispone de agua corriente, se puede esperar a que el viento arrastre los agregados hacia uno de los taludes y entonces romper los agregados por medio de un rastrillo, provocando así también su sedimentación.
	Flotación de parte del fango acumulado en el fondo de lagunas poco profundas, que puede dar lugar a la aparición de costras.	
	Presencia de papeles, plásticos, grasas y aceites no eliminados en el pre tratamiento.	Si se dispone de una red como las utilizadas para el mantenimiento de piscinas, ésta puede utilizarse para retirar cualquiera de las materias flotantes una vez que el viento las ha arrastrado hacia la orilla de la laguna.

Fuente: Collado Arias, I. (s.f.). "Reingeniería de la E.D.A.R. de Tarija- Operación, mantenimiento y control de las lagunas". Escuela Internacional de Ingeniería del Agua de Andalucía. España. Disponible en <http://prueba2.aguapedia.org/master/ebiblio/proyectos_Fc/proyecto_isabel_collado/DOCUMENTOS/ANEJOS/ANEJO%20N%C2%BA3%20LAGUNAS.pdf>. Consultado el 26 de febrero de 2013. pág. 33.

1.1.3.4 Lagunas de maduración

Estas lagunas tienen un efecto desinfectante, es decir que se utilizan para la eliminación de bacterias patógenas.

Otros objetivos de estas lagunas, como son la nitrificación del nitrógeno amoniacal, cierta eliminación de nutrientes, clarificación del efluente y consecución de un efluente bien oxigenado.

El esquema más habitual para el tratamiento de aguas residuales es el siguiente: una laguna anaerobia, seguida de laguna facultativa y por último una laguna de maduración; sin embargo, hay distintas variaciones sobre este esquema general, y muy a menudo se instala más de una laguna de maduración.

Las lagunas de maduración se construyen generalmente con tiempo de retención de 3 a 10 días cada una, mínimo 5 días cuando se usa una sola y profundidades de 1 a 1.5 metros. En la práctica el número de lagunas de maduración lo determina el tiempo de retención necesario para proveer una remoción requerida de coliformes fecales. (Tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades, pág. 52)

1.1.4 Esquema de un sistema de depuración por lagunaje

Un sistema de depuración por lagunaje consiste en un conjunto de lagunas de estabilización, puestas en serie para asegurar un mejor tratamiento de aguas residuales.

En la **figura 1.1** se muestra un esquema convencional para un sistema de lagunaje.

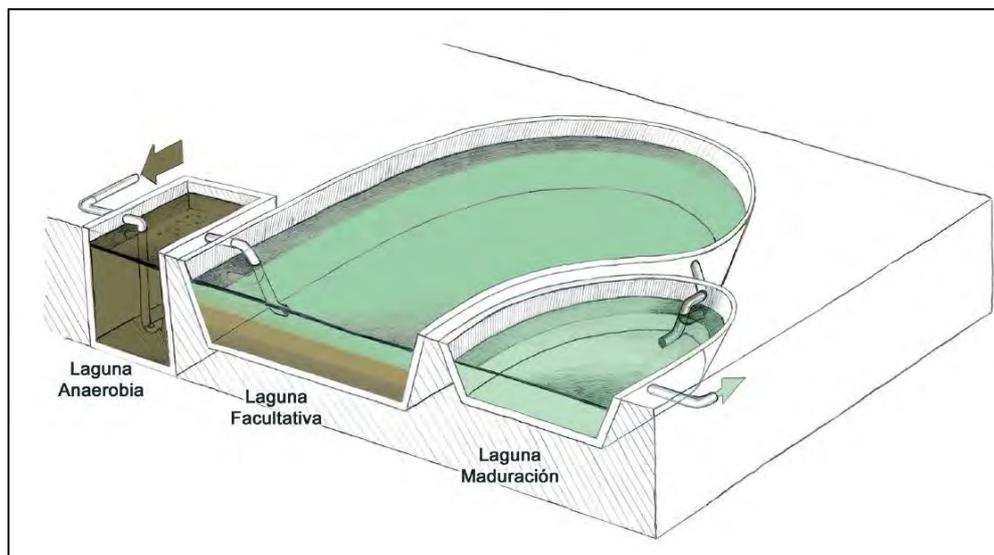


Figura 1.1. Esquema convencional de un sistema de lagunaje.

Fuente: Fuentes Beltrán, R. (s.f.). “*Lagunas de maduración - Sistemas de depuración natural - Tecnología para la depuración sostenible del agua residual*”. Disponible en <<http://depuranatura.blogspot.com/2011/05/lagunas-de-maduracion-la-tecnologia-de.html>>. Consultado el 23 de enero de 2013.

El agua residual, antes de llegar al primer tratamiento pasa por un sistema de cribas, el cual consiste en medios mecánicos de separación cuyo objetivo fundamental es retener los sólidos de gran tamaño y dejar pasar el agua residual.

Esta agua residual pasa a un primer tratamiento, el cual consiste en una laguna de estabilización anaerobia cuyo objetivo principal es la separación, por sedimentación, del

agua residual y de los sólidos suspendidos en estas aguas, los sólidos suspendidos quedan atrapados en el fondo de la laguna anaerobia, conformando los lodos residuales y el agua residual flotante pasa a un segundo tratamiento.

El segundo tratamiento consiste en una laguna facultativa, la cual asegura una mayor eficiencia en la descomposición de la materia orgánica, sin descuidar la sedimentación de sólidos suspendidos. En este tratamiento se obtienen aguas residuales de mayor calidad sanitarias y una menor cantidad de lodo residual en el fondo de la laguna.

El agua residual flotante pasa a un tercer tratamiento que consiste en una laguna de maduración, cuyo objetivo principal es la desinfección de estas aguas, es decir, una mayor eliminación de agentes patógenos. La sedimentación de sólidos suspendidos en este tercer tratamiento es casi nula.

1.1.5 Mantenimiento en los sistemas de lagunaje

En los sistemas de lagunaje se deben efectuar mantenimientos preventivos y correctivos, que aseguren el buen estado y la conservación de las unidades construidas y del equipo colocado en estos sistemas.

El mantenimiento preventivo se realiza para conservar en buen estado las instalaciones y equipos de la planta asegurando su buen funcionamiento futuro y alargando su vida útil. En este caso se establece la ejecución de rutinas de trabajo que se realizan con mayor, o menor frecuencia para prevenir desperfectos.

El mantenimiento correctivo consiste en la reparación inmediata de cualquier equipo o instalación que sufra daños imprevistos.

Para el mantenimiento de la superficie de la laguna, cuando se tienen grandes extensiones, se requiere, una lancha con un pequeño motor fuera de borda y remos. La lancha deberá ser insumergible.

Los dispositivos que requieren inspección y mantenimiento diario son las cribas o rejillas, desarenadores, vertedores, compuertas, estructuras de interconexión, de entrada y salida; asimismo, se deben verificar las condiciones superficiales de la laguna.

Por otra parte, las actividades de mantenimiento que se realizan en periodos más largos de tiempo, como pueden ser semanas, meses o años, incluyen:

- La reparación de bombas, compuertas, cercas y señales,
- pintado de elementos afectados por la corrosión,
- revisión de la profundidad de los lodos de las lagunas,
- conservación de los taludes, entre otras.

En esta investigación se pondrá énfasis en el tratamiento que se le da a los lodos residuales, como un método de mantenimiento de las lagunas de estabilización, lo cual se tratará ampliamente en el apartado **1.2**.

1.2 Generación de lodos residuales en las lagunas de estabilización

1.2.1 Lodos residuales en una laguna de estabilización

Los sólidos suspendidos que se sedimentan en las lagunas facultativas o anaeróbicas se acumulan en el fondo y forman lodos. A través de los años, estos lodos pueden afectar el funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales, ya que representan una reducción en el volumen útil, y, por lo tanto, el tiempo de retención hidráulica.

Generalmente, los lodos tienen que ser removidos con una frecuencia de 5 a 10 años en lagunas facultativas, y de 2 a 5 años en lagunas anaeróbicas. (Stewart M., 2005, pág. 175).

Para asegurar la sostenibilidad de los sistemas de lagunas se debe planear la remoción de los lodos desde el diseño de dichos sistemas y a lo largo de su operación.

1.2.2 Los objetivos de la remoción de lodos

- Minimizar futuros costos de mantenimiento correctivo de los sistemas de lagunas.
- Proteger la salud pública y conservar el medio ambiente.
- Permitir el funcionamiento adecuado del sistema durante el período de limpieza.

1.2.3 Etapas en la remoción de lodos

Para una correcta remoción de lodos de una laguna de estabilización se deben tener en cuenta los siguientes pasos mostrados a continuación. (Stewart M., 2005, págs. 175-186).

1.2.3.1 Caracterización de las lagunas de estabilización

Se deben caracterizar la laguna de estabilización, teniendo en cuenta los siguientes parámetros, mostrados en la **tabla 1.4**

Tabla 1.4. Características de una laguna de estabilización.

Parámetros	Descripción
Largo	Largo de la laguna medida al borde de esta.
Ancho	Ancho de la laguna medida al borde de esta.
Largo a la mitad	Largo de la laguna medida a la mitad de esta.
Ancho a la mitad	Ancho de la laguna medida a la mitad de esta.
Largo al fondo	Largo de la laguna medida al fondo de esta.
Ancho al fondo	Ancho de la laguna medida al fondo de esta.
Relación horizontal/vertical del talud interior	Por lo general es de 3/1. Se muestra en la figura 1.2 .
Profundidad	Profundidad de la laguna, sin considerar los lodos.
Área	Área de la laguna medida al borde de esta.
Área a la mitad	Área de la laguna medida a la mitad de esta.
Área al fondo	Área de la laguna medida al fondo de esta.
Volumen	Volumen de aguas residuales que puede almacenar la laguna.

Fuente: Stewart M., O. (2005). *“Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad”*. Honduras. pág. 230.

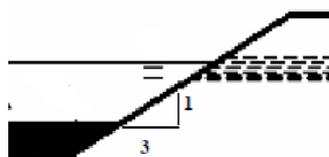


Figura 1.2. Talud Interior.

Fuente: Stewart M., O. (2005). “*Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad*”. Honduras. pág. 230.

1.2.3.2 Determinación del volumen de lodos

Se debe determinar el volumen de los lodos, depositados en el fondo de la laguna. La forma más sencilla de realizar esto es utilizar el método de la batimetría.

Este método consiste en medir la altura de los lodos acumulados utilizando para ello una barca que se desplazaba sobre una cuadrícula definida previamente y una regla graduada.

1.2.3.3 Extracción de lodos

Luego de haber determinado el volumen de lodos se debe proceder con la extracción de los lodos acumulados en el fondo de las lagunas, para lo cual se siguen los pasos mostrados en la **tabla 1.5**. Este es un proceso general y puede variar levemente, dependiendo de la situación específica de cada laguna.

Tabla 1.5. Proceso de extracción de lodos.

Proceso	Descripción
a. Interrumpir y desviar el afluente en la laguna.	<p>Se suspenden los flujos de agua entrantes a la laguna.</p> <p>Dependiendo sobre el diseño de la instalación, el desvío del agua puede ser a otra batería de laguna primaria en paralelo, o si no existe, a una laguna secundaria.</p> <p>El desvío debe ser por gravedad y no por bombeo, y se debe especificar si es necesario construir un canal temporáneo para el desvío, o si se pudiera utilizar los canales existentes, para este fin.</p>
b. Reducir el volumen de agua mediante evaporación.	<p>Se deja que la acción del sol evapore las aguas. Este proceso se realiza a la par con el proceso a y c.</p>
c. Reducir del volumen de agua mediante bombeo.	<p>Se extrae el agua por medio de bombas. Se debe drenar la laguna hasta alcanzar un nivel que permita la exposición de los lodos al ambiente. (Ver figura 1.3)</p>

Tabla 1.5-continuación. Proceso de extracción de lodos.

Proceso	Descripción
d. Secado de los lodos a la intemperie.	Se deja que se evapore naturalmente el agua. Se realiza cuando queda poca agua en la laguna, para evitar que el agua extraída previamente se contamine con los lodos (ver figura 1.4). Si las condiciones climáticas no permiten el secado de los lodos, estos se deben pasar a un estanque especial, en donde por medio de sedimentación se permita separar el agua de los lodos. (ver figuras 1.5)
e. Retiro con maquinaria	Los lodos se retiran con maquinaria pesada; como: orugas, cargadores frontales o excavadores; la elección de una u otra máquina depende del tamaño de la instalación. Es fundamental que el equipo no dañe la capa de arcilla al fondo de la laguna. (ver figuras 1.6 y 1.7)
f. Retiro utilizando mano de obra	Hay una fina capa de lodos que la maquinaria pesada no puede retirar, para esto se retiran manualmente, utilizando palas y carretillas. (ver figuras 1.8 y 1.9)
g. Almacenamiento.	Los lodos se almacenan en un terreno que se encuentre a la intemperie, para que continúen secándose. Se debe tener cuidado que los lodos no contaminen el terreno y no se mezclen con el piso de este.
h. Rellenado de la laguna limpiada y la puesta en marcha	Se debe rellenar la laguna con agua del cuerpo receptor o de pozo y después arrancarla.

Fuente: Stewart M., O. (2005). “*Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad*”. Honduras. pág. 186.

**Figura 1.3.** Extracción de agua por bombeo.

Fuente: Stewart M., O. (2005). “*Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad*”. Honduras. pág. 232.



Figura 1.4. Lodos secándose a la intemperie en laguna.

Fuente: Stewart M., O. (2005). *“Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad”*. Honduras. pág. 233.



Figura 1.5. Estanque especial para secado de lodos.

Fuente: Stewart M., O. (2005). *“Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad”*. Honduras. pág. 242.



Figura 1.6. Recogiendo lodos con maquinaria pesada.

Fuente: Stewart M., O. (2005). *“Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad”*. Honduras. pág. 235.



Figura 1.7. Retirando lodos de laguna.

Fuente: Stewart M., O. (2005). *“Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad”*. Honduras. pág. 235.



Figura 1.8. Cargando lodos con carretilla y pala.

Fuente: Stewart M., O. (2005). *“Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad”*. Honduras. pág. 236.



Figura 1.9. Retirando lodos con carretilla de la laguna.

Fuente: Stewart M., O. (2005). *“Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad”*. Honduras. pág. 236.

1.2.3.4 Caracterización de los lodos

Se deben realizar ensayos de laboratorio para determinar la composición física, química y biológica de los lodos. Para esto se deben tomar muestras de los lodos, el procedimiento es el siguiente:

- Se seleccionan los lugares de muestreo donde existe la mayor acumulación de lodos. Se debe sacar varias muestras en lugares diferentes para obtener el rango y promedio de valores posibles, para que así la muestra sea representativa. Para esto se puede cuadrangular el área y elegir puntos representativos para la toma de muestras.
- Utilizando una barrena se extraen de muestras de lodos a diferentes profundidades y en los diferentes puntos seleccionados.
- El mismo día de recolección se mandan todas las muestras en una hielera al laboratorio apropiado para su análisis.

En la **tabla 1.6** se muestran los parámetros que se deben analizar en el laboratorio.

Tabla 1.6. Parámetros de los lodos.

Tipo de análisis	Parámetros
Físico químicos	<ul style="list-style-type: none"> – Porcentaje de humedad. – Porcentaje de sólidos totales. – Porcentaje de sólidos fijos. – Porcentaje de sólidos volátiles. – Porcentaje de materia orgánica. – Porcentaje de carbono orgánico total. – Porcentaje de nitrógeno total. – Porcentaje de fósforo total. – Conductividad eléctrica. – pH.
Microbiológicos	<ul style="list-style-type: none"> – Coliformes totales. – Coliformes termotolerantes o fecales. – Huevos de helminto.

Fuente: Stewart M., O. (2005). “*Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad*”. Honduras. pág. 242 – 243.

1.2.4 Disposición final de los lodos

Una vez que los lodos se han removido y almacenado no se pueden dejar a la intemperie para siempre, ya que a la larga pueden representar un problema para la salud de los seres vivos que están en contacto con estos y un medio de contaminación para el medio ambiente.

En la actualidad, los posibles destinos que se le dan a los lodos son:

- Utilización directamente en la agricultura como abono.
- Utilización, previo tratamiento, como abono orgánico.
- Incineración, para generar energía eléctrica, mecánica o calorífica.
- Vertidos directamente al mar, ríos, lagos.
- Relleno de terrenos, escombreras, minas abandonadas, pantanos, etc.

Antes de utilizar los lodos para cualquiera u otro de los anteriores destinos, se les deben dar un tratamiento que asegure el correcto aprovechamiento de estos lodos.

Los tratamientos estándares que le dan a los lodos son: la estabilización, el espesado y la desinfección.

1.2.4.1 Estabilización del lodo

Este proceso se lleva a cabo principalmente para:

- Reducir la presencia de patógenos.
- Eliminar los olores desagradables.
- Reducir o eliminar su potencial de putrefacción.

El desarrollo de los microorganismos sobre la materia orgánica de los lodos es lo que ocasiona la supervivencia de microorganismos patógenos y la proliferación de olores desagradables en estos lodos.

Las técnicas de estabilización de lodos más utilizadas son: la digestión anaerobia, la digestión aerobia, la estabilización con cal, el tratamiento térmico, y el compostaje.

1.2.4.1.1 Digestión anaerobia

En este proceso se degrada la materia orgánica contenida en el lodo, en ausencia de oxígeno. La materia orgánica contenida en los lodos se convierte, principalmente, en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), para lo cual se utilizan reactores completamente cerrados. (Tratamiento de lodos, pág. 14)

El proceso de digestión se produce en tres etapas:

- Rompimiento de las moléculas grandes de materia orgánica en sus monómeros (hidrólisis).
- Acidogénesis, se refiere a la conversión bacteriana de los monómeros generados (carbohidratos, ácidos grasos y aminoácidos) en compuestos intermedios identificables de menor peso molecular.
- Metanogénesis, implica la conversión bacteriana de los compuestos intermedios en productos finales más simples, principalmente metano y dióxido de carbono.

El gas de digestión, producido en la última etapa, contiene aproximadamente 65 - 70 % metano (CH_4) y 25 - 30 % dióxido de carbono (CO_2). Este gas se puede emplear como combustible para calderas y motores de combustión interna.

Los tipos de digestores anaerobios pueden ser:

- Digestores de baja carga, en los que no se mezcla ni calientan los lodos puestos en el mismo. Su periodo de retención varía entre 30 y 60 días.
- Digestores de alta carga, en los que se mezcla y se calientan los lodos puestos en el mismo. Su periodo de retención generalmente es de 15 días. Su desventaja es que necesitan mayor energía para funcionar.

1.2.4.1.2 Digestión aerobia

Este proceso se realiza en presencia de oxígeno. El tejido celular de los lodos se oxida a dióxido de carbono, amoníaco y agua. En la práctica sólo se puede oxidar entre 75 y 80 % del tejido celular, puesto que el resto está formado por componentes orgánicos no biodegradables. (Tratamiento de lodos, s.f., pág. 16).

1.2.4.2 Espesado (concentración)

Este proceso se emplea para aumentar el porcentaje de sólidos en el lodo, por medio de la reducción del porcentaje de líquidos en el mismo, con lo que se logra disminuir el volumen de los lodos.

Al reducir el volumen del lodo se puede aumentar la eficiencia en otros procesos de tratamiento. Los tanques y los equipos necesarios manejarán más unidades de lodos por unidad de tiempo, la cantidad de reactivos químicos y la cantidad de energía necesaria en los digestores necesarios para el acondicionamiento del lodo será menor.

Los procedimientos utilizados para el espesado se muestran a continuación. (Tratamiento de lodos, s.f., págs. 17-18).

1.2.4.2.1 Espesado por gravedad o sedimentación

Se aplican en tanques de sedimentación. El lodo almacenado en los tanques sedimenta y compacta; en la parte inferior se origina un lodo espesado, el cual se extrae por la misma parte inferior del tanque para ser dirigido a otros tratamientos, y en la parte superior se origina un lodo sobrenadante que se retorna al tanque sedimentador primario.

1.2.4.2.2 Espesado por centrifugación

En este proceso se aplica la fuerza centrífuga para separar las moléculas sólidas de las moléculas líquidas. Se logra una concentración y deshidratación de los lodos.

1.2.4.2.3 Espesado por flotación

Este proceso consiste en introducir aire a una solución de lodo que se mantiene a una presión determinada, cuando la presión en la solución baja se empieza a formar burbujas de aire que arrastran las moléculas de lodo a la parte superior, en donde son separadas por una desnatadora.

1.2.4.3 Desinfección

Permite controlar el contacto de los lodos con organismos patógenos. Algunos procesos de estabilización, como la digestión anaerobia y digestión aerobia permiten reducir considerablemente la presencia de organismos patógenos, pero no desinfectan completamente el lodo.

Los procesos más adecuados para la desinfección de lodos son la pasteurización y el almacenamiento a largo plazo. (Tratamiento de lodos, s.f., pág. 18).

1.2.4.3.1 Pasteurización

Los métodos más usados para lograr este proceso son la inyección de vapor, y el intercambio directo de calor. Los equipos que se emplean actualmente para la pasteurización del lodo pueden resultar poco rentables, debido a sus altos costos de inversión.

1.2.4.3.2 Almacenamiento a largo plazo

El lodo se suele almacenar en lagunas excavadas en el suelo. El lodo almacenado en lagunas aumenta su concentración y sufre un proceso de estabilización.

1.3 Tratamiento de los lodos para su aprovechamiento en agricultura: Compostaje

Los lodos removidos de una laguna de estabilización no se pueden aplicar directamente como acondicionador de suelos en la agricultura. Para ello, los lodos deben pasar por un tratamiento llamado compostaje o compostación.

1.3.1 Concepto de compostaje

El compostaje o compostación es un proceso biológico mediante el cual los residuos o basuras de origen orgánico son reducidos, a través de una acción bacteriológica, a un material estable denominado compost.

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 vivos.

1.3.2 El compost

El compost es un abono orgánico que resulta de la degradación de residuos orgánicos tanto vegetales como minerales transmitidos por la micro flora y la micro fauna del suelo en una sustancia que mejora la estructura y estabilidad de la tierra. (Ruiz, 2002, pág. 3).

Representa uno de los mejores abonos orgánicos, ya que puede obtenerse de forma fácil y además permite mantener la fertilidad de los suelos con excelentes resultados en el rendimiento de los cultivos.

Abono orgánico es un producto que posee de una manera equilibra los micronutrientes necesarios para las actividades bioquímicas de las plantas. Se clasifican en dos tipos:

- Abono orgánico líquidos: biol, te de humus, te de compost.
- Abono orgánico sólido: compost, humus de lombriz, bokashi, abonos verdes.

1.3.3 Beneficios del compost

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

Un suelo será más fértil mientras más nutrientes y materia orgánica contenga. Las plantas consumen la materia orgánica y los nutrientes del suelo; debido a ello, mientras más tiempo transcurra ese suelo se quedará con menos nutrientes y materia orgánica. Un suelo pobre en materias orgánicas y nutrientes, tales como: nitrógeno, potasio y fósforo pueden hacer que se obtenga un bajo rendimiento en las cosechas. El compost es rico en estos nutrientes y materia orgánica, es por ello que su aplicación en los suelos es muy beneficiosa. (Mendoza Juárez, 2012, pág. 13).

Los fertilizantes químicos aportan más nutrientes al suelo que el compost, pero este, aporta más materia orgánica. Hay que tener en cuenta que si se aplica al suelo fertilizantes químicos y no orgánicos, con el tiempo esto traerá consecuencias negativas como el empobrecimiento de la tierra de cultivo, lo que a su vez origina una falta de capacidad de las raíces de las plantas para absorber los nutrientes de estas tierras, por lo que se verán expuestas a enfermedades y a plagas.

1.3.4 Sistemas de compostaje

Según el autor Dios Perez (2008, págs. 49-53), se pueden distinguir dos tipos sistemas de compostaje: abierto y cerrado, los cuales se explican a continuación.

1.3.4.1 Sistemas de compostaje abierto

Consisten en la formación de pilas, agrupando los residuos en montones o montículos. Los materiales se deben apilar sin que se compriman mucho, para así permitir la correcta aireación de estas pilas, lo que a su vez representa la parte fundamental en el proceso de compostaje.

Los sistemas de compostaje abierto se clasifican en:

- **Sistemas con pilas estáticas**

En este sistema no se realizan volteos en las pilas, el aire se suministra por medios mecánicos como la aireación forzada o la aireación inducida.

- **Sistemas con pilas dinámicas**

En este sistema la aireación es natural y se da por medio de volteos en la pila. La frecuencia de los volteos depende del tipo de material, de la humedad y de la rapidez con que se interese llevar a cabo el proceso. Si el intervalo de tiempo entre los volteos es grande, la escasez de oxígeno puede hacer que se necesite un mayor tiempo para la obtención del compost, pero si el intervalo de tiempo es pequeño, afectaría el desarrollo de algunos de los microorganismos que intervienen en el proceso. Lo más recomendable es que los volteos se realicen con alta frecuencia, aproximadamente una vez por semana.

1.3.4.2 Sistemas de compostaje cerrados

Se basan en la utilización de un reactor o digestor. Sus costos de instalación son superiores al de las pilas, pero su ventaja es que se pueden controlar las condiciones del proceso, lo que

permite la aceleración del mismo; otra ventaja es que se necesita de menos espacio para trabajar con una misma cantidad de volumen de residuos, comparado con el sistema de pilas.

Dentro de los sistemas cerrados se tiene:

- **Concentradores o reactores verticales**

Miden entre 4 y 9 metros de alto, en este sistema el proceso es difícil de controlar, dado que resulta complicado mantener uniforme la proporción de oxígeno para la masa del material. El oxígeno se inyecta por la parte de abajo del reactor, lo que ocasiona que la parte de material que se encuentra en dicha zona se enfríe demasiado, y por el contrario, la parte de arriba de material no llegue a oxigenarse por completo.

- **Tambores o reactores horizontales**

Son cilindros de acero rotantes. El tiempo de retención de los materiales en el reactor oscila entre 1 y 2 días, lo que no es suficiente para un verdadero compostaje, solo permite una iniciación de este. La principal ventaja de este sistema es 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 de entre 30 m y 59 m, con un ancho y altura de 4 m a 6 m. Con este sistema si se dispone de un compostaje completo.

1.3.5 El proceso del compostaje

Cuando la materia orgánica se oxida por 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 materia orgánica que queda es muy resistente al ataque microbiano. A medida que el proceso de compostaje avanza, los compuestos orgánicos que se degradan van oxidándose y convirtiéndose en materiales húmicos cada vez menos biodegradables, pero a una velocidad más pequeña comparada con la velocidad inicial.

El compostaje se lleva a cabo en dos fases: descomposición y maduración de la materia orgánica.

1.3.5.1 Descomposición de la materia orgánica

La fase de descomposición depende totalmente del tipo de material a tratar, de las características del sistema a aplicar y de las condiciones de trabajo, por lo que puede durar de unas pocas semanas a varios meses.

Es la más exigente del proceso, y el no realizarla en condiciones adecuadas puede representar problemas para la siguiente fase, generar la aparición de problemas de lixiviados y malos

lores, y además influir en la calidad del producto final. (Montserrat & Huerta, 2004, pág. 5).

Según Álvarez (2009, págs. 16-17), la fase de descomposición se lleva a cabo en tres etapas, las que se explican a continuación.

1.3.5.1.1 Primera etapa (mesofílica)

En esta etapa diversas familias de microorganismos, como bacterias y hongos mesofílicos, inician la descomposición de los compuestos fácilmente degradables, provocando un incremento de la temperatura (hasta unos 45 °C) y una disminución del pH debido a la formación de ácidos orgánicos.

En esta etapa se debe mantener la humedad entre 40 % y 60 %, dado que el agua distribuye los nutrientes por toda la masa.

1.3.5.1.2 Segunda etapa (termofílica)

Durante esta etapa se alcanzan temperaturas 75 °C, causando la muerte de los microorganismos mesofílicos, presentes en la etapa anterior, y la aparición de microorganismos termofílicosⁱ. Si se alcanza los 60 °C los hongos termofílicos se inactivan y la descomposición es llevada a cabo por actinomicetosⁱⁱ y bacterias formadoras de esporas.

Las sustancias fácilmente degradables, como azúcares, grasa, almidón y proteínas, son rápidamente consumidas y la mayoría de patógenos humanos y vegetales son destruidos.

Se libera amoníaco, por tanto el pH se va estabilizando, permaneciendo constante hasta el final del proceso. Las proteínas presentes en el material, como la celulosa y ligninas son parcialmente alteradas.

1.3.5.1.3 Tercera etapa (enfriamiento)

En esta etapa la energía y los nutrientes empiezan a disminuir, la actividad de los microorganismos termofílicos disminuye, por lo que la temperatura también lo hace hasta llegar a la temperatura ambiente. Los microorganismos mesofílicos reinvasan el material a compostar cuando se llegan a temperaturas de 40 °C a 45 °C, siguiendo con el proceso hasta que toda la energía sea utilizada.

1.3.5.2 Maduración de la materia orgánica

La maduración depende del tipo de material que se ha tratado anteriormente, pero su duración y las condiciones en que se deba llevar a cabo dependerán mucho del destino final del producto.

En esta fase se genera mucho menos calor y el pH se mantiene ligeramente alcalino.

ⁱ Los microorganismos termofílicos termófilos son aquellos que se desarrollan a temperaturas superiores a 40 °C, pudiendo superar incluso los 100 °C (hipertermófilos) siempre que exista agua en estado líquido.

ⁱⁱ Los actinomicetos son un grupo heterogéneo de bacterias filamentosas parecidas superficialmente a los hongos.

Los microorganismos mesofílicos, al igual que diversos tipos de microfauna colonizanⁱⁱⁱ el compost medio maduro. Se genera una intensa competición por los alimentos, aparecen antagonismos^{iv} y se forman antibióticos^v que son los responsables de la eliminación de las bacterias y de otros agentes patógenos; obteniéndose al final un producto, más o menos estable (compost). (Montserrat & Huerta, 2004, pág. 5).

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.

1.3.6 Organismos patógenos en el compost

En el compost se pueden encontrar muchos microorganismos patógenos que pueden ser eliminados cuando la temperatura en las pilas se encuentra entre los 55 °C y 70 °C en intervalos de tiempo que pueden ir de 3 a 60 minutos. La eliminación de patógenos hace que el abono orgánico no sea contaminante.

En la **tabla 1.7** se muestra los principales patógenos presentes, así como las temperaturas y el tiempo que deben estar expuestos para que sean eliminados.

Tabla 1.7. Temperaturas y tiempos para la destrucción de patógenos.

Microorganismo	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

Fuente: Silva V., J. P., López M., P., & Valencia A., P. (s.f.). “Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje”. Universidad del Valle - Facultad de Ingeniería.

Cali - Colombia. Disponible en

<<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/compostaje.pdf>>. Consultado el 20 de enero de 2013. pág. 6.

ⁱⁱⁱ Colonizar se refiere al fenómeno por el cual una parte de una población animal o vegetal introducida en un nuevo ecosistema se establece y se reproduce, hasta volverse omnipresente.

^{iv} El antagonismo es una relación biológica interespecífica en la que uno de las especies resulta beneficiada a expensas de la otra.

^v Antibiótico es una sustancia química producida por un ser vivo o derivada sintética de ella que mata o impide el crecimiento de ciertas clases de microorganismos sensibles, generalmente bacterias.

Cuando el material se someta a una temperatura de 55 °C, la mayoría de agentes patógenos será destruido, solo unos pocos quedarán. Para eliminar por completo todos los patógenos presentes, se debe dejar que el material llegue a 70 °C por un periodo de 1 o 2 horas.

1.3.7 Índices de calidad del compost

El compost como producto final debe cumplir con ciertos estándares de calidad adecuados que aseguren proteger el ambiente y la salud pública. Estos estándares se miden con parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

En la **tabla 1.8** se muestran los rangos permisibles de los parámetros físicos y químicos más representativos del compost.

Tabla 1.8. Especificaciones referenciales de la calidad del compost.

Parámetro	Rango permisible
Humedad (%)	40 – 60
Tamaño de partícula (mm)	5 – 10
Materia orgánica (%)	25 – 50
Carbono orgánico (%)	8 – 50
Nitrógeno total (%)	0.4 – 3.5
Fósforo como P ₂ O ₅ (%)	0.3 – 3.5
Potasio como K ₂ O (%)	0.5 – 1.8
Cenizas (%)	20 – 65
Calcio como CaO (%)	20 – 65
Relación C:N	< 15
pH	6.5 – 8

Fuente: Cantanhede, A., Monge, G., & Wharwood, G. (s.f.). "Compostificación de residuos de mercado". Empresa de Servicios Municipales de Limpieza de Lima - Perú. Disponible en <<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/composti.pdf>>. Consultado el 02 de febrero de 2013. pág. 29.

Se observa que los parámetros son muy amplios, debido a las características físico-químicas iniciales de los materiales a compostar.

1.3.7.1 Parámetros físicos

1.3.7.1.1 Humedad

La humedad en la pila de compostaje se relaciona directamente con la actividad microbiana, la oxigenación y la temperatura en este. La presencia de agua favorece al transporte de nutrientes y sustancias en la pila, lo que origina que los microorganismos tengan más accesibilidad a estos.

La humedad ideal se encuentra en el rango de 40 % y 50 %, dependiendo de los materiales a compostar y el método de compostaje que se utilice; los rangos de 40 % y 70 % son tolerables.

Valores superiores al 70 % originan una inundación en la pila de compostaje, lo que imposibilita el movimiento de oxígeno en este; por el contrario, valores menores al 40 % generarán poco calor en la pila, disminuyendo la actividad microbiana y haciendo el proceso cada vez más lento, hasta que se detenga, por deshidratación de los microorganismos. (Mendoza Juárez, 2012, pág. 9)

1.3.7.1.2 Temperatura

Representa un factor determinante a lo largo del proceso de compostaje. La pila debe estar en un rango específico de temperatura para asegurar la supervivencia de la actividad microbiana.

A lo largo de todo el proceso de compostaje la temperatura sufre cambios, debido a la interacción de los materiales con los diferentes grupos de microorganismos.

Al inicio los materiales se encuentran a una temperatura ambiente, luego de dos a seis días se puede llegar hasta los 45 °C. Esto debido al metabolismo de los microorganismos exotérmicos y a la biodegradación de los sustratos, por lo que existe una liberación de calor que genera un aumento de la temperatura.

Luego la temperatura sigue aumentando, hasta alcanzar unas temperaturas de 60 °C a 70 °C; aquí las semillas de maleza y muchos agentes patógenos se eliminan. Posteriormente la temperatura desciende gradualmente hasta volver alcanzar los valores de temperatura ambiente.

En la **tabla 1.9** se muestra la relación de las etapas del proceso de compostación con las temperaturas que se logran alcanzar.

Tabla 1.9. Relación de las etapas del proceso de compostaje y la temperatura.

Fase	Etapas	Temperatura (°C)
Descomposición	Etapas mesofílica	20 a 45
	Primera etapa termofílica	45 a 65
	Segunda etapa termofílica	65 a 75
	Etapas de enfriamiento	75 a 45
Maduración	Etapas de maduración	46 a 25

Fuente: Silva V., J. P., López M., P., & Valencia A., P. (s.f.). "Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje". Universidad del Valle - Facultad de Ingeniería. Cali - Colombia. Disponible en

<<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/compostaje.pdf>>. Consultado el 20 de enero de 2013. pág. 10.

1.3.7.1.3 Tamaño de partículas

Al reducir el tamaño de los materiales se garantiza una correcta aireación y una buena superficie de acción para los microorganismos, lo que acelera las reacciones bioquímicas de estos.

Partículas grandes reducen la superficie de contacto que atacan los microorganismos, ocasionando que el tiempo de descomposición se alargue, además pueden presentarse pérdidas de humedad y menor transferencia de oxígeno. En caso contrario, partículas muy pequeñas originan que el material se concentre y se produzca fácilmente la putrefacción de estos.

Cuando el compost esté listo para usarse, su tamaño ideal debe ser de 0.5 cm a 1 cm, dado que esto permite un mejor nivel de aireación al momento de aplicarlo al suelo. (Mendoza Juárez, 2012, pág. 17).

1.3.7.1.4 Color y olor

El compost varía de un marrón claro hasta un marrón oscuro, dependiendo del tipo de materiales que se usaron para su fabricación y del grado de maduración de estos. Su olor debe ser parecido al de tierra de bosque húmedo.

1.3.7.2 Parámetros químicos

1.3.7.2.1 pH

Este parámetro indica si un producto es ácido, alcalino o neutro, con valores menores a 7, superiores a 7 e iguales a 7, respectivamente. Los microorganismos que hacen posible la descomposición de la materia no toleran valores de pH superiores a 7, es por eso que conviene que el compost sea lo más neutro posible. En caso de volverse muy alcalino o muy ácido el proceso de compostaje se ralentizará, pudiendo llegar hasta detenerse.

El pH varía con el tiempo en un proceso de compostaje. En los primeros días los hongos toleran un margen de pH entre 5 y 8, debido a que los productos iniciales 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 entre un rango de 6.5 y 8. (Silva V., Lopez M., & Valencia A., pág. 12).

1.3.7.2.2 Nitrógeno total

El contenido total de nitrógeno en el compost puede variar, dependiendo de la materia prima, las condiciones del proceso, la maduración y el almacenaje.

En el transcurso del proceso de compostaje el contenido del nitrógeno disminuye con la volatilización del amoníaco, pero este es captado, transformado e incorporado a los microorganismos, es por eso que presentan pérdidas importantes de este elemento, debido a la rapidez e intensidad de los fenómenos bioquímicos en los primeros días de la fermentación. Una buena fermentación aerobia no debe perder más del 20 % de la cantidad de nitrógeno de inicial.

Los microorganismos utilizan el nitrógeno, junto con otros elementos, para la síntesis de proteínas (nutrientes), un exceso de nutriente puede traer como consecuencia un crecimiento bacteriano y podría acelerarse la descomposición de la materia orgánica, pero esto provocaría un déficit de oxígeno, por lo que el proceso se vuelve anaerobio; sin embargo, la

falta de nitrógeno en el proceso generaría un deficiente crecimiento del cultivo microbiano. (Dios Perez, 2008, pág. 60).

1.3.7.2.3 Materia orgánica

La eficiencia en la degradación de la materia orgánica en el proceso del compostaje depende inicialmente y primordialmente de las comunidades microbianas. A través de diferentes tipos de enzimas hidrolíticas los microorganismos desempeñan la degradación de materiales orgánicos.

Muchas de estas enzimas controlan parte de la velocidad a la que los sustratos orgánicos son degradados.

Dentro de las importantes enzimas que intervienen en el proceso de degradación de la materia orgánica destacan las siguientes: “celulasas, despolimerasa celulosa, B-glucosidasa que hidroliza glucósidos, Ureasa que participan en la mineralización del nitrógeno, fosfatasas y arylsulfatasa que elimina los grupos de fosfato y de sulfatos de los compuestos orgánicos. (Mendoza Juárez, 2012, pág. 9).

1.3.7.2.4 Carbono orgánico

La descomposición de la materia orgánica está provocada por microorganismos que utilizan el carbono como fuente de energía. El proceso exige más carbono que nitrógeno, pero cuando el exceso de carbono es considerable, el tiempo necesario para la descomposición se aumenta a partir del momento en el cual las reservas de nitrógeno son consumidas y ciertos microorganismos mueren. El nitrógeno que estos microorganismos habían 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 un nivel más satisfactorio y el nitrógeno es reintroducido en el ciclo. (Dios Perez, 2008, págs. 59-60).

1.3.7.2.5 Relación carbono / nitrógeno

La relación carbono / nitrógeno expresa las unidades de carbono por unidad de nitrógeno que contiene el material y sirve como indicador del grado de avance del proceso. El carbono es una fuente de energía para los microorganismos, y el nitrógeno es un elemento necesario para la síntesis de nutrientes, por lo que una buena relación de estos elementos favorecerá un buen crecimiento y reproducción de los microorganismos.

Se considera que una relación carbono / nitrógeno de 20/30 es la adecuada para el comienzo y desarrollo del proceso de compostaje, ya que los microorganismos consumen aproximadamente 25 partes de carbono por cada una de nitrógeno. Por encima de estos valores se retrasa innecesariamente el proceso y si la relación no alcanza un balance óptimo el sistema microbiano va a sufrir un desarrollo diferente del requerido para obtener una comunidad biológica óptima. (Dios Perez, 2008, pág. 60).

Para asegurar un equilibrio en esta relación, materiales con alto contenido de carbono deben mezclarse con materiales con alto contenido de nitrógeno.

Cuanto menor sea el valor de la relación C/N, mayor será el grado de mineralización (liberación de nitrógeno orgánico, mediante su transformación en amonio) de la materia

orgánica y, por tanto, la calidad edáfica del compost será superior. En la parte final del proceso de compostaje se prefiere tener una relación C/N baja, como se muestra en la siguiente **tabla 1.10**.

Tabla 1.10. Calidad edáfica del compost en base a su relación carbono / nitrógeno.

Relación C/N	Calidad del compost
< 8	Muy buena
8 – 10	Buena
12 – 15	Mediana
15 – 20	Deficiente
20 -30	Mala
> 30	Muy mala

Fuente: Arrea, G., Calvo, N., García, D., & Hernando, J. (s.f.). “*Relación C/N en un suelo*”. Disponible en <af2.wikispaces.com/file/view/Relación+C.N.doc>. Consultado el 24 de junio de 2013. pág. 1.

1.3.7.2.6 Fósforo total

El fósforo es muy importante en la maduración tanto de las flores, semillas y frutos de las plantas, dado que intervienen en el desarrollo y formación de las raíces, es por eso que este elemento es muy importante en el compost, por los beneficios que le pueda otorgar a la planta al momento de aplicarlo. Su proporción en el compost varía entre 0.3 % y 3.5 % en forma de óxido fosfórico (P_2O_5) y depende del tipo de materiales que han sido utilizados en el compostaje. (Mendoza Juárez, 2012, pág. 10).

1.3.7.2.7 Potasio total

El potasio es muy importante en el desarrollo de las plantas, porque hace que las raíces y tallos crezcan fuertes y que las semillas, los frutos y las hojas de las plantas sean grandes, proporcionando resistencias ante las plagas que puedan atacar, además colabora con la circulación de otros nutrientes alrededor de la planta, por ello es muy importante que este elemento esté presente en el compost.

1.3.7.3 Parámetros microbiológicos

El 95 % de los microorganismos que atacan la materia orgánica lo conforman bacterias y hongos, que son los principales responsables de la actividad microbiológica para descomponer los materiales, el otro 5 % lo conforman los actinomicetos y protozoos.

Durante el proceso de compostaje pueden ocurrir cambios significativos. Algunas especies de microorganismos se multiplican rápidamente, y luego empiezan a desaparecer (mueren), favoreciendo el crecimiento de otras especies de microorganismos, esto debido a factores físicos y químicos, como la humedad, disponibilidad de oxígeno, variación de pH y la temperatura.

En la **tabla 1.11** se muestran los valores de los índices de calidad microbiológica del compost, estos rangos presentan un aproximado de entre que valores se encuentran las poblaciones microbiológicas que existen en el compost para la aplicación tanto en el suelo como en plantas.

Tabla 1.11 Índices de calidad microbiológica del compost.

Grupos funcionales	UFC / g de compost
Bacterias totales	5×10^{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	1×10^5
<i>Pseudomonas</i>	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^4$
<i>Salmonella spp</i>	Ausente en 25 g de compost

Fuente: Álvarez, J. (2009). “La calidad del suelo y del compost del parque de Itchimbia en su proceso de recuperación”. Quito – Ecuador. pág. 14.

En la **tabla 1.12** se presentan las normativas existente para definir la calidad del abono orgánico, según el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), la norma chilena (NCh.2880.2003) y la norma 503 de la EPA (Agencia de Producción Ambiental), quienes recomiendan los valores permisibles de microorganismos patógenos que pueden existir en el compost.

Tabla 1.12. 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 / 4g de compost	< 3 UFC / 4g de compost	Ausencia
Huevos de helminto viables.			Ausencia

Fuente: Bonilla, M., & Mosquera, M. (2007). “Seguimiento de la presencia de rotavirus a un proceso de compostaje realizado a partir de los residuos orgánicos domiciliarios y contenido rumial”. Pontificia Universidad Javeriana - Facultad de Ciencias - Carrera de Microbiología Industrial y Microbiología Agrícola y Veterinaria. Bogotá - Colombia. pág. 50 ; Gomez Palacios, J., & Estrada de Luis, I. (2005). “Índices de calidad de suelos y compost desde la perspectiva agro-ecológica”. II Congreso sobre residuos biodegradables y compost. Sevilla - España. Disponible en http://www.bpeninsular.com/pdfs/Ponencia_ISR_Sevilla.pdf. Consultado el 19 de enero de 2013. pág. 6.

En Perú no existe una norma para este tema, es por eso que se han considerado estas tres normas extranjeras como referencia.

1.3.7.3.1 Población total de bacterias

La población total de bacterias se encarga de la descomposición de las proteínas, lípidos y grasas. Las bacterias presentes en el proceso de compostaje tienen mucha mayor predominancia en la actividad microbiológica que los hongos, por lo que la población tal de

bacterias depende directamente del tipo de material que se use inicialmente y de las condiciones ambientales del lugar de compostaje.

Suelen ser aerobias y se pueden clasificar de acuerdo a la temperatura en que se desarrollen, por ejemplo, cuando el sistema se encuentra entre 20 °C y 40 °C las bacterias que se desarrollan son las mesofílicas y cuando el sistema está entre 40 °C y 75 °C las bacterias son termofílicas.

1.3.7.3.2 Población total de hongos

Son muy importantes 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 a una temperatura de 55 °C.

1.3.7.3.3 Microorganismos termotolerantes

Se debe asegurar la no presencia de estos microorganismos en el compost. Si se llega a usar compost con presencia de estos microorganismos en el suelo o plantas, se puede causar daños a las plantas directamente, a los animales que se alimentan de los frutos de estas plantas, a los animales que se alimentan de estos animales y a los seres humanos que finalmente se alimentan de los frutos de las plantas y de algunos animales, toda la cadena se ve involucrada.

Los microorganismos termotolerantes o coliformes fecales son capaces de resistir altas temperaturas, es por ello que en el transcurso del proceso de compostaje se logran eliminar a temperaturas de entre 60 °C y 70 °C con un tiempo de exposición de uno a 2 días. (Mendoza Juárez, 2012, págs. 11-12).

1.3.8 Metodología general utilizada para la obtención del compost

La metodología para la obtención del compost se adaptó de Cogger, Sullivan, & Kopri (2001, págs. 5-6).

1.3.8.1 Selección de las materias primas a utilizar

Es recomendable para la preparación del compost utilizar una mezcla de varias materias primas, que presenten cantidades adecuadas de humedad, aire y materia orgánica, para que el compostaje se realice rápidamente. La materia orgánica sirve de comida para las bacterias de descomposición.

Hay tres tipos de materias primas. Algunas suplen energía, otras tienen volumen, y otras proveen una combinación de energía y volumen.

En la **tabla 1.13** se muestran diferentes tipos de materia prima utilizados para la compostación y las características que aportan a la mezcla

Tabla 1.13. Principales materias primas utilizadas en la elaboración del compost.

Tipo de materia prima	Aporte	Características	Materia prima
Materiales de alta energía	Energía al montículo	Mucha humedad, baja porosidad, alto nivel de nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Recortes de césped. • Estiércol de vacas, pollos o conejos. • Desperdicios de frutas y legumbres. • Recortes de plantas verdes.
Materiales voluminosos	Volumen al montículo	Poca humedad, alta porosidad, bajo nivel de nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Astillas de madera • Aserrín • Heno de hierba • Paja • Tallos de maíz
Materiales equilibrados	Combinación de energía y volumen al montículo	Humedad baja o mediana, porosidad mediana, nivel de nitrógeno mediano	<ul style="list-style-type: none"> • Recortes de árboles o arbustos molidos. • Estiércol de caballos con paja. • Hojas deciduas. • Heno de plantas leguminosas.

Fuente: Cogger, C., Sullivan, D., & Kopri, J. (2001). *“Como hacer y usar el compost”*. Universidad Estatal de Oregon - Departamento de Agricultura. Oregon - Estados Unidos. Disponible en <<http://extension.oregonstate.edu/catalog/pdf/ec/ec1544-se.pdf>>. Consultado el 19 de enero de 2013. pág. 3

Los materiales de alta energía suplen nitrógeno y los compuestos de carbono que se necesitan para el crecimiento rápido de los microbios. Si no se mezclan con materiales voluminosos, estos materiales por lo general quedan demasiado densos y húmedos, por lo que no permiten la penetración de aire, lo que a su vez genera un olor desagradable, como el de huevos podridos.

Los materiales voluminosos son secos y porosos, lo que facilita la entrada del oxígeno. Debido a su bajo contenido de humedad y nutrientes, no se descomponen rápidamente.

Los materiales equilibrados suplen tanto energía como volumen. Estas materias se descomponen con facilidad, y no hay que mezclarlas con otros ingredientes. Estos materiales son útiles para asegurar la descomposición rápida.

1.3.8.2 Construcción de la pila de compostaje (montículo)

- Reunir bastantes materiales para la construcción de un montículo de por lo menos una yarda cúbica de volumen, lo que equivale aproximadamente a una base de 5 pies de anchura y 3 pies de altura en contenido de materia prima.
- Machacar, triturar, cortar o picar los materiales gruesos para que se descompongan más rápidamente.

- Para construir el montículo se debe añadir unos cuantos materiales de energía y otros voluminosos, en una relación de 2 a 1. Mezclarlos con una horca.
- Estrujar con las manos un manojo de los materiales mezclados para comprobar el contenido de agua. Si apenas se puede sacar una gota de agua, está perfecto.
- Si el montículo está demasiado seco, añadir un poco de agua y volver a comprobar la humedad; y si está demasiado mojado, añadir más material seco.
- Seguir añadiendo materiales de energía y voluminosos, mezclando y probando el contenido de humedad hasta que esté construido el montículo de 1 yarda cúbica.

1.3.8.3 Revolver el montículo

- Una vez a la semana, usar una horca para revolver el montículo. Este paso es muy importante, ya que de este modo, el aire puede penetrar hasta el centro del montículo, y la descomposición se acelera.
- Al revolver el montículo, también se incorporan los materiales de la parte exterior al centro caliente.
- Añadir agua si el montículo está seco.
- Cubrir el montículo si llueve mucho para que no se moje demasiado.

1.3.8.4 Curar la mezcla^{vi}

- Si el montículo se revuelve con regularidad durante varias semanas, se alcanzará una temperatura de entre 49 °C a 66 °C. Después de este período, se tendrá la mitad del volumen original en el montículo.
- Luego se debe dejar reposar el montículo durante cuatro a ocho semanas más para que se cure. La curación afecta la disponibilidad de nitrógeno y la actividad de los microbios.
- El compost sin curar puede lastimar las plantas, especialmente si se usa en macetas o para la siembra. La curación es menos importante cuando una pequeña cantidad de compost se mezcla con la tierra del jardín.
- La temperatura durante la curación es de entre 27 °C a 44 °C.
- El compost está listo cuando:
 - Hayan transcurrido ocho semanas después de la mezcla inicial.
 - La temperatura ya no sube al momento de revolver el montículo.
 - El compost se vea oscuro y quebradizo.

1.3.8.5 Actividades a tomar en cuenta si el montículo no está caliente

- Si el montículo está seco, se debe añadir agua.
- Si el montículo consiste principalmente en materiales voluminosos, se debe añadir materiales de energía o fertilizante de nitrógeno.
- Si el montículo está demasiado mojado, se debe añadir más material voluminoso.
- Se debe cubrir el montículo durante la temporada de lluvias.
- Si el montículo emite un olor desagradable, se debe revolver con más frecuencia o añadir más material voluminoso para que entre más oxígeno.
- Si el montículo es demasiado pequeño, se debe construir uno más grande para que retenga mejor el calor.

^{vi} Se refiere al proceso de secado y fermentación de la mezcla

Capítulo 2

Metodología para las pilas de compostaje: Fase de campo y laboratorio

2.1 Descripción de los materiales a utilizar en el compostaje

En este trabajo de tesis se propuso la obtención de abono orgánico, utilizando como materia prima los lodos obtenidos del mantenimiento de las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura.

Los lodos se mezclaron con otros materiales para obtener un compost de buena calidad, como residuos de poda de jardín y hojarasca de algarrobo. A continuación se describirán los tres materiales utilizados en la elaboración del abono orgánico.

2.1.1 Lodos

Son los lodos acumulados en el fondo de las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura, generados por la sedimentación de sólidos presentes en dichas lagunas, luego de 26 años de operación del sistema.

Durante los primeros meses del año 2012 se realizó el primer mantenimiento al sistema de estabilización de la Universidad, se removieron los lodos de estas lagunas y se almacenaron en una era para secado.

Para este estudio de tesis, en el mes de noviembre del 2012 se caracterizaron estos lodos, tomándose muestras para su análisis físico, químico y microbiológico en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria (LIS) del Instituto de Hidráulica e Higiene Sanitaria de la Universidad de Piura. Los resultados de los análisis se muestran el apartado **3.1.1**.

La metodología del muestreo consistió en cuadrangular la zona en donde estaban almacenados los lodos; el área total ocupada por los lodos se dividió en 4 zonas, en cada zona se tomó una cuadrícula de 25 cuadrados, con una medida de sus lados de 61 cm. En cada cuadrícula se tomaron 5 puntos (P1, P2, P3, P4 y P5) de donde se extrajeron las muestras (ver **figura 2.1**). La toma de muestra en cada punto fue a diferentes profundidades (superficie, a 25 cm, a 50 cm, a 75 cm y a 100 cm de profundidad). Luego del muestreo, las muestras se llevan al laboratorio para sus respectivos análisis.

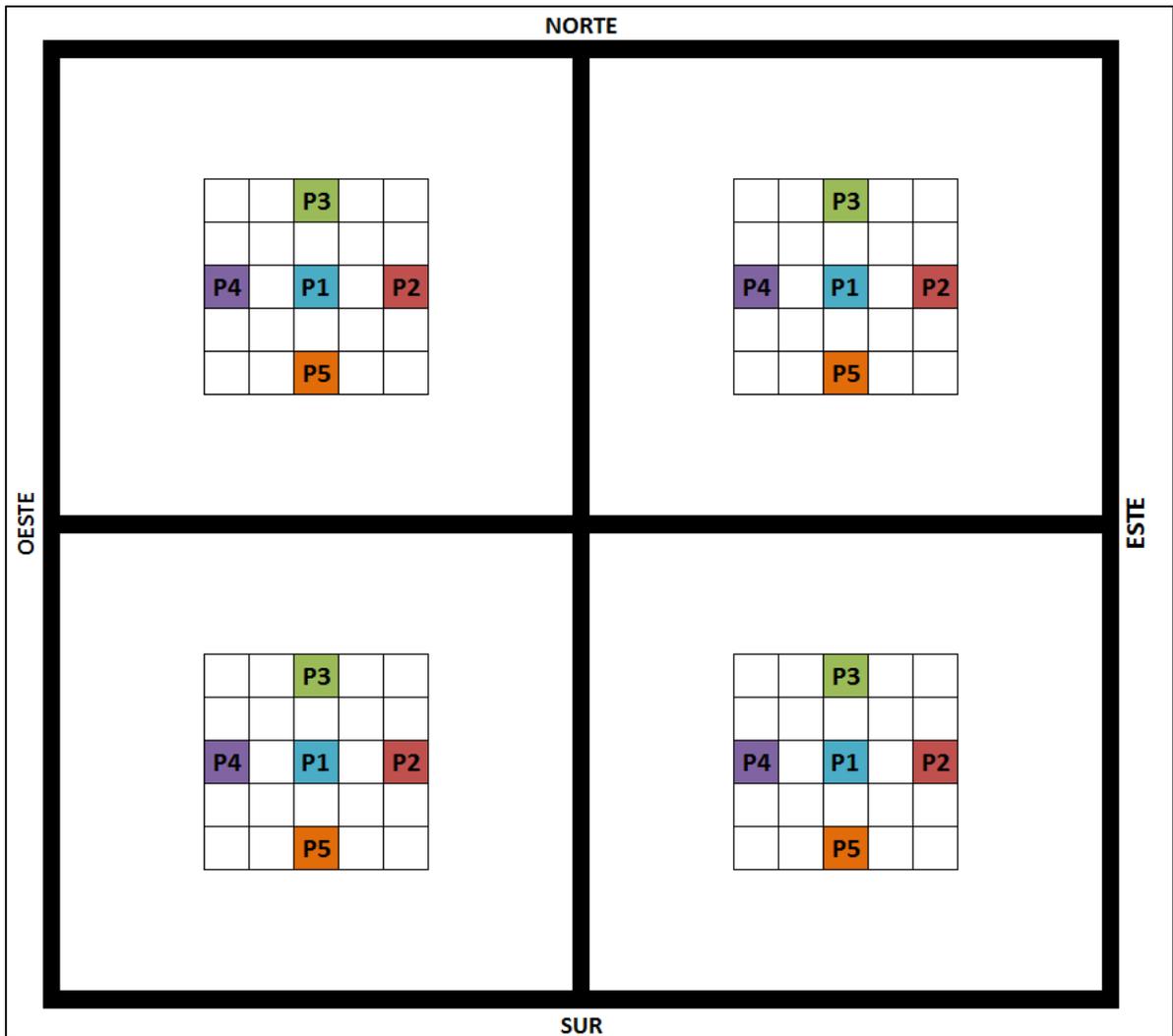


Figura 2.1. Forma en que se tomaron las muestras del área total donde se encuentran almacenados los lodos.

2.1.2 Residuo de poda de jardín

Estos residuos se obtienen de la poda y limpieza de las áreas verdes del campus de la Universidad de Piura. Están conformados principalmente por residuos de la siega de césped y junto con una pequeña cantidad de frutos de algarrobo y hojas secas al momento de la limpieza.

Esta actividad se realiza una vez al mes, teniendo en cuenta que no sobrepase los 10 cm de altura. Se utiliza una máquina podadora para la siega y escobas metálicas para juntar y acopiar estos residuos.

Para este estudio de tesis, en el mes de noviembre del 2012 se caracterizaron estos residuos de jardín, tomándose muestras y analizándolas en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria (LIS) del Instituto de Hidráulica e Higiene Sanitaria de la Universidad de Piura. Los resultados de los análisis se muestran el apartado **3.1.2**

2.1.3 Hojarasca de algarrobo

La hojarasca de algarrobo llamada también puño, se produce por la caída de las hojas anualmente debajo la superficie de la copa. En el campus la hojarasca permanece bajo las copas, en cambio se realiza la limpieza en las zonas cerca de los edificios, jardines y caminos con el fin de brindar un mejor aspecto paisajístico.

Para este estudio, en el mes de noviembre del 2012 se caracterizó la hojarasca de algarrobo, tomándose muestras y analizándolas en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria (LIS) del Instituto de Hidráulica e Higiene Sanitaria de la Universidad de Piura. Los resultados de los análisis se muestran el apartado **3.1.3**.

2.2 Cuantificación de los materiales utilizados en el compostaje

En este estudio no se realizó la cuantificación de la biomasa de los materiales utilizados en el compostaje, ya que ha sido elaborada por terceras personas; los datos se muestran a continuación.

2.2.1 Cuantificación de lodos

En el caso de los lodos, al momento de realizar el mantenimiento de las lagunas (febrero del 2012) se cuantificó el total de lodos extraídos. Se obtuvo como resultado: 125 000 Kg de lodo total extraído del mantenimiento de la laguna de estabilización primaria y secundaria.

2.2.2 Cuantificación de residuos de jardín y de hojarasca de algarrobo

En el caso de los residuos de poda de jardín y de la hojarasca de algarrobo, la metodología utilizada para la obtención de la biomasa está plasmada en el trabajo de tesis “*Propuesta de compostaje de los residuos vegetales generados en la Universidad de Piura, página 25*”, escrita por el Ingeniero Marco Antonio Mendoza Juárez, realizada en el año 2012.

- Se estima 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. (Mendoza Juárez, 2012, pág. 62).
- Se estima que la universidad posee en su bosque, 68 000 kg de hojarasca de algarrobo en base húmeda. (Mendoza Juárez, 2012, pág. 66).

2.3 Metodología utilizada para la construcción de pilas de compostaje

En la parte experimental de estudio de tesis se realizaron 4 tratamientos y cada tratamiento se repitió 3 veces, por lo que se obtuvo un total de 12 pilas de compostaje.

El objetivo de realizar 4 tratamientos es saber cuál de todos es el más óptimo, y al repetir cada tratamiento 3 veces nos aseguramos que no hayan variaciones significativas en los resultados, es decir, obtener datos más confiables.

Cada tratamiento se conformó con diferente proporción de materiales, como se muestra en la **tabla 2.1**.

Tabla 2.1. Proporciones de los materiales utilizados en los 4 tratamientos de las composteras.

	Lodo (%)	Hojarasca de algarrobo (%)	Residuos de jardín (%)
Tratamiento 1	10	50	40
Tratamiento 2	20	40	40
Tratamiento 3	30	30	40
Tratamiento 4	40	20	40

Para este trabajo se utilizó un sistema de compostaje abierto con pilas dinámicas, descrito en el apartado 1.3.4.1, y se empleó la metodología de compostaje, descrita en el apartado 1.3.8.

A continuación se muestran todos los pasos que se han seguido, en este estudio, para la construcción de las 12 pilas de compostaje.

2.3.1 Ubicación de las pilas

El primer paso para el compostaje del material fue escoger el lugar de compostaje, en donde se llevó a cabo el trabajo de investigación. Se determinó un área total de 60 m² (10 m de largo y 6 m de ancho), la cual se encuentra ubicada dentro de la Universidad de Piura, como se muestra en la **figura 2.2**. A este lugar se le denominó área de compostaje y se acondicionó en el año 2012, con el objetivo de realizar estudios similares de compostación.

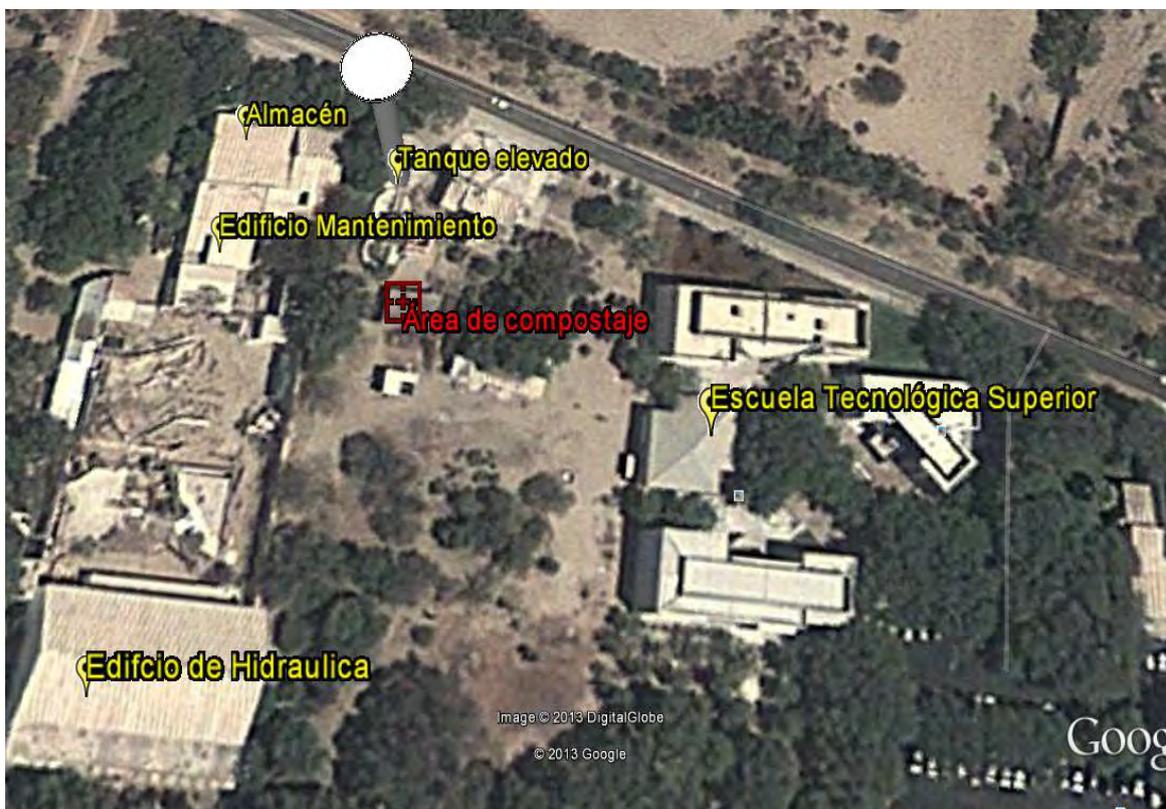


Figura 2.2. Ubicación del área de compostaje dentro del campus de la Universidad.
Fuente: *Google maps*.

2.3.2 Preparación del terreno

Luego de determinar el lugar de compostaje, se prosiguió con el acondicionamiento del mismo. Se cortó las malezas, se sacaron las ramillas, piedras y otros objetos presentes en el área para evitar que afecten negativamente o dificulten el proceso de compostaje. Además, se reparó el techo fabricado con palos de madera, como se muestra en la **figura 2.3**, ya que se había deteriorado, y se cubrió con plástico para evitar la saturación de la humedad por lluvias. Hay que recalcar que el trabajo se llevó a cabo en época de lluvias (marzo y abril). Finalmente, se niveló el suelo para que las pilas estén en las mismas condiciones físicas.



Figura 2.3. Reparación del techo de la compostera y colocación del plástico

2.3.3 Distribución y dimensionamiento de las pilas

Se dispuso de un área de 10 m de largo y 6 m de ancho para este trabajo de investigación y se optó por realizar un diseño con 12 pilas de compostaje (2.00 m de largo, 0.90 m de ancho y 0.80 m de alto), distribuidas al azar, mostrado en la **figura 2.4**.

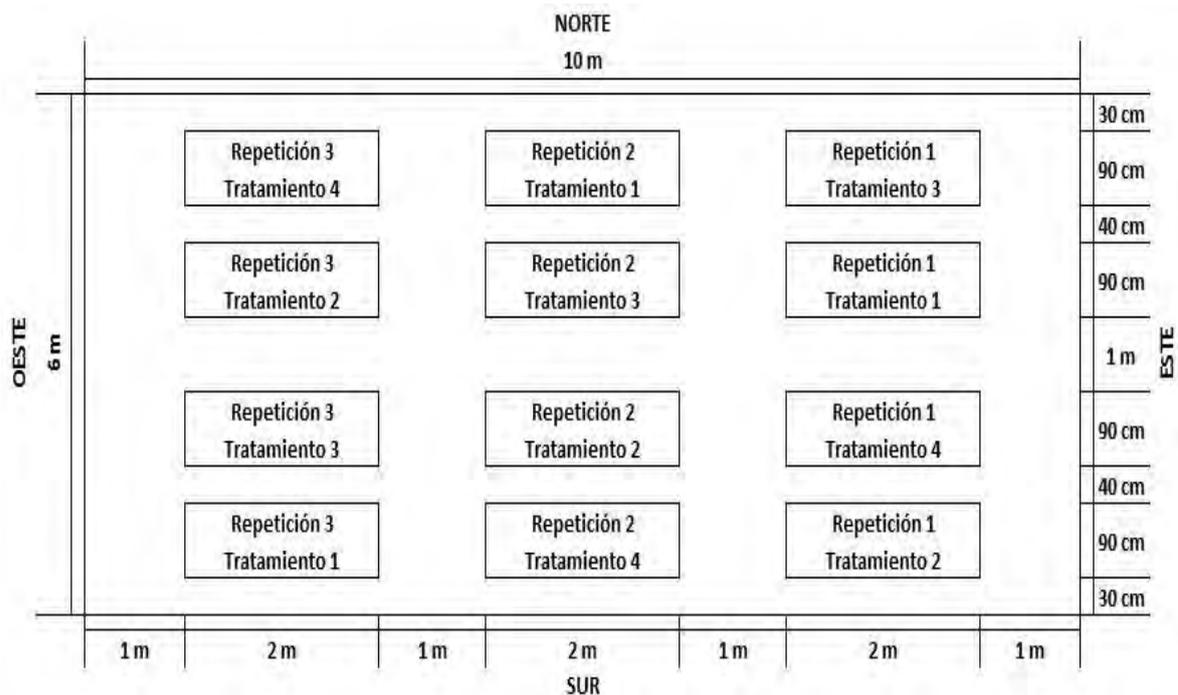


Figura 2.4. Distribución de las pilas de compostaje.

2.3.4 Recolección de los materiales

Luego de determinar las dimensiones y distribución de las pilas, se procedió a recolectar los materiales utilizados en el compostaje, esto se realizó con ayuda del personal de mantenimiento de bosque y jardines del campus UDEP.

En las **figuras 2.5 y 2.6** se muestran la ubicación de los materiales acopiados, y el camino que se tomó para trasladarlos hasta el lugar de compostaje.

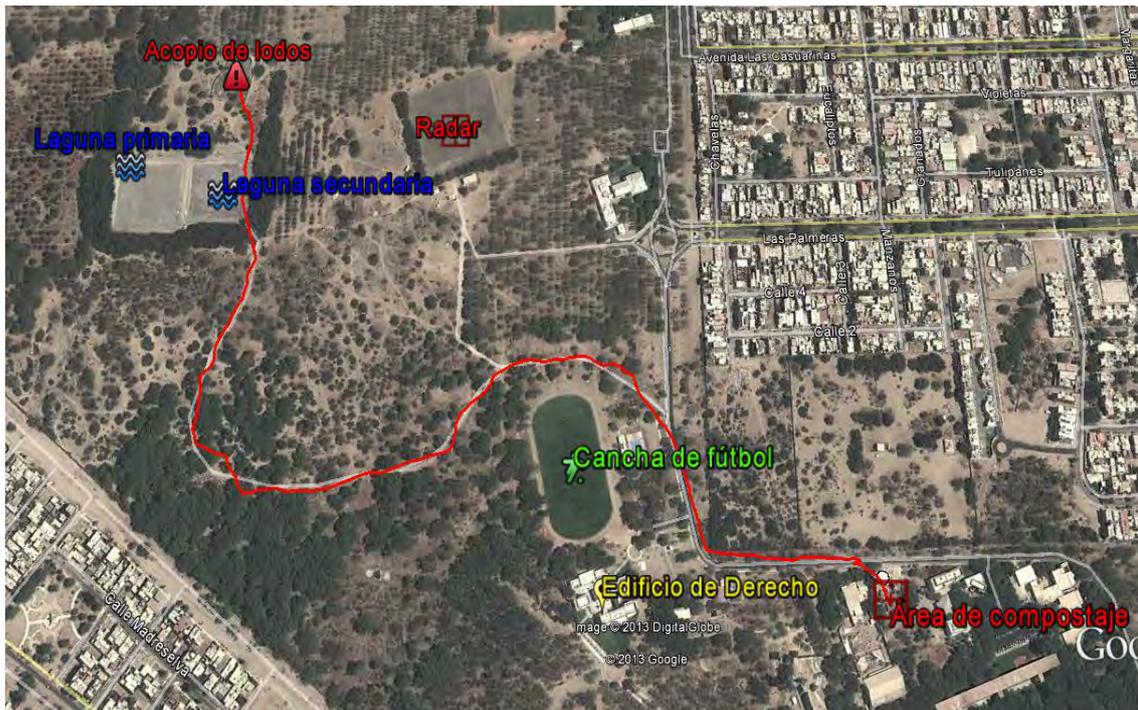


Figura 2.5. Traslado de los lodos acopiados hasta el lugar de compostaje
Fuente: *Google maps.*



Figura 2.6. Traslado de la hojarasca de algarrobo y de los residuos de jardín al lugar de compostaje.
Fuente: *Google maps.*

En el caso de los residuos de jardín y de la hojarasca de algarrobo la cantidad requerida de cada material se acopió en diferentes partes del campus y trasladó al área de compostaje, utilizando carretillas y sacos; y en el caso de los lodos, la cantidad requerida se trasladó en sacos, al área de compostaje, utilizando una camioneta, desde un espacio cercano a las lagunas de estabilización en donde se encuentran ubicados.

2.3.5 Composición y distribución de los materiales en las pilas de compostaje

Se determinó que cada pila estaría conformada por 100 kilogramos de material a compostar, siendo los materiales: lodos, residuos de jardines, hojarasca de algarrobo, en las proporciones mostradas en el apartado 2.3.

Estas proporciones se eligieron de tal forma que compensen la cantidad de nitrógeno presente en la mezcla de los materiales, el lodo posee la menor proporción de nitrógeno y la hojarasca de algarrobo posee la más alta proporción de nitrógeno de los tres materiales, es por ello que se eligió un 40 % de los residuos de jardín, contra un 60 % de la combinación de la hojarasca de algarrobo con el lodo del total de la mezcla. De la misma forma, se conseguirá una relación carbono / nitrógeno adecuada, por ser el residuo de jardín el material con más carbono de los tres presentes en la mezcla.

En la **tabla 2.2** se muestra las cantidades de material utilizados en cada tratamiento.

Tabla 2.2. Cantidad de material utilizada por tratamiento.

	Lodo (kg)	Hojarasca de algarrobo (kg)	Residuos de jardín (kg)	Total por pila (kg)
Tratamiento 1	10	50	40	100
Tratamiento 2	20	40	40	100
Tratamiento 3	30	30	40	100
Tratamiento 4	40	20	40	100

Se eligió una distribución de los materiales por capas, cada material se dividió en dos capas, para asegurar una adecuada mezcla y descomposición. Cada capa estuvo conformada por la mitad del material a utilizar en cada tratamiento, mostrados en la **tabla 2.2**. En la **figura 2.7** se muestra la distribución las capas para los tratamientos.

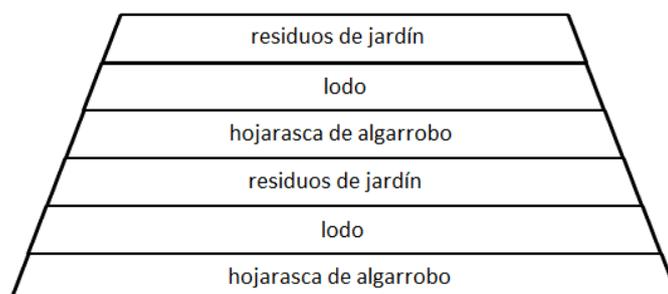


Figura 2.7. Distribución de los materiales por capas para la construcción de las pilas.

2.3.6 Formación de las pilas de compostaje

Luego de determinar la distribución y composición de los materiales, y recolectarlos se procedieron a construir las 12 pilas de compostaje, dejando entre pilas calles o espacios que permitan la operatividad del proceso, para lo cual se siguieron los siguientes pasos:

- Se excavó aproximadamente 10 cm de profundidad en el suelo para un mejor acondicionamiento de las pilas de compostaje. Ver **figura 2.8**.
- Se procedió a pesar la cantidad de material a utilizar en cada y se repartió en cada poza (excavación) según las cantidades y orden mostrados en el apartado 2.3.5. Ver **figura 2.9**.
- A medida que se colocaba cada capa se regada para humedecer la pila. Ver **figura 2.10**.
- Una pila está terminada cuando se colocan todas las capas de material correspondiente y se le da un riego final a toda la mezcla. Ver **figura 2.11**.



Figura 2.8. Excavaciones para las pilas de compostaje.



Figura 2.9. Pesado de materiales para colocar en cada poza.



Figura 2.10. Colocación y regado de la primera capa de lodo.



Figura 2.11. Pilas de compostaje terminadas.

2.4 Monitoreo y control del proceso de compostaje

Para acelerar el proceso de descomposición del compost se debe aplicar volteos periódicos. Así mismo, se debe monitorear y controlar la temperatura y la humedad a lo largo de todo el proceso de compostaje, siendo estos los parámetros que aseguren un desarrollo del proceso en condiciones óptimas.

En el trabajo de investigación se realizaron volteos, seguimientos de humedad y temperaturas por un periodo de 47 días.

2.4.1 Frecuencia de volteos

Los volteos consistieron en revolver toda la mezcla de materiales, utilizando un trinche y una pala. Para realizar ésta tarea se contó con el apoyo del personal de jardines y bosques de la Universidad de Piura. Ver **figura 2.12**

Los volteos se realizaron una vez por semana, los días lunes, a lo largo de todo el proceso de compostaje (6 semanas).



Figura 2.12. Volteo de una pila de compostaje.

2.4.2 Regulación y medición de la humedad

Se requiere que las pilas tengan la cantidad de humedad requerida, evitando que se sequen o se saturen de agua, por ello se regaron todos los días por las mañanas. El riego se realizó a lo largo de todo el proceso de compostaje, a excepción de la última semana, para asegurar un compost de una mejor textura y, que a su vez, el tamizado se realice más fácilmente.

Para evitar que las pilas se saturen de agua el riego se realizó por el personal de jardines y bosques de la universidad de Piura, siendo ellos personas experimentadas en el tema. Además se controló el vertido de agua, determinando la cantidad de agua que se le suministra a cada pila. Para determinar este dato se utilizó la fórmula de caudal ($Q = \text{Volumen}/\text{Tiempo}$); se midieron los tiempos en que se tomaba regar cada pila de compostaje (Ver **figura 2.13**) y se midió caudal de agua que arroja la manguera; el caudal se determina experimentalmente, midiendo cuanto tiempo tarda en llenarse un recipiente con un determinado volumen. El caudal se mantiene constante.



Figura 2.13. Medición del tiempo requerido para el regado de una pila de compostaje.

Se realizó un monitoreo experimental de la humedad, el cual consistió en tomar muestras de todas las pilas de compostaje, cada dos semanas, y llevarlas al laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura para así determinar el porcentaje de humedad presente en cada pila. También se realizó un control de la humedad utilizando un método empírico, denominado “método del puño”, el cual se realizó cada semana, tomando en cuenta los siguientes pasos:

- Poner en la mano una muestra de material.
- Cerrar la mano y apretar fuertemente el mismo.
- Si con esta operación se verifica que sale un hilo de agua continuo del material, entonces se puede establecer que el material contiene más de un 40 % de humedad.
- Si el material no gotea y cuando se abre el puño de la mano permanece moldeado, se estima que la humedad está entre el 20 % y 30 %.
- Finalmente, si se abre el puño y el material se disgrega, se asume que el material contiene una humedad inferior al 20 %.

No se tuvo interferencia con la humedad de lluvia porque se colocó un plástico en el techo del tinglado.

2.4.3 Medición de la temperatura

El monitoreo y control de este parámetro a lo largo de todo el proceso de compostaje es de vital importancia, ya que permite evitar que la temperatura se eleve demasiado durante todo el proceso, y al mismo tiempo permite conocer cuándo se llega a la temperatura ambiente, temperatura a la cual el compost se encuentra en la etapa de maduración y listo para poder ser usado.

Para este trabajo se llevó un control interdiario de este parámetro, los días lunes, miércoles y viernes a las 8:30 de la mañana, antes de su riego, a lo largo del proceso de compostaje. Se utilizó un termómetro especial para compost, el cual se muestra en la **figura 2.14**; su forma puntiaguda permite medir la temperatura de las pilas a diferentes alturas de la misma.



Figura 2.14. Termómetro especial para utilizar en la compostera.

En cada pila se midió la temperatura en tres puntos diferentes. El primero fue en todo el centro de la pila, a 25 cm de la superficie de esta; el segundo fue en el centro, a 30 cm del

extremo derecho de la pila y a 25 cm del nivel del suelo; y el tercero fue en el centro, a 30 cm del extremo izquierdo de la pila y a 25 cm del nivel del suelo.

2.5 Obtención de muestras para el laboratorio a lo largo del proceso

Una vez instaladas las 12 pilas de compostaje e iniciado su proceso de descomposición se procedió a realizar los análisis de los parámetros vistos en el apartado 1.3.7, por lo que se tomaron muestras de cada pila de compostaje para luego ser analizadas en la Laboratorio de Ingeniería Sanitaria.

Para realizar estos análisis se tomó una muestra por cada pila de compostaje. Los muestreos fueron tomados al momento en que se volteaban las pilas, de esta manera se aseguró una toma de muestra homogénea y representativa de cada pila.

La metodología utilizada para realizar cada muestreo fue la siguiente:

- A medida que se realizó el volteo de una pila, utilizando guantes de látex, se fue recogiendo muestra con la mano y colocándola en una bolsa plástica, previamente rotulada con el número de tratamiento y la repetición a la que corresponde dicha pila. Ver **figura 2.15**.
- Cada bolsa contenía un promedio de 500 g de muestra representativa en cada pila.
- Posteriormente se selló la bolsa plástica y se llevó a un lugar de refrigeración en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria.
- Se repitieron los pasos anteriores para recolectar las muestras de las pilas faltantes, desechando y cambiando los guantes utilizados, y limpiando la pala y trinches utilizados en el muestreo para asegurar que las muestras posteriores no se contaminen.



Figura 2.15. Recogida de la muestra durante el volteo.

Los muestreos se realizaron cada dos semanas, los días lunes, siendo un total de cuatro muestreos a lo largo de todo el proceso de compostaje (47 días). El cronograma se muestra en la **tabla 2.3**.

Tabla 2.3. Cronograma de muestreos a lo largo del proceso de compostaje.

Semana	1	2	3	4	5	6	7	8
Día	10-abr	15-abr	22-abr	29-abr	06-may	13-may	20-may	27-may
Muestreo		x		X		X		X

2.6 Pesaje y tamizado

El primer día de la semana 8 se dio por concluido el proceso de compostaje de las doce pilas. Durante toda la semana 7 se voltearon las pilas tres veces, pero no se regaron para asegurar que las pilas de compostaje se sequen más rápido y sea más fácil de tamizar.

El proceso de tamizado consistió en hacer pasar el compost por unas mallas con unas aperturas de 10 mm (ver **figura 2.16**), para obtener un compost con una mejor textura. El producto final tuvo una textura fina, de un color marrón oscuro (ver **figura 2.17**) y un olor a tierra mojada.

Posteriormente se almacenó el compost en sacos rotulados (ver **figura 2.18**) y se pesó por medio de una balanza digital, del mismo modo se pesaron los residuos obtenidos del tamizado.



Figura 2.16. Tamizado del producto final.



Figura 2.17. Textura final del abono orgánico (producto final).



Figura 2.18. Final del proceso de compostaje. A la izquierda se muestra el rotulado de los sacos y a la derecha se muestran el producto obtenido de todos los tratamientos.

2.7 Métodos empleados en la medición de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos

Los parámetros físico-químicos que se midieron fueron: humedad, pH, fósforo total, cenizas, materia orgánica, carbono orgánico total y nitrógeno total. Los parámetros microbiológicos fueron: coliformes totales y coliformes termotolerantes.

Estos análisis se realizaron en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria (LIS) del Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, en donde se cuenta con todos los equipos requeridos para dicho fin.

2.7.1 Método de determinación de la humedad

Esta metodología se extrajo de Norma mexicana NMX-AA-16-1984 (1992).

Para determinar el porcentaje de sólidos presentes en los lodos obtenidos del mantenimiento del sistema de estabilización de la Universidad de Piura y en el compost se utilizó 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 ± 0.0005 gramos para considerarlo como peso constante).

- **Cálculo**

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

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

En 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.

2.7.2 Método de determinación del fósforo total

La cantidad de fósforo presente en la muestra se determinó por el “método modificado de Olsen”. (Ruiz, 2002, pág. 46)

- **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 (NaHCO_3) libre de fosfatos. Diluir a 1000 ml utilizando una fiola volumétrica y ajustar el pH a 8.5 con hidróxido de sodio (NaOH) 1 N.

- **Carbón activado o decolorado**

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 (H_2SO_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 ($C_6H_8O_6$) 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 (KH_2PO_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**.

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.

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

Fuente: Ruiz, A. (2002). “Compostación de los residuos sólidos orgánicos generados en la Universidad de Piura”. Universidad de Piura – Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.

Preparación del blanco

- Colocar en un frasco Erlenmeyer de 100 ml, 1 g de carbón decolorado.
- 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 decolorado.
- 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. **Ver figura 2.19.**
- Tomar lectura introduciendo las celdas al espectrofotómetro. **Ver figura 2.20.**



Figura 2.19. A la izquierda se muestran los estándares preparados y a la derecha se presentan 8 muestras listas para ser analizadas en el espectrofotómetro.

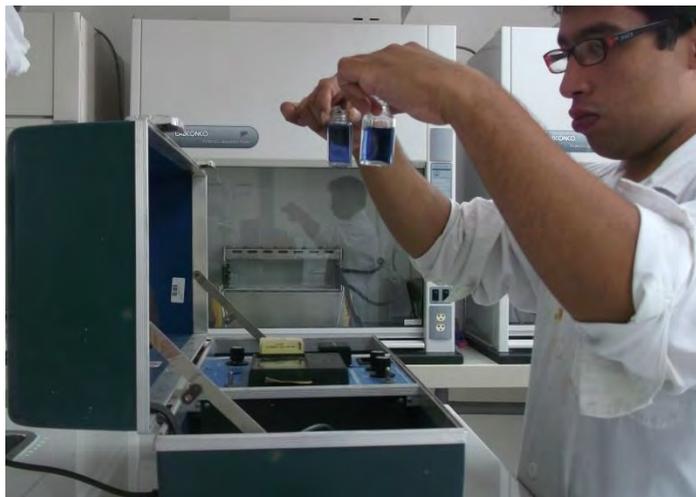


Figura 2.20. Colocación de estándares y muestras en el espectrofotómetro.

2.7.3 Método de determinación del pH

Para la determinación del pH se ha utilizado “el método potenciométrico o electroquímico”. (Norma mexicana NMX-AA-25-1984., 1992). 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.
- Solución amortiguadora de pH=7.
- Solución amortiguadora de pH=11.

- **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.
- 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.

2.7.4 Método de determinación de cenizas

Las cenizas vienen a ser los sólidos fijos (no volátiles) de la materia, para la determinación de este parámetro se ha utilizado “el método de calcinación” mediante una mufla con indicador de altas temperaturas. (Norma mexicana NMX-AA-18-1984., 1992).

- **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.

- Finalmente, se deja enfriar el crisol con la muestra y posteriormente se pesan, descontando el peso del crisol (P_c) para obtener el peso de la muestra final (P_f) secada a 600 °C. Ver figura 2.21.

- **Cálculo**

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

$$\text{Cenizas (\%)} = \left(\frac{P_f}{P_i} \right) \times 100$$

En donde:

Cenizas = Porcentaje de cenizas en la muestra.

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

P_i = Peso de la muestra inicial.



Figura 2.21. A la izquierda se sacan las muestras de la mufla y a la derecha se están secando, antes de ser pesadas.

2.7.5 Método de determinación de la materia orgánica

La materia orgánica viene a ser los sólidos volátiles. Puesto que la calcinación a 600 °C de la muestra es realizada para eliminar la materia orgánica, entonces esta se calcula por diferencia.

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

En donde:

MO (%) = Porcentaje de materia orgánica en la muestra

2.7.6 Método de determinación del carbono orgánico total

El “método de Walkley – Black” nos dice que el carbono orgánico multiplicado por 1,72 proporciona una estimación de la materia orgánica. Entonces la fórmula que se utilizó para el cálculo de carbono orgánico total fue:

$$\text{COT (\%)} = \frac{\text{MO (\%)}}{1.72}$$

En donde: COT (%) = Porcentaje de carbono orgánico total en la muestra.

2.7.7 Método de determinación del nitrógeno total

La cantidad de nitrógeno presente en la muestra se determinó con “el método modificado de Kjeldhal”, (Ruiz, 2002, pág. 38). 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 (H₂SO₄) concentrado, en presencia de catalizadores metálicos para efectuar la reducción del nitrógeno orgánico de la muestra a amoníaco (NH₃), el cual es retenido en solución como sulfato de amonio [(NH₄)₂SO₄]. 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 NH₃, que en medio ácido se encuentran en forma de radical amonio (NH₄⁺), es decir, se llevan las formas orgánicas a formas minerales de nitrógeno.

Destilación

Una vez transformado el nitrógeno en NH₄⁺, se expone a una base fuerte como el hidróxido de sodio (NaOH) para formar hidróxido de amonio (NH₄OH), que por la acción del calor se descompone en amoníaco (NH₃) y agua.

Titulación

El amoníaco desprendido por la reacción se recoge en un volumen conocido de solución valorada de ácido bórico (H₃BO₃), 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.
- Piseta con agua destilada.

- **Soluciones y reactivos**

- Sulfato de cobre (CuSO_4).
- Ácido sulfúrico (H_2SO_4).
- Hidróxido de sodio (NaOH) al 40 %.
- Ácido bórico (H_3BO_3) al 2 %.
- Indicador rojo de metilo.
- Indicador azul de metilo.
- Ácido clorhídrico (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 (CuSO_4); 0.1 g de selenio metálico; 2 ml de agua destilada y 4 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_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 cocinilla del digestor. Se realizan 5 repeticiones y un blanco (el sistema de digestión está formado por 6 tubos).
- 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 amoniaco.
- La destilación se mantiene durante 10 minutos, que es tiempo suficiente para que destile todo el amoniaco presente en la solución tratada. **Ver figura 2.22.**
- Se aplica el mismo procedimiento de destilación a cada uno de los 6 tubos de digestión.

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 figura 2.23.**
- 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:

$$NT (\%) = \frac{(G - G_0)}{P} \times 1.4 \times 100$$

En 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).



Figura 2.22. Destilación de una muestra. Se observa el tubo de digestión y el Erlenmeyer en el Sistema de destilación.



Figura 2.23. Titulación de las muestras.

2.7.8 Método de determinación de la población de coliformes

Para determinar la población de bacterias coliformes se utilizó la “técnica de fermentación de tubos múltiples”, (Meckes & Rice, 2003, págs. 48-59). Este método es aplicable al análisis de sal o aguas salobres, así como lodos, sedimentos, y fangos.

Para preparar las muestras sólidas o semisólidas se pesa la muestra y se añade diluyente con el fin de hacer una dilución de 10^{-1} .

Para obtener la dilución 10^{-1} , se colocan 15 g de muestra en un vaso de licuadora estéril, se añaden 135 ml de agua fosfato-bufferado estéril o agua de dilución 0.1 % peptona, y se mezclan durante 1 a 2 minutos a baja velocidad (8000 rpm).

Fase presuntiva

- **Reactivos y medio de cultivo**

- Para la fase presuntiva se utiliza Caldo Lauril Triptosa (LST: Lauryl Sulfate Trytose).
- Se diluyen 36.5 g de LST por litro de agua destilada, ajustando el pH a 6.8 ± 0.2 .
- Se vierten 10 ml del medio en cada tubo de ensayo y posteriormente se esteriliza en la autoclave.

- **Procedimiento**

- Usar 5 series de cinco tubos de 15mL, en donde cada tubo contenga 10 ml de LST simple concentración. Los tubos deben ser colocados en una gradilla ordenadamente, según la dilución que define la serie a la cual pertenecen. Normalmente, las series se ordenan de manera creciente según la dilución que las define.
- Codificar el primer tubo de la izquierda con el número de laboratorio y la concentración o dilución correspondiente.
- Se hacen las diluciones de la muestra en tubos con agua de dilución 0.1 % peptona o agua fosfato-bufferado, previamente esterilizados en la autoclave, tomando como base la dilución 10^{-1} . Cada dilución se agita vigorosamente, unas 25 veces. La preparación de diluciones se ejemplifica en la **figura 2.24**
- Se inocula cada tubo de dilución en un conjunto de cinco tubos con LST (se añade 1 ml de cada dilución a 5 tubos con LST).
- Se incuban los tubos inoculados a 35 ± 0.5 °C.
- Después de 24 ± 2 h, si los tubos presentan gas y/o reacción ácida (tonos de color amarillo) hay que sacarlos con cuidado. Si no hay gas o reacción ácida se deben reincubar y reexaminar al final de 48 ± 3 h.
- Se registra la presencia o ausencia de crecimiento de gas y la producción de ácido. Si hay presencia de gas y/o acidez significa que la reacción presuntiva es positiva.

- **Interpretación**

- Se envían los tubos con una reacción presuntiva positiva a la fase confirmativa de coliformes totales y a la fase confirmativa de coliformes fecales.

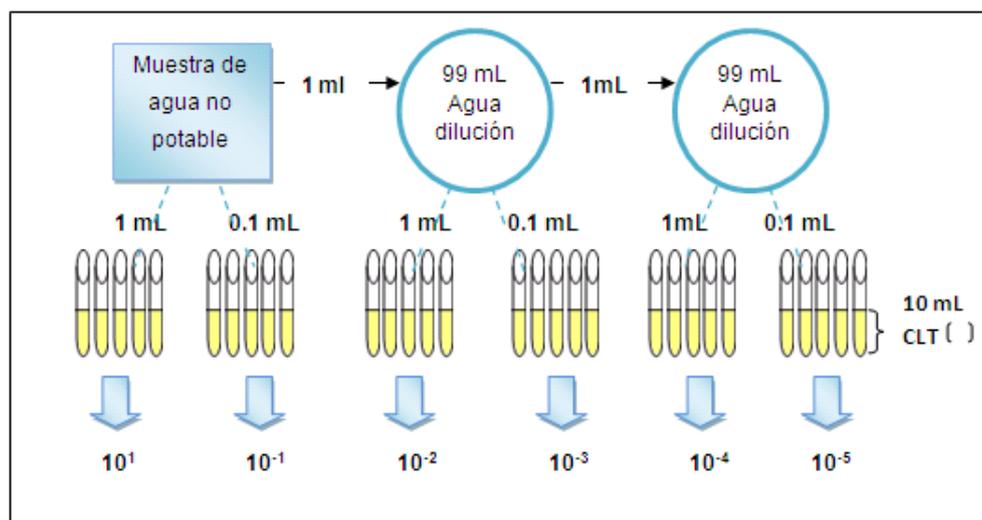


Figura 2.24. Preparación de diluciones sucesivas.

Fuente: Meckes, M., & Rice, E. (2003) “*Microbiological examination PART 900 - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 9221 Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group*”.

Fase confirmativa de coliformes totales

- **Reactivos y medio de cultivo**

- Para la fase confirmativa de coliformes totales se utiliza bilis lactosa verde brillante (BGLB: Brilla).
- Se diluyen 40 g de BGLB por litro de agua destilada, ajustando el pH a 7.2 ± 0.2 .
- Se vierten 10 ml del medio en cada tubo de ensayo y posteriormente se esteriliza en la autoclave.

- **Procedimiento**

- Con un asa estéril de 3.0 a 3.5 mm de diámetro, se transfieren dos asas de la suspensión de cada tubo de LST con gas y/o reacción ácida a cada tubo de BGLB, previamente codificado con el número de laboratorio correspondiente. Evitar la película si está presente. **Ver figura 2.25.**
- Luego se esteriliza el asa con un mechero bunsen para utilizarlo en otro tubo. **Ver figura 2.26.**
- Se incuban los tubos de BGLB a 35 ± 0.5 °C y se observa la producción de gas en 48 ± 3 h.
- Se calcula el número más probable (NMP) de los coliformes totales basados en la proporción de tubos con gas confirmados de LST para las 5 diluciones consecutivas.

Fase confirmativa de coliformes fecales

- **Reactivos y medio de cultivo**

- Para la fase confirmativa de coliformes fecales se utiliza caldo EC. Se diluyen 35.5 g de caldo EC por litro de agua destilada, ajustando el pH a 6.9 ± 0.2 . Se

vierten 10 ml del medio en cada tubo de ensayo y posteriormente se esteriliza en la autoclave.

- **Procedimiento**

- Con un asa estéril 3.0 a 3.5 mm de diámetro, se transfieren dos asadas de la suspensión de cada tubo de LST con gas y/o reacción ácida a cada tubo de caldo EC, previamente codificado con el número de laboratorio correspondiente. Evitar la película si está presente. **Ver figura 2.25.**
- Luego se esteriliza el asa con un mechero bunsen para utilizarlo en otro tubo. **Ver figura 2.26.**
- Se incuban los tubos de caldo EC en un baño maría a una temperatura de 44.5 ± 0.2 °C y se observa la producción de gas en 24 ± 2 h.
- Se calcula el número más probable (NMP) de los coliformes fecales basados en la proporción de tubos con gas confirmados de LST para las 5 diluciones consecutivas.

Cálculo del NMP para la densidad de bacterias coliformes totales y fecales

Se registra la concentración de coliformes como el Número Más Probable (NMP) / 100 ml. En la **tabla 2.5** se muestran los valores de NMP para las diferentes combinaciones de resultados positivos y negativos, cuando se probaron cinco tubos de fermentación de 10 ml.

Tabla 2.5. Índice MPN y límites de confianza del 95 % para varias combinaciones de resultados positivos del método “técnica de fermentación de tubos múltiples para coliformes fecales y coliformes totales”. Técnica de fermentación estándar que utilizan cinco tubos por dilución.

Combinación de positivos	Índice NMP/100mL	Límite de confianza		Combinación de positivos	Índice NMP/100mL	Límite de confianza	
		Inf.	Sup.			Inf.	Sup.
0-0-0	<1.8	----	6.8	4-0-3	25.0	9.8	70.0
0-0-1	1.8	0.09	6.8	4-1-0	17.0	6.0	40.0
0-1-0	1.8	0.09	6.9	4-1-1	21.0	6.8	42.0
0-1-1	3.6	0.70	10.0	4-1-2	26.0	9.8	70.0
0-2-0	3.7	0.70	10.0	4-1-3	31.0	10.0	70.0
0-2-1	5.5	1.80	15.0	4-2-0	22.0	6.8	50.0
0-3-0	5.6	1.80	15.0	4-2-1	26.0	9.8	70.0
1-0-0	2.0	0.10	10.0	4-2-2	32.0	10.0	70.0
1-0-1	4.0	0.70	10.0	4-2-3	38.0	14.0	100.0
1-0-2	6.0	1.80	15.0	4-3-0	27.0	9.9	70.0
1-1-0	4.0	0.71	12.0	4-3-1	33.0	10.0	70.0
1-1-1	6.1	1.80	15.0	4-3-2	39.0	14.0	100.0
1-1-2	8.1	3.40	22.0	4-4-0	34.0	14.0	100.0
1-2-0	6.1	1.80	15.0	4-4-1	40.0	14.0	100.0
1-2-1	8.2	3.40	22.0	4-4-2	47.0	15.0	120.0
1-3-0	8.3	3.40	22.0	4-5-0	41.0	14.0	100.0
1-3-1	10.0	3.50	22.0	4-5-1	48.0	15.0	120.0

Tabla 2.5-continuación. Índice MPN y límites de confianza del 95 % para varias combinaciones de resultados positivos del método “técnica de fermentación de tubos múltiples para coliformes fecales y coliformes totales”. Técnica de fermentación estándar que utilizan cinco tubos por dilución.

Combinación de positivos	Índice NMP/100mL	Límite de confianza		Combinación de positivos	Índice NMP/100mL	Límite de confianza	
		Inf.	Sup.			Inf.	Sup.
1-4-0	10.0	3.50	22.0	5-0-0	23.0	6.8	70.0
2-0-0	4.5	0.79	15.0	5-0-1	31.0	10.0	70.0
2-0-1	6.8	1.80	15.0	5-0-2	43.0	14.0	100.0
2-0-2	9.1	3.40	22.0	5-0-3	58.0	22.0	150.0
2-1-0	6.8	1.80	17.0	5-1-0	33.0	10.0	100.0
2-1-1	9.2	3.40	22.0	5-1-1	46.0	14.0	120.0
2-1-2	12.0	4.10	26.0	5-1-2	63.0	22.0	150.0
2-2-0	9.3	3.40	22.0	5-1-3	84.0	34.0	220.0
2-2-1	12.0	4.10	26.0	5-2-0	49.0	15.0	150.0
2-2-2	14.0	5.90	36.0	5-2-1	70.0	22.0	170.0
2-3-0	12.0	4.10	26.0	5-2-2	94.0	34.0	230.0
2-3-1	14.0	5.90	36.0	5-2-3	120.0	36.0	250.0
2-4-0	15.0	5.90	36.0	5-2-4	150.0	58.0	400.0
3-0-0	7.8	2.10	22.0	5-3-0	79.0	22.0	220.0
3-0-1	11.0	3.50	23.0	5-3-1	110.0	34.0	250.0
3-0-2	13.0	5.60	35.0	5-3-2	140.0	52.0	400.0
3-0-1	11.0	3.50	26.0	5-3-3	170.0	70.0	400.0
3-1-1	14.0	5.60	36.0	5-3-4	210.0	70.0	400.0
3-1-2	17.0	6.00	36.0	5-4-0	130.0	36.0	400.0
3-2-0	14.0	5.70	36.0	5-4-1	170.0	58.0	440.0
3-2-1	17.0	6.8	40.0	5-4-2	220.0	70.0	440.0
3-2-2	20.0	6.8	40.0	5-4-3	280.0	100.0	710.0
3-3-0	17.0	6.8	40.0	5-4-4	350.0	100.0	710.0
3-3-1	21.0	6.8	40.0	5-4-5	430.0	150.0	1100.0
3-3-2	24.0	9.8	70.0	5-5-0	240.0	70.0	710.0
3-4-0	21.0	6.8	40.0	5-5-1	350.0	100.0	1100.0
3-4-1	24.0	9.8	70.0	5-5-2	540.0	150.0	1700.0
3-5-0	25.0	9.8	70.0	5-5-3	920.0	220.0	2600.0
4-0-0	13.0	4.1	35.0	5-5-4	1600.0	400.0	4600.0
4-0-1	17.0	5.9	36.0	5-5-5	> 1600.0	700.0	----
4-0-2	21.0	6.8	40.0				

Fuente: Meckes, M., & Rice, E. (2003) “*Microbiological examination PART 900 - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 9221 Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group*”.

Si el volumen de la porción de muestra utilizados son los que se encuentran en las tablas, se reporta el valor correspondiente a la cantidad de resultados positivos y negativos en la serie como el NMP/100 ml y se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{MPN/100 ml} = (\text{Tabla MPN/100 ml}) \times \frac{10}{V}$$



Figura 2.25. Traspaso del tubo con LST a los tubos con BGLB y EC, con ayuda del asa.



Figura 2.26. Esterilización del asa utilizando el mechero de bunsen.

Capítulo 3

Resultados obtenidos en la fase de campo y de laboratorio

3.1 Resultados de los análisis iniciales en la materia prima

Antes de iniciar el proceso de compostaje, se caracterizaron los materiales a utilizar en dicho proceso. Esto se realizó tomando muestras y analizándolas en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria del Instituto de Hidráulica, Hidrología e Higiene Sanitaria de la Universidad de Piura. A continuación se muestran los resultados de los análisis de los diferentes materiales.

3.1.1 Caracterización de los lodos

Debido a que los lodos removidos de las lagunas de estabilización se encuentran amontonados en un terreno amplio, con una altura aproximada de 1 m, la caracterización de estos se hicieron a diferentes profundidades.

La humedad de los lodos amontonados en la superficie es muy baja, como se muestra en la **figura 3.1**, debido a que los muestreos se realizaron 10 meses después de removidos los lodos, estando por tanto expuestos a radiaciones solares a nivel de superficie. A mayor profundidad, la humedad de los lodos aumenta generalmente por el escurrimiento del agua en estos montones de lodo, llegando a su pico más alto (38.92 %) a 50 cm de profundidad, para luego empezar a disminuir lentamente hasta 30.90 %. En esta última profundidad hay que anotar que la muestra estuvo mezclada con arena.

Los lodos cuentan con un pH alcalino. En la **figura 3.2**, se observan valores cercanos al valor neutro, para bajas profundidades, pero a medida que aumenta la profundidad (> 50 cm) se encuentran valores de pH cada vez más alcalino.

Como se ve en la **figura 3.3**, los lodos mantienen niveles de conductividad eléctrica bajos, entre 8.71 y 15.69 $\mu\text{S} / \text{cm}$, lo cual no tiene un efecto considerable en el proceso de compostaje. Dado que un exceso de salinidad puede tener efectos limitantes sobre el crecimiento vegetal tanto debido a factores osmóticos como al efecto de iones específicos.

Se aprecia en la **figura 3.4** que el porcentaje de materia orgánica disminuye conforme aumenta la profundidad, de 17.96 a 9.55 %, esto debido a que a mayores profundidades hay presencia de arena mezclada con el lodo, siendo la arena un material que carece de materia orgánica.

El total de materia en los lodos está conformada por la suma de cenizas y de materia orgánica, presentes en estos. En consecuencia, al contrario del porcentaje de materia orgánica, el porcentaje de cenizas aumentará a mayores profundidades, de 82.04 a 90.45 %, por las razones dichas anteriormente. Ver **figura 3.5**

En la **figura 3.6** se observa que el carbono orgánico total disminuye conforme aumenta la profundidad en los lodos. Esto probablemente a que a mayor profundidad, habrá una mayor actividad microbiana que consuma el carbono orgánico en el proceso de descomposición de los lodos.

La relación C/N de los lodos se mantiene baja a diferentes profundidades, como se muestra en la **figura 3.8**. La proporción de carbono (**figura 3.6**) presente en los lodos supera, en tan solo, 11 a 18 veces la proporción de nitrógeno (**figura 3.7**), lo cual representa un equilibrio de carbono y nitrógeno baja. Lo que ocasionó la presencia de malos olores a partir de los 50 cm de profundidad.

El fósforo se mantiene estable a diferentes profundidades, como se muestra en la **figura 3.9**.

En los **figuras 3.10 y 3.11** se aprecia que la densidad poblacional de microorganismos coliformes totales y coliformes termotolerantes (fecales) no es muy alta, como era de esperarse por ser de lodos obtenidos de las lagunas de estabilización. Esto se puede atribuir a que los lodos han estado almacenados cerca de un año bajo intensos niveles de radiación solar, lo cual disminuye significativamente la actividad microbiológica.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los análisis de los lodos obtenidos de las lagunas de estabilización.

- **Humedad**

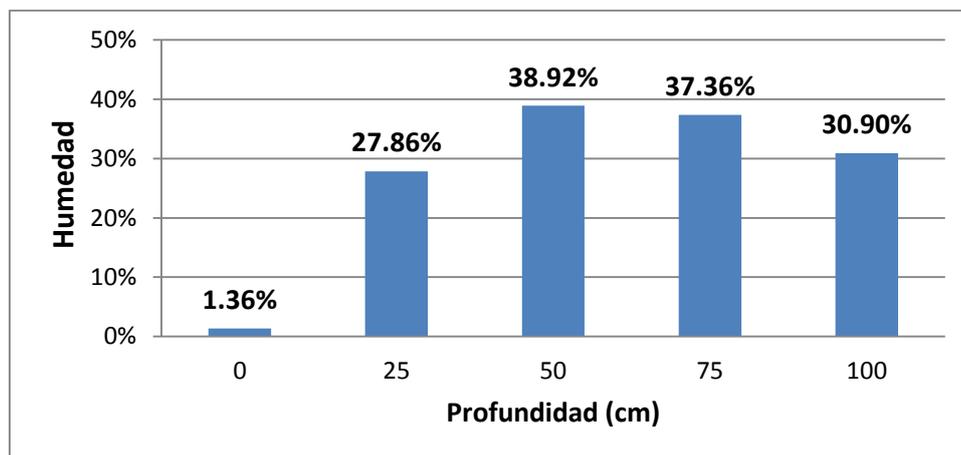


Figura 3.1. Porcentaje de humedad presente en lodos a diferentes profundidades.

- pH

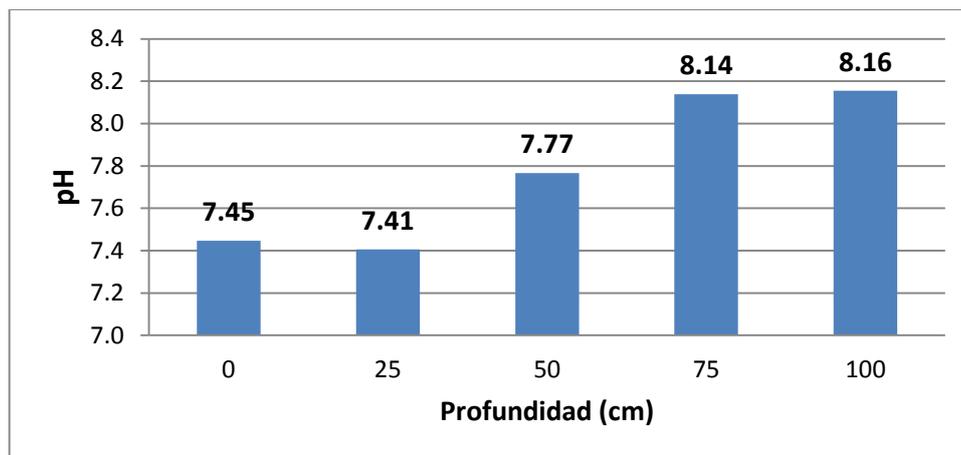


Figura 3.2. pH presente en los lodos a diferentes profundidades.

- Conductividad eléctrica

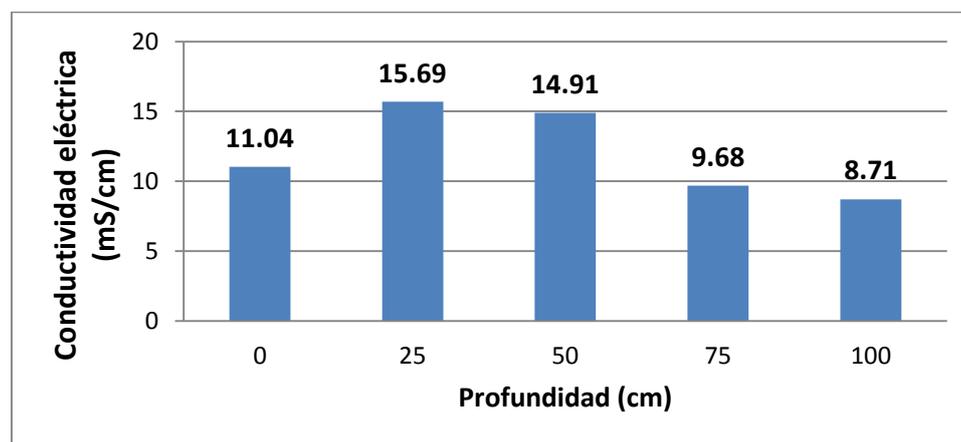


Figura 3.3. Conductividad eléctrica presente en los lodos a diferentes profundidades.

- Materia orgánica

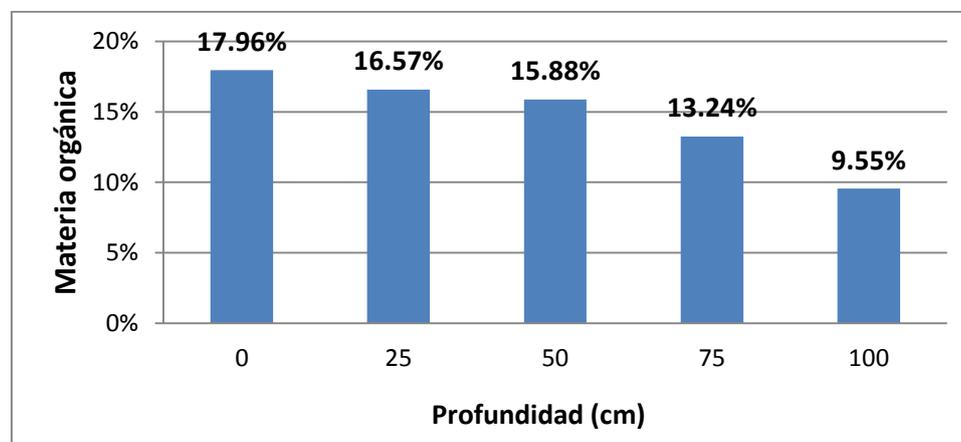


Figura 3.4. Porcentaje de materia orgánica presente en lodos a diferentes profundidades.

- **Cenizas**

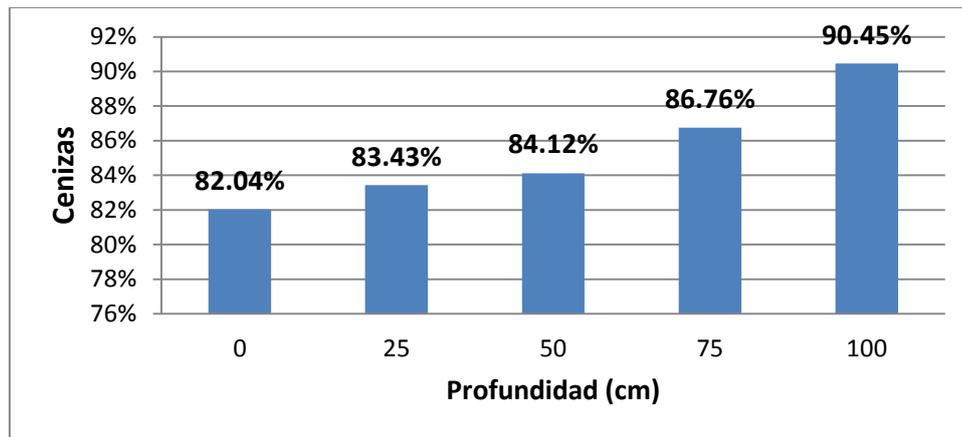


Figura 3.5. Porcentaje de cenizas presentes en los lodos a diferentes profundidades

- **Carbono orgánico total**

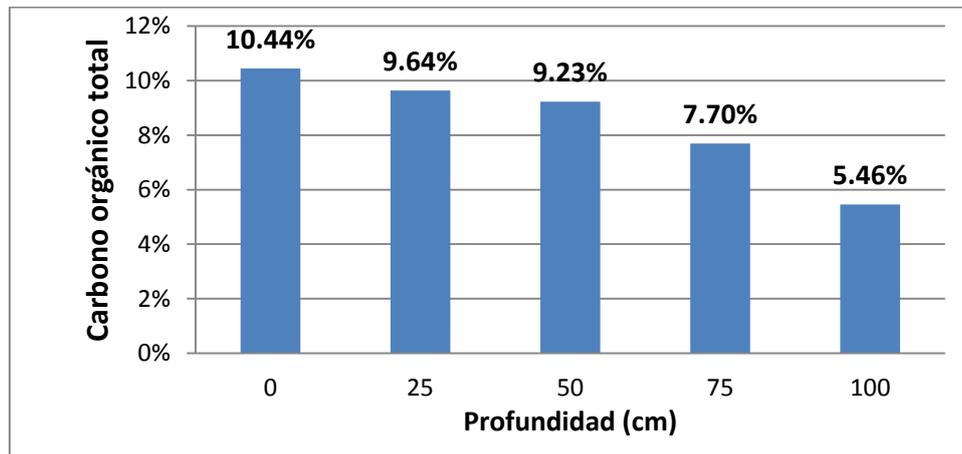


Figura 3.6. Porcentaje de carbono orgánico total en los lodos a diferentes profundidades.

- **Nitrógeno total**

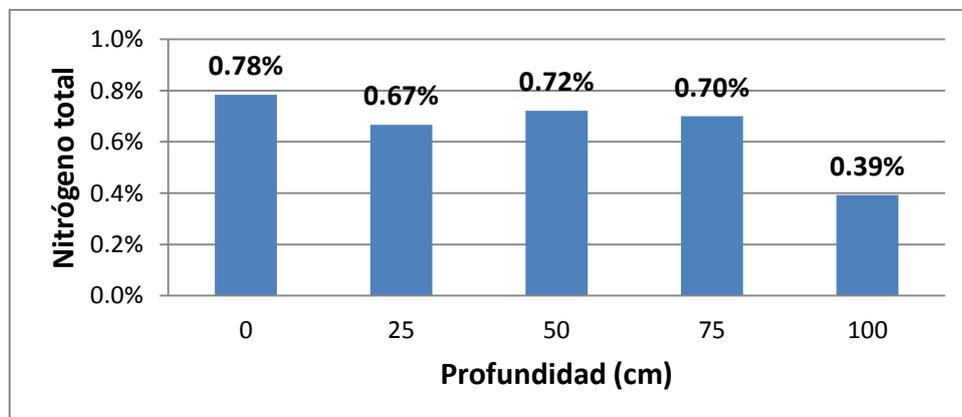


Figura 3.7. Porcentaje de nitrógeno total en los lodos a diferentes profundidades.

- **Relación carbono / nitrógeno**

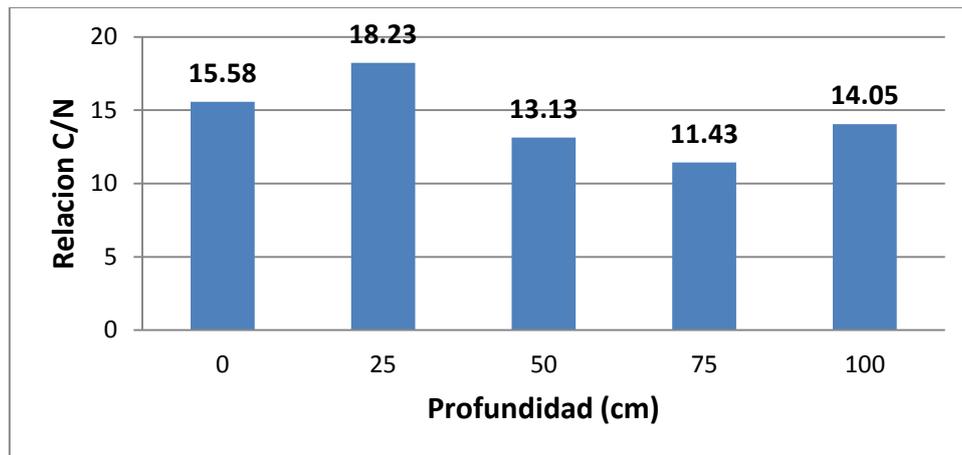


Figura 3.8. Relación de C/N presente en los lodos a diferentes profundidades.

- **Fósforo**

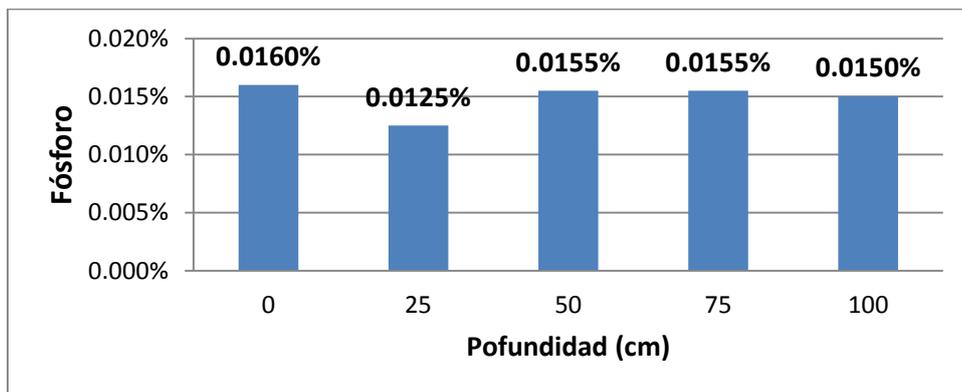


Figura 3.9. Porcentaje de fósforo presente en los lodos a diferentes profundidades.

- **Coliformes totales**

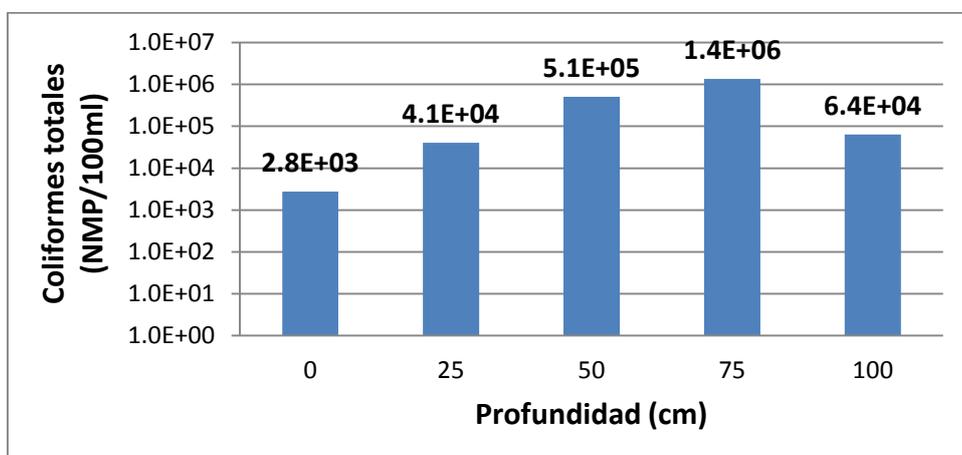


Figura 3.10. Densidad de coliformes totales presentes en los lodos a diferentes profundidades.

- **Coliformes fecales**

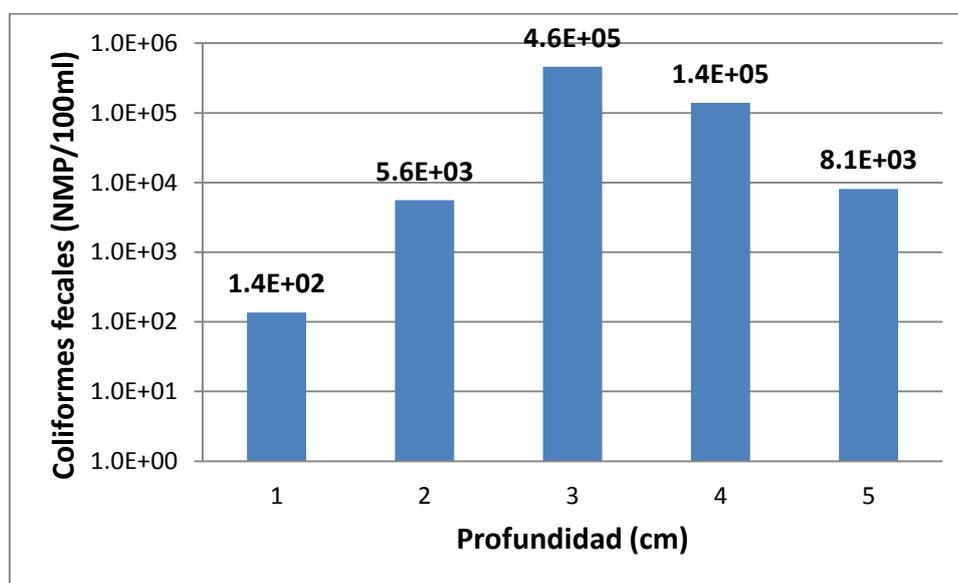


Figura 3.11. Densidad de coliformes fecales presentes en los lodos a diferentes profundidades.

3.1.2 Caracterización de los residuos de poda de jardín

En la **tabla 3.1** se muestran los valores de los parámetros físico-químicos de los residuos de jardín presentes en las áreas verdes de la Universidad de Piura.

Tabla 3.1. Parámetros analizados de los residuos de jardín.

Parámetros	Valor
Humedad (%)	24.43
pH	6.79
Materia orgánica (%)	76.73
Cenizas (%)	23.27
Carbono orgánico total (%)	44.61
Nitrógeno total (%)	1.33
Relación carbono/nitrógeno	33.54
Fósforo (%)	0.19

3.1.3 Caracterización de la hojarasca de algarrobo

En la **tabla 3.2** se muestran los valores de los parámetros físicos y químicos de la hojarasca de algarrobo presente en los bosques de la Universidad de Piura.

Tabla 3.2. Parámetros analizados de la hojarasca de algarrobo.

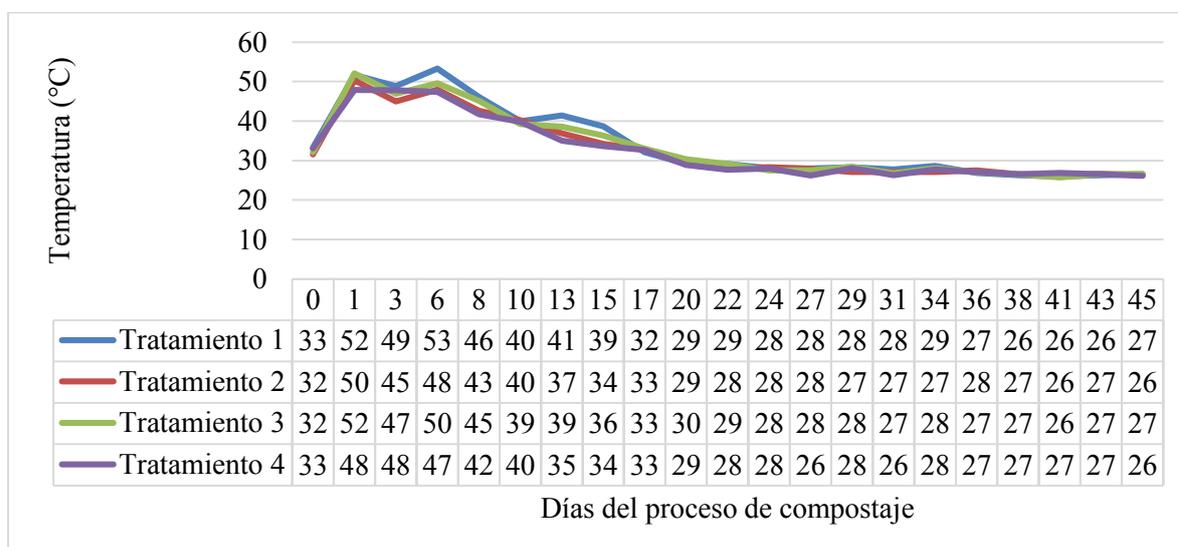
Parámetros	Valor
Humedad (%)	6.55
pH	6.89
Materia orgánica (%)	54.72
Cenizas (%)	45.28
Carbono orgánico total (%)	31.81
Nitrógeno total (%)	2.19
Relación carbono/nitrógeno	14.53
Fósforo (%)	0.023

3.2 Resultados de los análisis a lo largo del proceso de compostaje

A continuación se mostrarán los resultados de los parámetros analizados a lo largo del proceso de compostaje para las 12 pilas. Los resultados que se muestran son los valores promedios de dichos parámetros. Así mismo se hará un pequeño análisis de cada uno de ellos.

3.2.1 Temperatura

La temperatura se midió desde el momento en que se formaron las pilas de compostaje, siendo el “día 0”, el momento en que se confeccionaron las pilas. **Ver figura 3.12**

**Figura 3.12.** Temperatura de los tratamientos durante el proceso de compostaje

La temperatura a lo largo del proceso de compostaje tuvo un comportamiento normal en los cuatro tratamientos. Las etapas del proceso de compostaje, descritas en el apartado 1.3.7.1.2, se presentan de la siguiente manera:

- De la formación de las pilas (día 0) al día 1, la temperatura se mantuvo entre 32 y 52 °C, esto indica que el proceso de compostaje pasó de la etapa mesofílica a inicios de la etapa termofílica.

- Del día 1 al día 6, la temperatura empezó a subir, y se mantuvo entre 48 y 53 °C, por lo que el proceso de compostaje se encontraba en la etapa termofílica.
- Del día 6 al día 8, la temperatura empezó a disminuir, hasta alcanzar los 42 °C, encontrándose en la etapa de enfriamiento.
- Del día 8 hasta el final del proceso, la temperatura siguió disminuyendo, de 43 °C hasta una temperatura ambiente de 27 °C, por lo que en estos días, el proceso se encontró en su etapa final de maduración.

3.2.2 Humedad

Como se muestra en la **figura 3.13**, la humedad se mantiene entre los rangos admisibles de 33 a 62 %. Se considera que la humedad a lo largo del proceso de compostaje se mantuvo en condiciones normales (40 % - 60 %).

En el compost obtenido como producto final (muestreo 4) la humedad disminuyó, respecto a los muestreos anteriores, esto debido a que el compost en la última semana se dejó de regar para facilitar el proceso de tamizado.

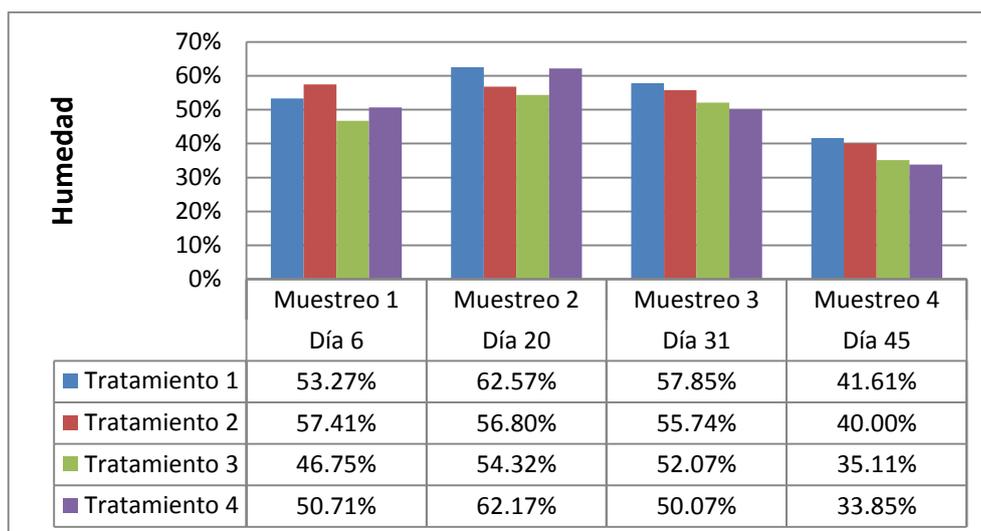


Figura 3.13. Porcentaje de humedad durante el proceso de compostaje.

3.2.3 pH

Como se aprecia en la **figura 3.14**, se empezó el proceso de compostaje (muestreo 1) con un pH muy básico, por encima de 8; pero a lo largo del tiempo el pH fue disminuyendo, hasta alcanzar valores cercanos a un pH neutro, los cuales se encuentran dentro de los rangos permisibles de pH (6.5 – 8). El tratamiento 4 es el que más se acerca a valores neutros de pH.

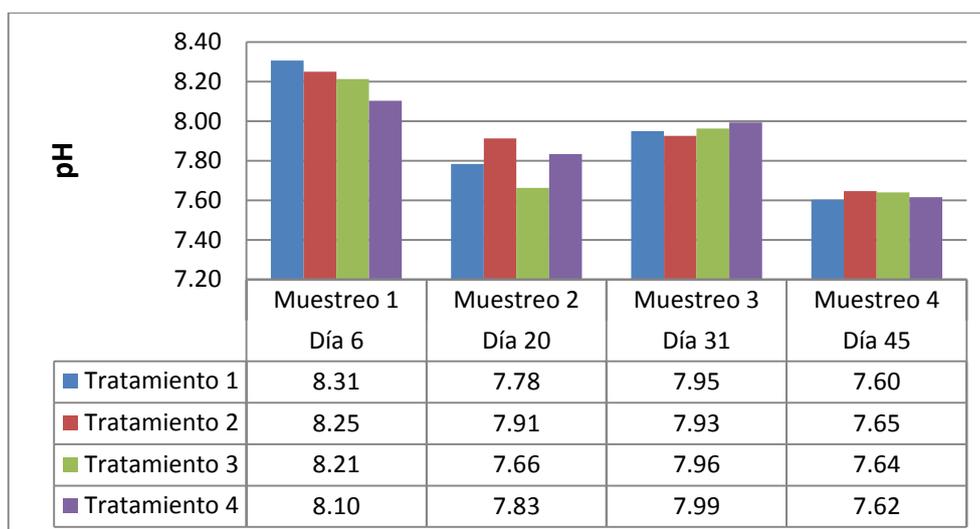


Figura 3.14. Nivel de pH durante el proceso de compostaje.

3.2.4 Fósforo total

Como se muestra en la **figura 3.15**, los niveles de fósforo total se mantuvieron muy bajos a lo largo de todo el proceso de compostaje. Al final del proceso de compostaje se obtuvieron niveles más altos de fósforo, para los tratamientos 2 y 3.

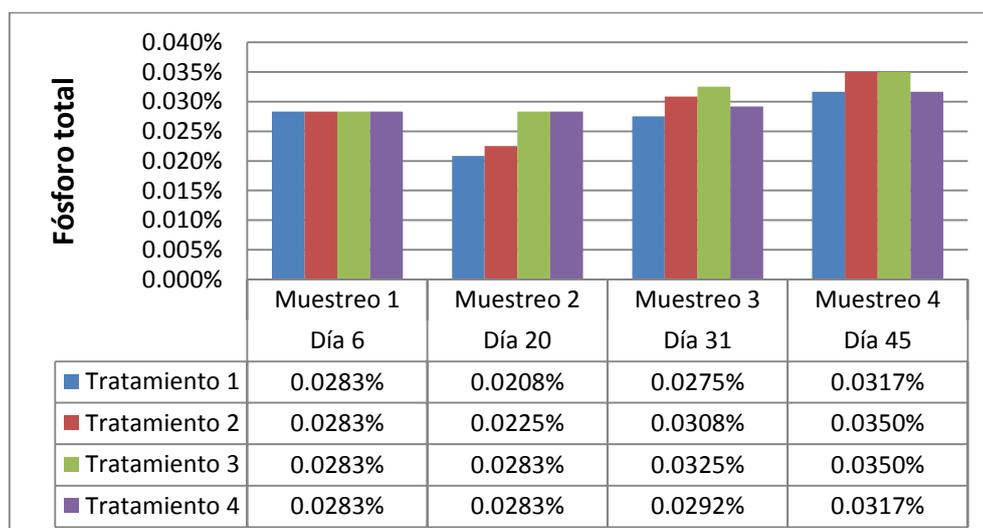


Figura 3.15. Porcentaje de fósforo total durante el proceso de compostaje.

3.2.5 Cenizas

Como se observa en la **figura 3.16**, los valores de cenizas se mantuvieron casi constantes y dentro de los límites ideales (20 – 65 %) para los tres primeros muestreos. Al final del proceso de compostaje los valores de cenizas superan a los rangos permisibles, a excepción del tratamiento 1.

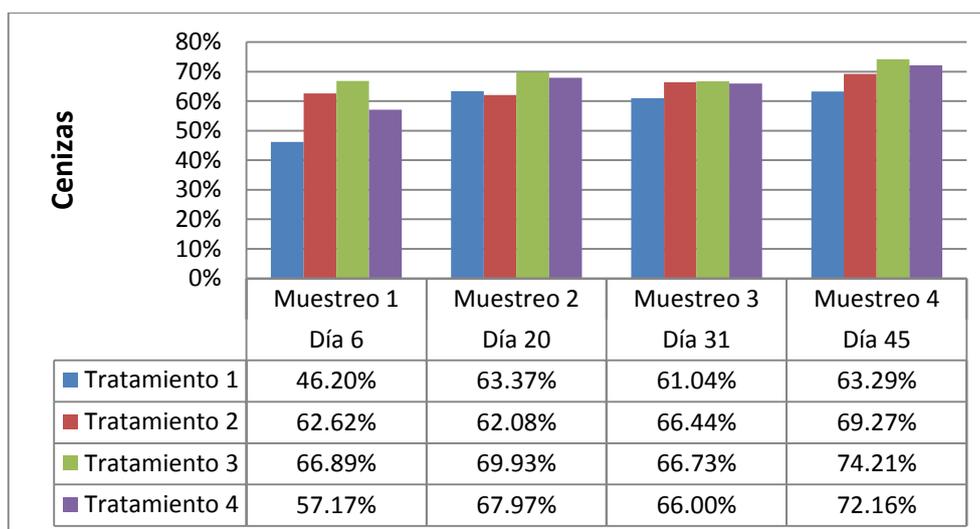


Figura 3.16. Porcentaje de cenizas durante el proceso de compostaje.

3.2.6 Materia orgánica

Como se observa en la **figura 3.17**, la materia orgánica se mantiene dentro de sus rangos permisibles (25 – 50 %), a excepción del tratamiento 1 en el primer muestreo, cuyo valor arroja 53.80 % de materia orgánica, pero siendo este muy cercano al 50 %, se puede considerar como un valor permisible.

A lo largo del proceso de compostaje la proporción de materia orgánica ha ido disminuyendo, hasta llegar a su nivel más bajo (25.79 %) en el tratamiento 3 de la etapa final del compost. Lo que demuestra que en este tratamiento, hubo una mayor actividad microbiana; es decir, mayor consumo de materia orgánica por parte de los microorganismos.

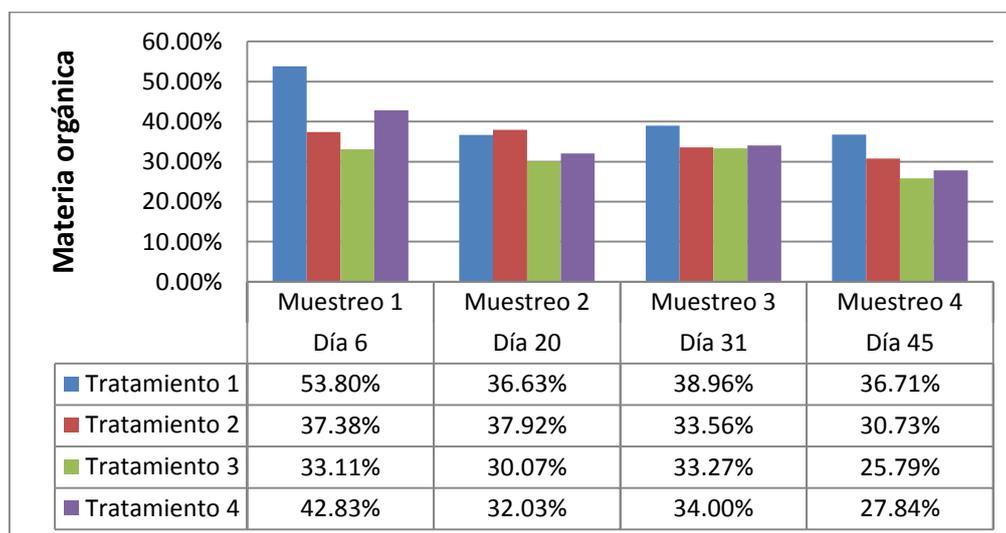


Figura 3.17. Porcentaje de materia orgánica durante el proceso de compostaje.

3.2.7 Carbono orgánico total

Como se puede apreciar en la **figura 3.18**, las proporciones de carbono orgánico a lo largo del proceso de compostaje se mantienen en condiciones normales (8 – 50 %). El carbono

orgánico ha ido disminuyendo a lo largo de este proceso, lo cual es atribuible a su consumo, como medio de energía, por parte de los microorganismos encargados de la descomposición.

El valor más bajo de carbono orgánico se aprecia en el tratamiento 3 del proceso final del compost, este consumió mayor cantidad de carbono orgánico, debido a la mayor actividad microbiana presente en dicho tratamiento (descrita en el apartado 3.3.6).

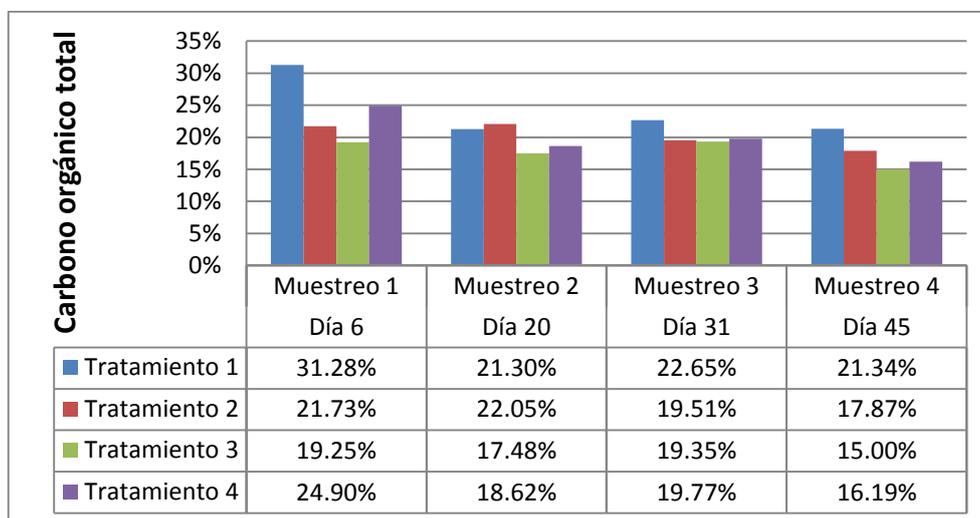


Figura 3.18. Porcentaje de carbono orgánico total durante el proceso de compostaje.

3.2.8 Nitrógeno total

La **figura 3.19** muestra un nivel de nitrógeno normal (0.3 – 3.5 %) a lo largo del proceso de compostaje. El nitrógeno es utilizado por los microorganismos para la síntesis de proteínas, por lo cual se recomienda tener valores considerables de este elemento, para ayudar al crecimiento microbiano.

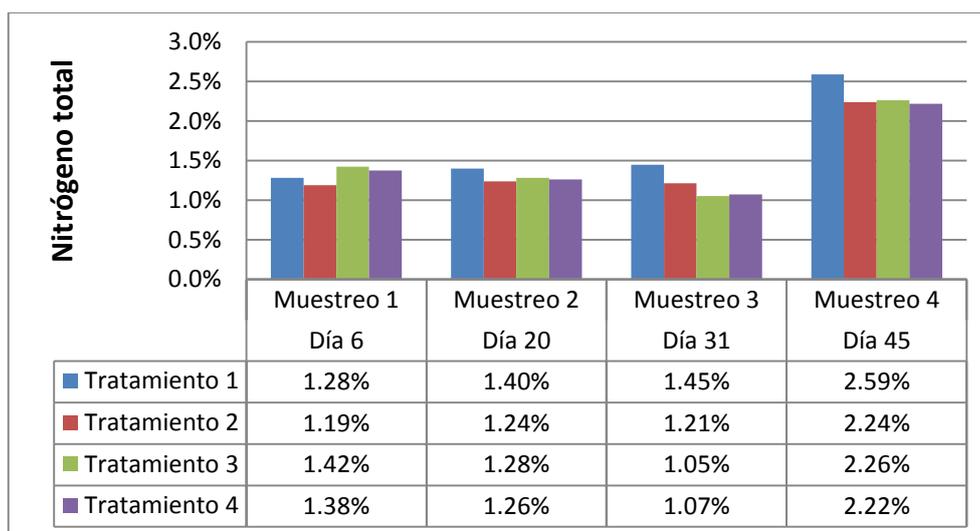


Figura 3.19. Porcentaje de nitrógeno total durante el proceso de compostaje.

En los tres primeros muestreos se observaron valores cercanos, pero en la última etapa del compost, se observó un aumento considerable del nitrógeno total, lo cual quiere decir que esta sustancia dejó de consumirse y, por consiguiente, la población microbiana dejó de crecer; el proceso se encuentra en su etapa final de maduración.

3.2.9 Relación carbono / nitrógeno

En la **figura 3.20**, se muestra la relación carbono / nitrógeno, la cual se mantuvo casi constante durante los tres primeros muestreos, pero en el cuarto muestreo disminuyó casi a la mitad, en gran parte debido al aumento del nitrógeno. Es decir, que la relación C/N fue menor debido a que el grado de mineralización del nitrógeno orgánico fue mayor, por lo tanto la calidad edáfica del compost es superior.

Los tratamientos 1, 2 y 3 del proceso final del compost presentan relaciones C/N entre 8 y 10, por lo que se puede decir que arrojaron compost de buena calidad edáfica; sin embargo, el tratamiento 4 del proceso final del compost, es el de mejor calidad, debido que presenta una relación C/N menor a 8, por lo que se clasifica en un compost de muy buena calidad edáfica (La clasificación, respecto a las calidades del compost se muestra en el apartado 1.3.7.2.5).

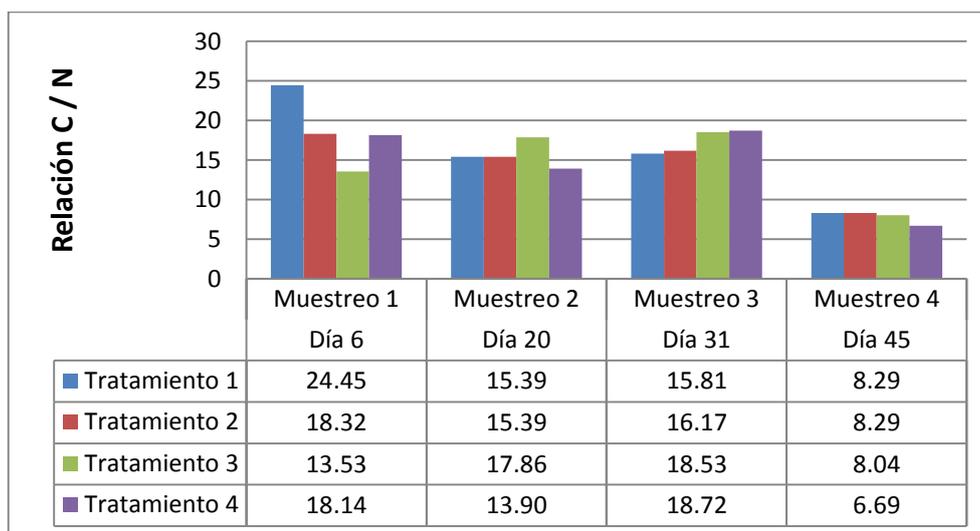


Figura 3.20. Relación carbono / nitrógeno durante el proceso de compostaje.

3.2.10 Coliformes totales y fecales

Según la **figura 3.22**, ningún tratamiento alcanzó el rango permisible ($< 1 \times 10^5$ NMP / 100 g compost) de densidad de coliformes fecales, en un tiempo de 47 días.

El tratamiento 4 es el que presenta una mayor densidad de coliformes fecales, con respecto a los demás tratamientos, pero se observa una tendencia decreciente a lo largo del tiempo.

Para el tratamiento 1 se observa una tendencia decreciente con valores más cercanos al valor permisible, por lo cual se puede asegurar que en determinado tiempo, más corto que los otros tratamientos, se alcanzará el valor permisible.

Los tratamientos 2 y 3 muestran irregularidades, por lo que no se puede asegurar su comportamiento futuro.

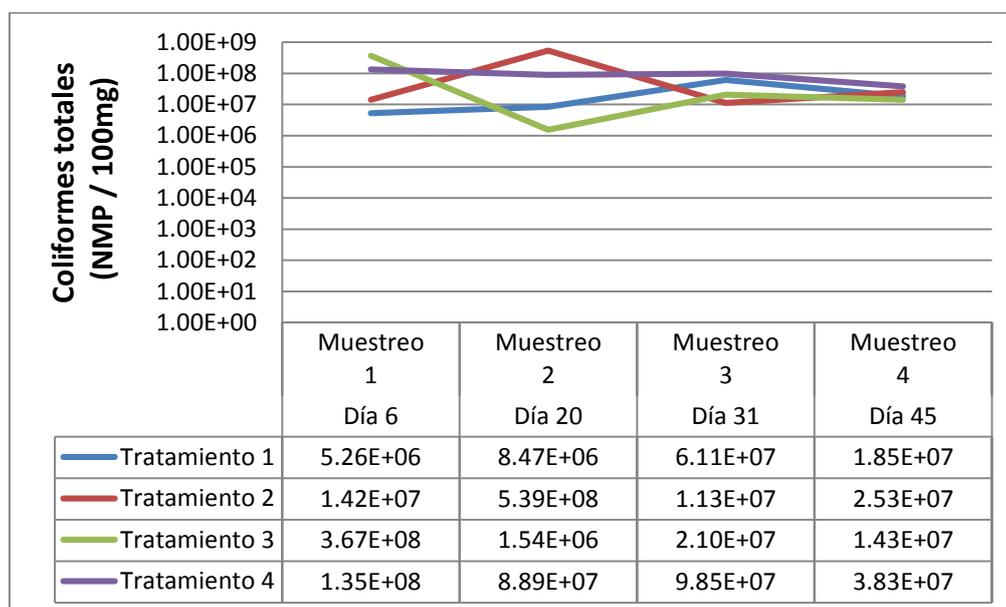


Figura 3.21. Densidad de coliformes totales durante el proceso de compostaje.

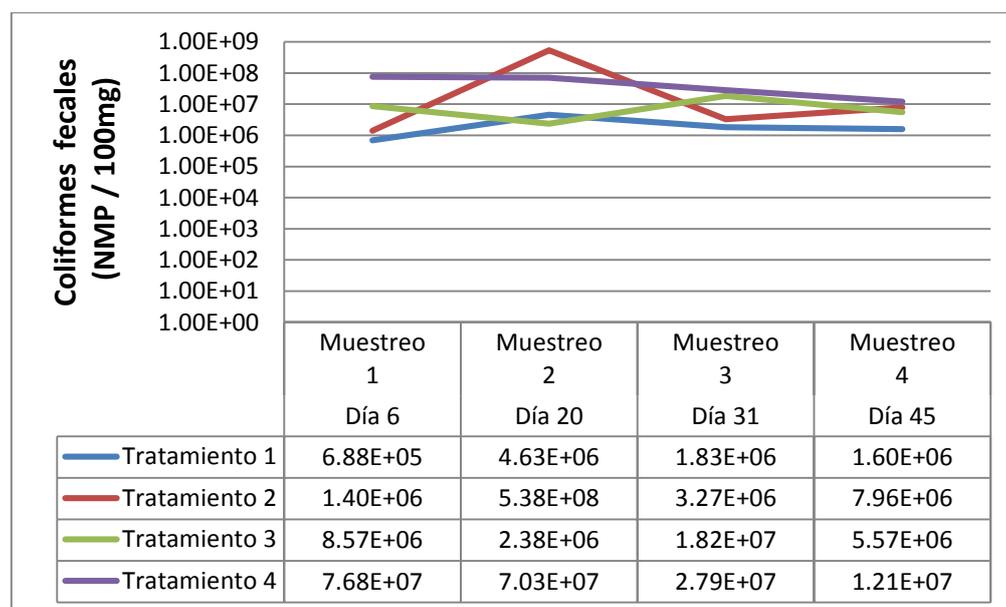


Figura 3.22. Densidad de coliformes fecales durante el proceso de compostaje.

3.3 Análisis de resultados antes y después del proceso de compostaje

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos en la fase de laboratorio, para los materiales antes del proceso de compostaje (apartado 3.1) y el compost obtenido luego del proceso de compostaje (apartado 3.2). Así mismo, se elegirá un tratamiento óptimo, el cual contará con los mejores índices de calidad para la utilización del compost en agricultura.

Se analizarán todos los parámetros para elección de un tratamiento óptimo; sin embargo, cabe mencionar que los parámetros críticos que influyen en la elección de uno u otro tratamiento son:

- Proporción de carbono orgánico total.
- Proporción de nitrógeno total.
- Relación carbono – nitrógeno
- Densidad de microorganismos coliformes

3.3.1 Análisis bajo el criterio de la humedad

Se aprecia en la **figura 3.23** que los materiales iniciales presentaron humedades bajas, las cuales aumentaron luego de finalizado el proceso de compostaje debido al riego diario que se le aplicaba a las pilas de compostaje.

Los tratamientos 1 y 2 son los que se encuentran entre los rangos ideales de humedad (40 – 60 %). La variación entre estos tratamientos es muy pequeña, por lo que es indiferente la elección de uno u otro con respecto a la humedad. Cabe mencionar que la humedad no es un parámetro determinante para la elección de un buen compost, debido a que esta se puede disminuir fácilmente poniendo el compost a secar al sol, o en caso contrario, puede aumentar, regándolo.

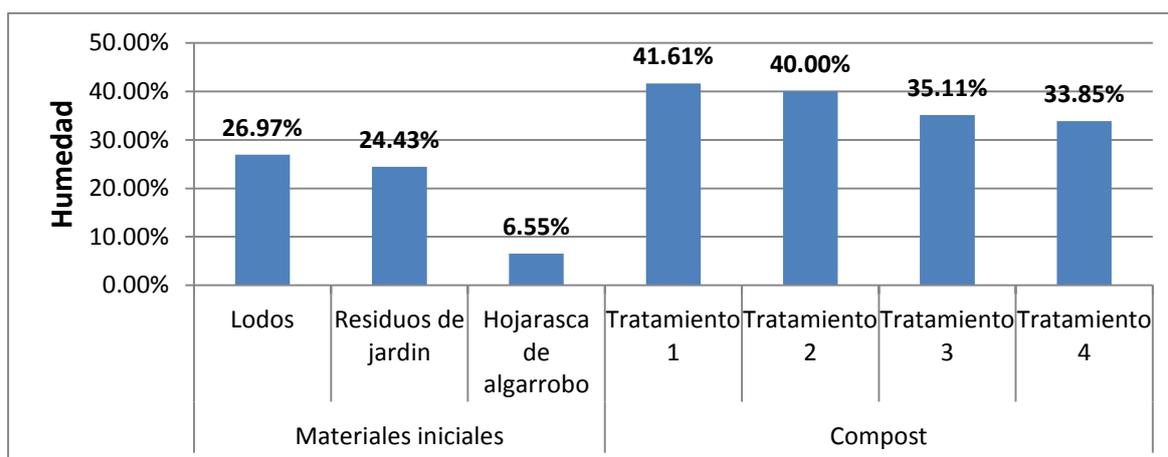


Figura 3.23. Porcentaje de humedad antes y después del proceso de compostaje.

3.3.2 Análisis bajo el criterio del pH

Antes de iniciado el proceso de compostaje los lodos, la hojarasca de algarrobo y los residuos de jardín presentaron valores de pH cercanos al neutro. Para el final del proceso de compostaje, el pH del compost se volvió ligeramente básico, con valores aceptables, en los cuatro tratamientos, entre 7.60 – 7.65; por tanto, resulta indiferente la elección de un tratamiento óptimo, con respecto al pH. Ver **figura 3.24**

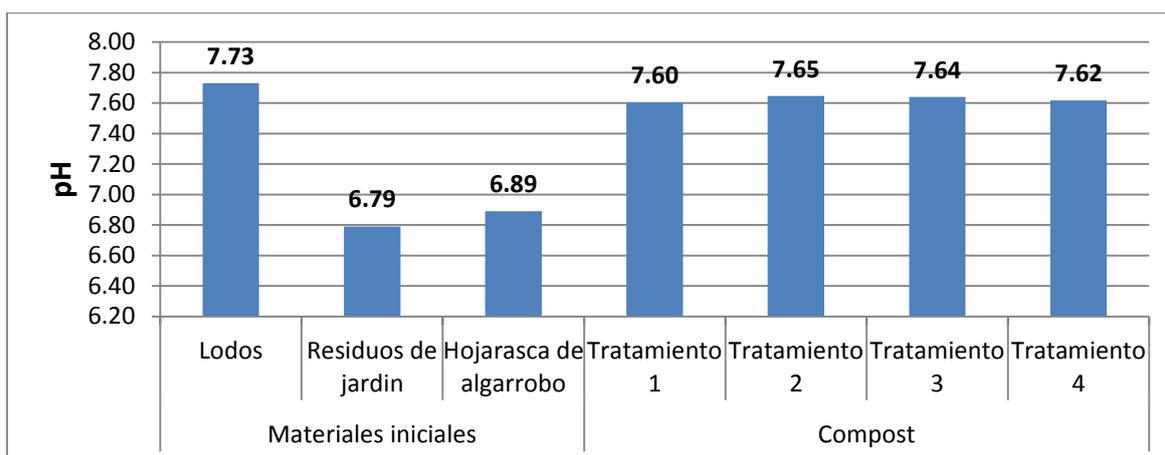


Figura 3.24. pH antes y después del proceso de compostaje.

3.3.3 Análisis bajo el criterio del fósforo total

Como se ve en la **figura 3.25**, los residuos de jardín presentaron valores relativamente altos de fósforo, con respecto a los lodos y a la hojarasca de algarrobo; sin embargo, luego del proceso de compostaje, los valores de fósforo en el compost disminuyeron, haciéndose casi constantes para los cuatro tratamientos.

Ni el compost, ni los materiales utilizados para la producción de este cumplen con los estándares de calidad del fósforo (0.3 – 3.5 %), por tanto la elección de uno u otro tratamiento con respecto al fósforo se descarta.

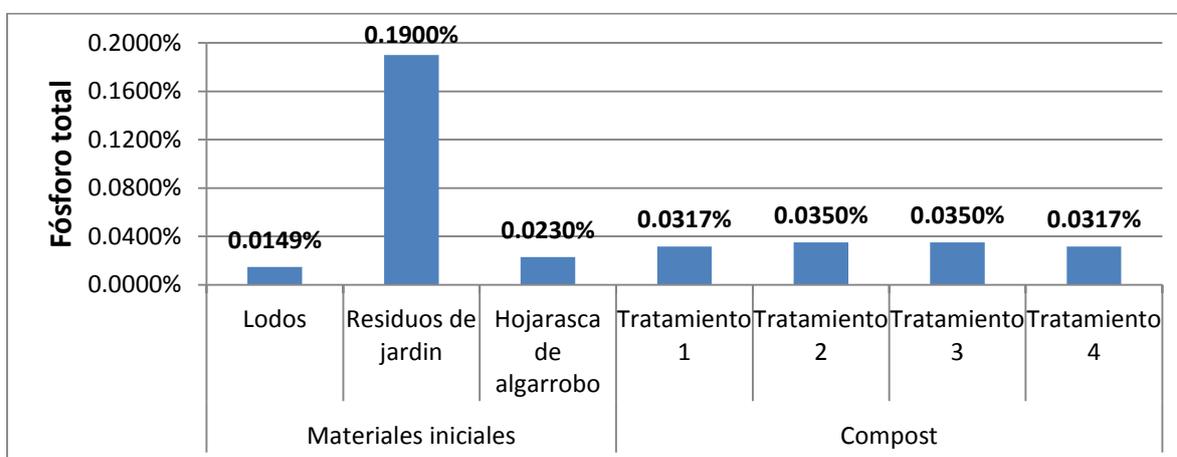


Figura 3.25. Porcentaje de fósforo total antes y después del proceso de compostaje.

3.3.4 Análisis bajo el criterio de las cenizas

Los lodos y los residuos de jardín presentaron valores muy altos de cenizas, mayores a los normales (25 – 65%); sin embargo la hojarasca de algarrobo presentó valores menores de cenizas dentro del valor aceptable de calidad en este parámetro. Ver **figura 3.26**.

El tratamiento 1 fue el que utilizó mayor cantidad de hojarasca de algarrobo para su formación; en consecuencia, luego del proceso de compostaje, el compost resultante de este

tratamiento obtuvo la menor proporción de cenizas y es el único que se encuentra dentro del rango permisible de calidad para este parámetro, en relación a los otros tratamientos. Por tanto se elige al tratamiento 1 como el tratamiento óptimo, con respecto a la proporción de cenizas presentes.

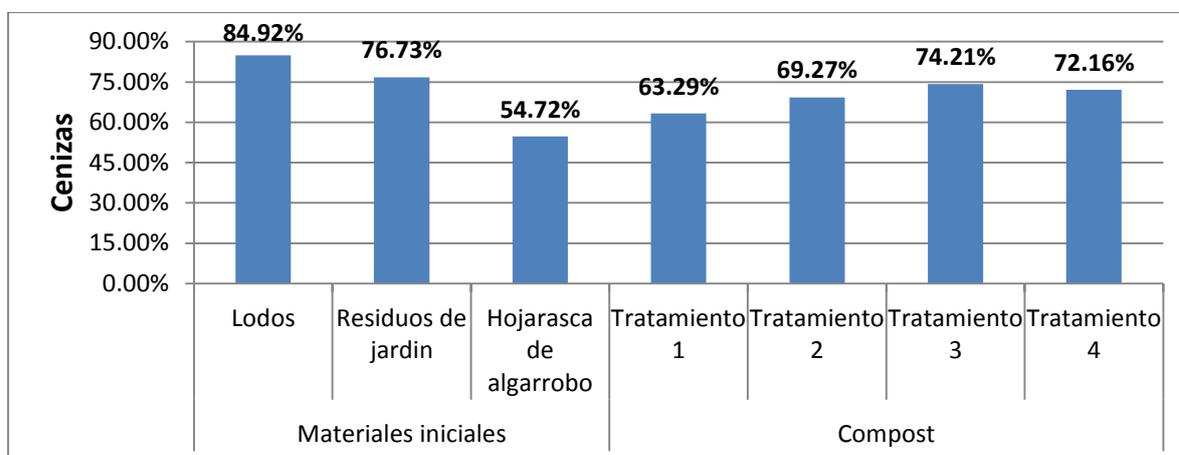


Figura 3.26. Porcentaje de cenizas antes y después del proceso de compostaje.

3.3.5 Análisis bajo el criterio de la materia orgánica total

Al contrario del porcentaje de cenizas, los lodos y los residuos de jardín obtuvieron valores muy bajos de materia orgánica, y la hojarasca de algarrobo tuvo la mayor cantidad de materia orgánica, siendo el único material que cumple con los valores estándares de este parámetro (25 - 50 %). Ver **figura 3.27**.

El compost obtenido luego del proceso de compostaje presentó valores permisibles de materia orgánica en sus cuatro tratamientos; pero se elige como el óptimo al compost del tratamiento 1, por ser el que posee una mayor cantidad de materia orgánica, con respecto a los otros tratamientos.

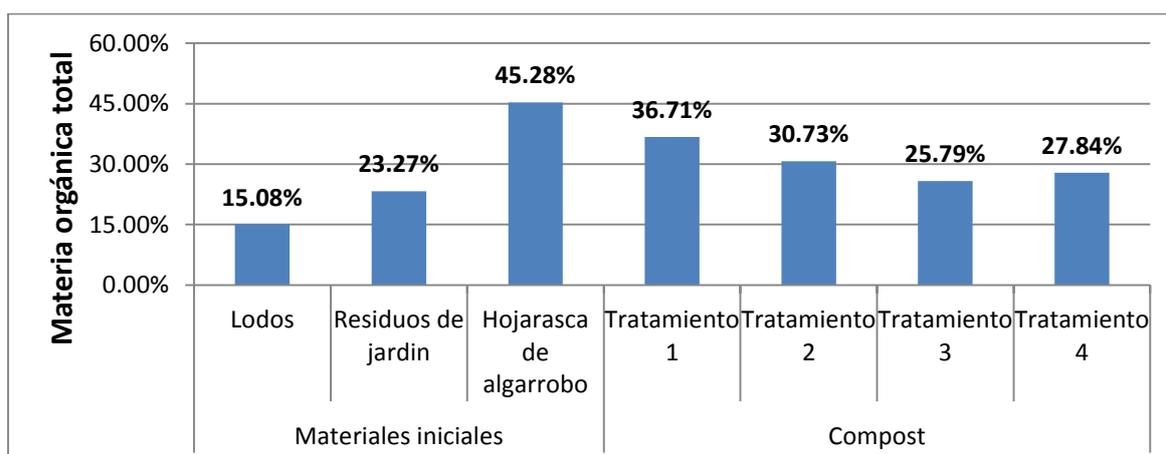


Figura 3.27. Porcentaje de materia orgánica total antes y después del proceso de compostaje.

3.3.6 Análisis bajo el criterio del carbono orgánico total

Según lo presentado en la **figura 3.28**, los lodos contienen una pequeña cantidad de carbono orgánico, dentro del rango permisible de calidad (8 – 50 %); sin embargo con la ayuda de la hojarasca de algarrobo y de los residuos de jardín (altos valores de carbono), se logró incrementar esta proporción en el compost obtenido en los cuatro tratamientos, luego del proceso de compostaje.

El carbono orgánico presente en el compost de los cuatro tratamientos se encuentra dentro de los valores permisibles, pero se elige al tratamiento 1 como óptimo por ser el que posee mayor cantidad de este parámetro, con respecto a los demás tratamientos.

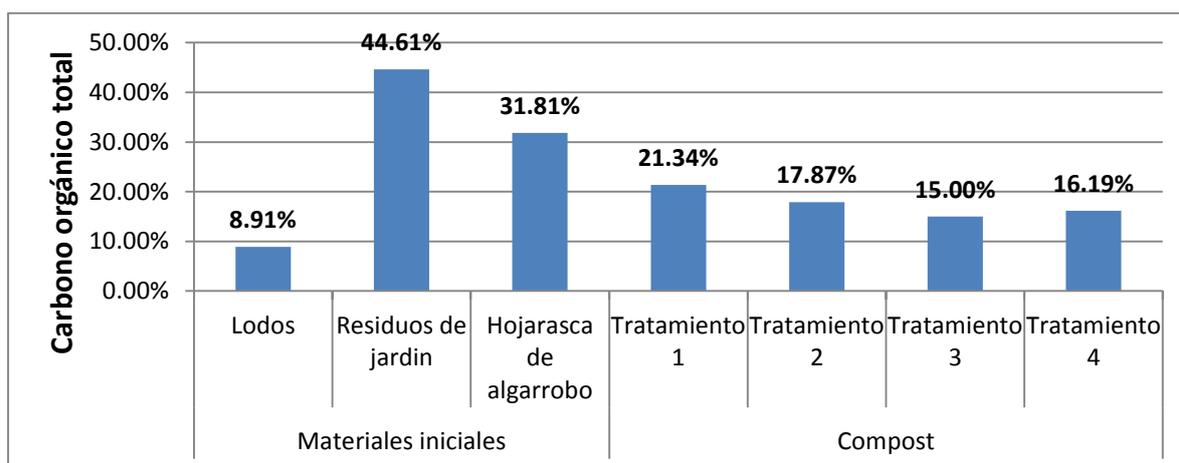


Figura 3.28. Porcentaje de carbono orgánico total antes y después del proceso de compostaje.

3.3.7 Análisis bajo el criterio del nitrógeno total

Al igual que el carbono orgánico, los lodos contienen la menor cantidad de nitrógeno total en su composición; sin embargo con la ayuda de la hojarasca de algarrobo y de los residuos de jardín, se logró incrementar esta proporción en el compost obtenido en los cuatro tratamientos, luego del proceso de compostaje. Ver **figura 3.29**.

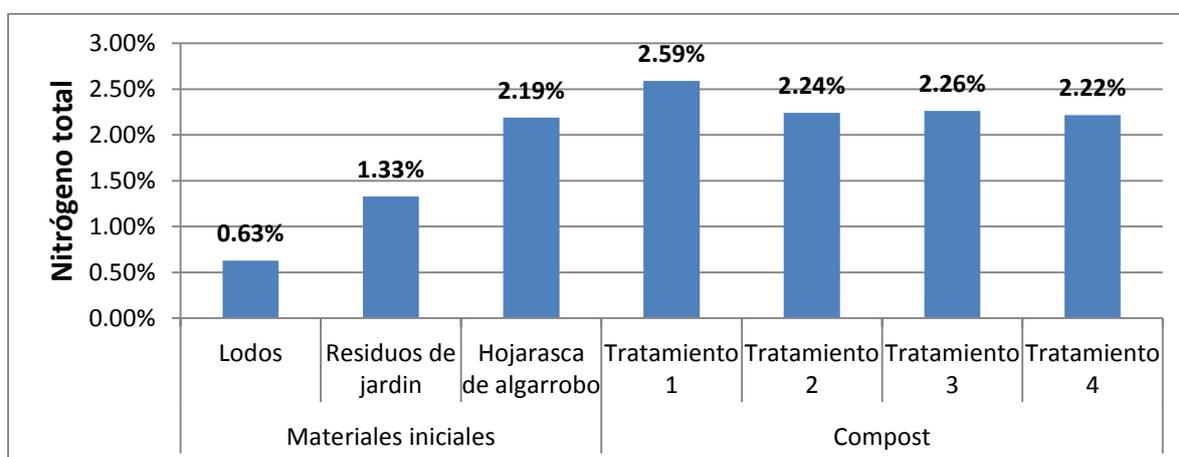


Figura 3.29. Porcentaje de nitrógeno total antes y después del proceso de compostaje.

El nitrógeno total presente en el compost de los cuatro tratamientos se encuentra dentro de los valores permisibles (0.4 – 3.5 %), pero se elige al tratamiento 1 como óptimo por ser el que posee mayor cantidad de este parámetro, con respecto a los demás tratamientos.

3.3.8 Análisis bajo el criterio de la relación carbono - nitrógeno

Para el inicio del proceso de compostaje se considera una relación C/N ideal de 25 a 30; pero, como se aprecia en la **figura 3.30**, ningún material se encuentra dentro de este rango; sin embargo, los lodos y los residuos de jardín poseen valores muy cercanos a este rango; por tal razón, se puede considerar que los materiales iniciales son aceptables para obtener un compost de calidad.

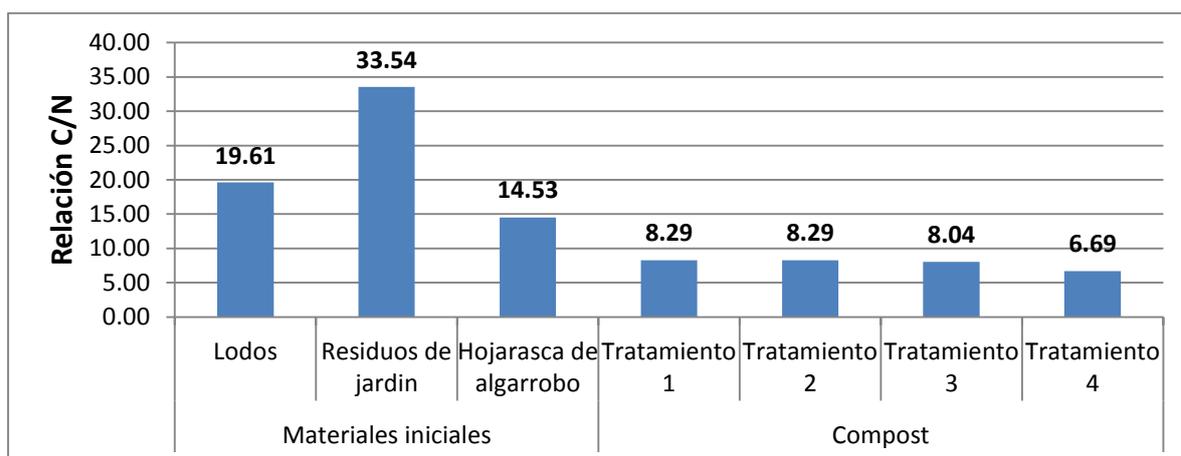


Figura 3.30. Relación carbono / nitrógeno antes y después del proceso de compostaje.

Ahora, teniendo en cuenta el compost como producto final, se puede decir que mientras menor sea el valor de esta relación, mayor será el grado de mineralización (liberación de nitrógeno orgánico, mediante su transformación en amonio) de la materia orgánica y, por tanto, la calidad edáfica del compost será superior (Véase apartado **1.3.7.2.5**).

El compost obtenido del tratamiento 4 presenta una relación más estable entre carbono orgánico y nitrógeno total, y se clasifica como un compost de muy buena calidad edáfica (Relación C/N < 8); por tanto se elige el tratamiento 4 como el óptimo. Cabe mencionar que el compost obtenido de los tratamientos 1, 2 y 3 se encuentran bajo una clasificación de compost de buena calidad (Relación C/N = 8 -10), por lo que no se descartan sus usos eficientes en agricultura.

3.3.9 Análisis bajo el criterio de la densidad de coliformes

Para el caso de los residuos de jardín y la hojarasca de algarrobo no se analizó su densidad de coliformes por ser estas demasiado bajas, con respecto a los lodos y al compost.

Se aprecia en los **figuras 3.31 y 3.32**, que los coliformes aumentaron en el compost con respecto a los lodos, esto debido a que se aumenta la actividad microbiana por el hecho de que las pilas se regaron todos los días.

Ningún compost obtenido de los cuatro tratamientos se encuentra dentro del rango de calidad para la densidad de coliformes fecales (< 1×10^5 NMP / 100 g de compost), por tanto no se

puede escoger un tratamiento óptimo. El valor más cercano al rango permisible lo tiene el tratamiento 1, con respecto a los demás tratamientos.

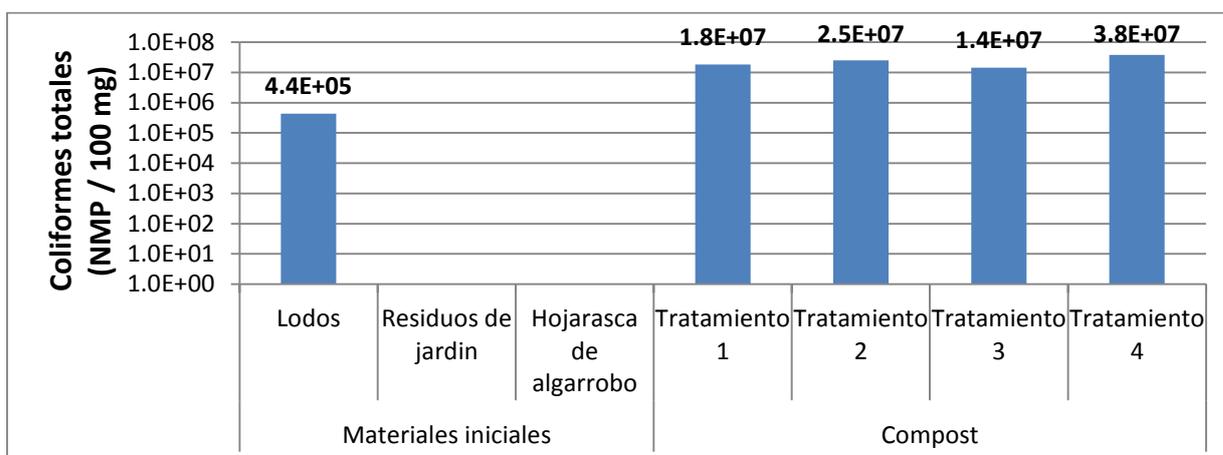


Figura 3.31. Densidad de coliformes totales antes y después del proceso de compostaje.

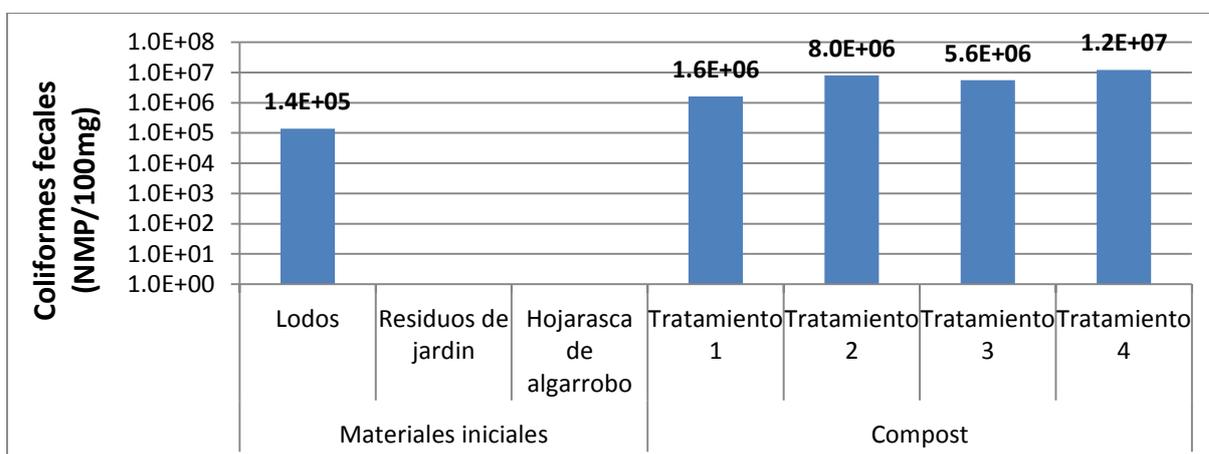


Figura 3.32. Densidad de coliformes fecales antes y después del proceso de compostaje.

3.4 Elección del tratamiento óptimo

Haciendo un resumen de lo visto anteriormente se obtiene la **tabla 3.3**, en la que se muestra el cumplimiento o no de los parámetros con los índices de calidad para un compost de calidad.

En el caso de los coliformes se puede decir que el tratamiento 1 es el óptimo porque es el que más se acerca a los valores deseables de calidad; además se vio en el apartado **3.2.10** que este tratamiento posee una tendencia decreciente a lo largo del tiempo, y es capaz de alcanzar el valor deseable en un menor tiempo que los demás tratamientos.

Tabla 3.3: Elección del tratamiento más eficiente.

Parámetros	Estado	Índice de calidad				Tratamiento óptimo
		Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Tratamiento 4	
Humedad	No crítico	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	Tratamiento 1
pH	No crítico	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Indiferente
Fósforo	No crítico	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	Descarta
Cenizas	No crítico	Cumple	No cumple	No cumple	No cumple	Tratamiento. 1
Materia orgánica	Crítico	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Tratamiento 1
Carbono orgánico total	Crítico	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Tratamiento 1
Nitrógeno total	Crítico	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Tratamiento 1
Relación C/N	Crítico	Buena calidad	Buena calidad	Buena calidad	Muy buena calidad	Tratamiento 4
Coliformes	Crítico	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple	Tratamiento 1

Se puede concluir que el compost obtenido del tratamiento 1 es el de mejor calidad, y por tanto se debe elegir a este tratamiento como el más eficiente.

Cabe mencionar que bajo el análisis de la relación C/N el óptimo sería el tratamiento 4 (muy buena calidad), pero también se ve que los demás tratamientos poseen una buena calidad; así que la elección del tratamiento más eficiente se le puede otorgar al tratamiento 1, sin ningún problema.

3.5 Resultados y análisis de la cantidad de compost en los tratamientos

Una vez acabado el proceso de compostaje se procedió al tamizado, de donde se obtiene el producto final (compost) y los residuos que no pasaron por las mallas del tamizado. Posteriormente se procedió con el pesado de ambos productos para la elaboración del balance de masas correspondiente.

Se inició el proceso con un total de 100 kg de material por cada pila de compostaje. A medida que el proceso avanzó las pilas de compostaje se fueron regando diariamente, por lo que al final del proceso, las pilas ganaron humedad y su peso fue mayor al inicial. Por tal razón, el balance de masas debe hacerse en base seca, descontando las proporciones de humedades, obtenidas en los análisis de los parámetros físicos mostrados anteriormente, del pesado final.

En la **tabla 3.4**, se muestran los pesos obtenidos, en kilogramos, del producto final (compost) y de los residuos generados, en base húmeda, luego del tamizado.

Como se observa, la masa total de materia presente en las pilas de compostaje en los diferentes tratamientos, supera a la masa medida al inicio del proceso de compostaje (100 kg). El excedente correspondería a la humedad presente en dichas pilas.

Tabla 3.4. Pesos del compost y los residuos generados luego del tamizado en base húmeda.

	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Tratamiento 4
Compost al final del proceso (kg)	110.73	110.25	109.67	86.78
Residuos al final del proceso (kg)	24.27	25.83	22.12	25.18

En la **tabla 3.5**, se presentan los pesos obtenidos, en kilogramos, del producto final (compost) y de los residuos generados luego del tamizado, en base seca. La humedad descontada para este fin, se obtuvo con la medición de los parámetros físicos del último muestreo, mostrados anteriormente en la figura **3.13**. Se consideró que el compost al final del proceso tuvo la misma cantidad de humedad que los residuos, respectivamente para cada tratamiento.

Tabla 3.5. Pesos del compost y los residuos generados luego del tamizado en base seca.

	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Tratamiento 4
Humedad al final del proceso (%)	41.61	40.00	35.11	33.85
Compost al final del proceso (kg)	64.58	65.97	71.18	57.39
Residuos al final del proceso (kg)	14.27	15.47	14.32	16.65

En la **tabla 3.6**, se observan los pesos (en kilogramos), de cada material utilizado en la formación de las pilas, en base húmeda y seca; así mismo se muestra el peso inicial total de cada pila en base seca. Los valores en base seca se obtuvieron descontando las humedades de cada material, analizadas anteriormente y mostradas en el apartado **3.1**.

Tabla 3.6. Pesos iniciales de las pilas en base húmeda y base seca, antes de iniciar el proceso de compostaje.

Material inicial	Humedad (%)	Tratamiento 1 (kg)		Tratamiento 2 (kg)		Tratamiento 3 (kg)		Tratamiento 4 (kg)	
		B.H.	B.S.	B.H.	B.S.	B.H.	B.S.	B.H.	B.S.
Lodo	26.97	10.00	7.30	20.00	14.61	30.00	21.91	40.00	29.21
Hojarasca de algarrobo	6.55	50.00	46.73	40.00	37.38	30.00	28.04	20.00	18.69
Residuos de jardín	24.43	40.00	30.23	40.00	30.23	40.00	30.23	40.00	30.23
Materia al inicio del proceso		100.00	84.26	100.00	82.21	100.00	80.17	100.00	78.13

Cada tratamiento tiene una eficiencia de degradación, la cual se puede obtener de la relación del peso de la materia degradada al final del proceso, con respecto al peso del material inicial utilizado en las pilas; siendo la materia degradada al final del proceso, la diferencia del peso del material inicial utilizado en las pilas y el peso de los residuos generados al final del proceso (ver **figura 3.33**); todo sin considerar el efecto de la humedad (base seca).

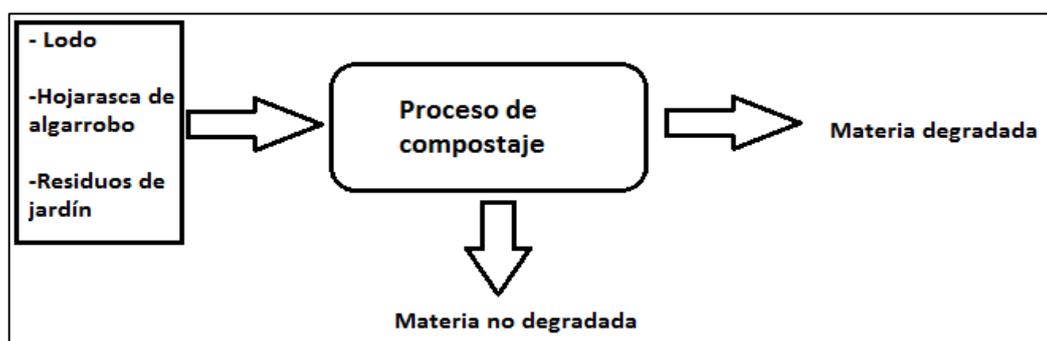


Figura 3.33. Proceso de compostaje.

En la **tabla 3.7** se muestran las eficiencias de degradación para los cuatro tratamientos. Como se observa, el tratamiento 1 es el que posee mayor eficiencia de degradación; es decir, que en el tratamiento 1 se degradó mayor cantidad de materia en un tiempo de 47 días.

Tabla 3.7. Pesos iniciales de las pilas en base húmeda y base seca, antes de iniciar el proceso de compostaje.

	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Tratamiento 4
Material utilizado al inicio del proceso (kg)	84.26	82.21	80.17	78.13
Materia no degradada (residuos al final del proceso) (kg)	14.27	15.47	14.32	16.65
Materia degradada al final del proceso (kg)	69.98	66.74	65.85	61.48
Eficiencia de degradación (%)	83.06 %	81.18 %	82.14 %	78.69 %

Capítulo 4

Diseño del proceso de mantenimiento del sistema de lagunaje de estabilización de la Universidad de Piura

1.1 Actividades del proceso

En este apartado se presentan todas las actividades necesarias para desarrollar un correcto proceso de mantenimiento del sistema de lagunaje de estabilización de la Universidad de Piura.

Para un mejor estudio, el proceso general se dividirá en 4 subprocesos, los cuales son:

- **Planeamiento:** Consta de todas las actividades que deben realizarse antes de iniciar con la remoción de los lodos.
- **Remoción de lodos:** Conformado por las actividades necesarias para remover los lodos de las lagunas.
- **Disposición final de lodos:** Conjunto de actividades que se realizan luego de haber removido los lodos.
- **Compostaje de lodos:** Actividades necesarias para darle un tratamiento a los lodos removidos previamente y almacenados por lo menos un año.

1.1.1 Lista de actividades

En la **tabla 4.1** se presenta la lista de actividades necesarias, con su respectiva descripción, para llevar a cabo los cuatro subprocesos requeridos en el mantenimiento de las lagunas.

El planteamiento de estas actividades se basa en experiencias pasadas en el mantenimiento de las lagunas de la Universidad de Piura, realizadas en enero del 2012, las cuales se ha logrado recaudar por entrevistas a los encargados de dicho proyecto. También se utilizó como referencia la experiencia en el retiro de lodos en las lagunas de estabilización en Estelí - Nicaragua, plasmada en el anexo IV del libro “*Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad, página 224*”, escrito por el ingeniero Stewart Oakley en Junio del 2005.

Tabla 4.1. Actividades del proceso de mantenimiento de las lagunas.

	Actividad	Descripción
PLANEAMIENTO	Caracterización inicial de las lagunas	Se caracterizará las lagunas con los datos iniciales de diseño.
	Medición de volúmenes y recojo de muestras de lodos	Se realiza un estudio de batimetría para obtener las profundidades de agua residual y lodos dentro de las lagunas; una vez obtenidas las profundidades se pueden calcular los volúmenes de estos. Se aprovechará para sacar muestras de los lodos para su análisis en el laboratorio.
	Transporte de muestras al laboratorio	Las muestras se trasladan al laboratorio para ser analizadas.
	Caracterización inicial de los lodos	Las muestras de lodos se analizan en el laboratorio. Análisis físicos, químicos y microbiológicos.
	Estimación del tiempo de secado de lodos	Se calcula el tiempo estimado que requieren los lodos para secarse luego de ser extraída el agua de las lagunas.
	Estimación del volumen final de lodos	Se calcula el volumen estimado de los lodos después de que se hayan secado.
REMOCIÓN DE LODOS	Desvío del afluyente a otra laguna	La entrada de agua se desviará de la laguna a la cual se le removerán de lodos. El agua se desvía a la laguna a la cual no se le hará mantenimiento. Si no se puede desviar el afluyente a otra laguna se optará por clausurar la entrada de agua hasta que se termine con el mantenimiento.
	Drenaje de la laguna	Se extrae todo el volumen de agua de la laguna.
	Transporte del agua al lugar de almacenamiento	Se lleva el agua extraída a un lugar de almacenamiento.
	Almacenamiento de agua extraída de la laguna	Se deposita el agua extraída en un lugar determinado (se recomienda puede ser una laguna alterna).
	Recolección de muestras de lodos húmedos	Se tomarán muestras de los lodos en base húmeda.
	Transporte de muestras al laboratorio	Las muestras se trasladan al laboratorio para ser analizadas.
	Caracterización de lodos húmedos	Se realizan análisis físicos, químicos y microbiológicos de los lodos húmedos.
	Secado de lodos (esparcimiento y volteo)	Se dejan secar los lodos por un periodo de tiempo, en el cual se realizan volteos y esparcimientos de estos lodos, para aumentar la velocidad de secado.
	Extracción de lodos secos	Una vez que los lodos están secos, se extraen por medios mecánicos y con mano de obra.
	Rellenado de la laguna	La laguna se rellena nuevamente con agua del afluyente.

Tabla 4.1-continuación. Actividades del proceso de mantenimiento de las lagunas.

	Actividad	Descripción
DISPOSICIÓN FINAL DE LODOS	Transporte de lodos al lugar de almacenaje	Los lodos se transportan a un lugar de almacenaje.
	Almacenamiento de lodos	Los lodos se colocan en el lugar de almacenaje destinado, donde se retendrán alrededor de un año, antes de que se les pueda dar un uso específico.
	Esparcimiento de los lodos secos	Se esparcen los lodos, de tal forma que ocupen toda el área destinada para su almacenamiento.
	Recolección de muestras de lodos secos	Periódicamente se recogerán muestras de los lodos para ser analizadas en el laboratorio.
	Transporte de muestras al laboratorio	Las muestras se trasladan al laboratorio para ser analizadas.
	Caracterización de lodos secos	Se realizarán análisis físicos, químicos y microbiológicos de los lodos
COMPOSTAJE DE LOS LODOS	Distribución y dimensionamiento de pilas y áreas para el compostaje.	Antes de iniciar con la construcción de las pilas de compostaje, se realiza un estudio para determinar el dimensionamiento y distribución de las pilas y áreas necesarias que intervienen en el proceso de compostaje.
	Seleccionar ubicación	Se selecciona la ubicación en donde se llevará a cabo el compostaje.
	Preparación del terreno	Se prepara el terreno antes de iniciar la construcción de las pilas.
	Construcción de pozas para las pilas de compostaje y áreas.	Se construyen las pozas en donde se formarán las pilas de compostaje con las dimensiones calculadas anteriormente.
	Recojo de materias primas	Los lodos, hojarasca de algarrobo y los residuos de jardín se recolectan y se acopian.
	Transporte de materias primas al almacén.	La materia prima se traslada al lugar de almacenamiento.
	Pesado de materias primas	La materia prima se pesa y se coloca en sacos en cantidades homogéneas.
	Almacenamiento de materias primas	Los sacos de materia prima se almacenan en su respectiva área.
	Transporte de materias primas del almacén al área de compostaje	La materia prima se traslada al lugar de compostaje.
	Formación de las pilas	Se construyen las pilas de compostaje.
	Riego diario de las pilas	Las pilas se riegan diariamente.
	Medición de temperatura en las pilas	Se mide la temperatura en las pilas de compostaje.
	Volteo de pilas	Se realizan volteos periódicos a las pilas de compostaje

Tabla 4.1-continuación. Actividades del proceso de mantenimiento de las lagunas.

	Actividad	Descripción
COMPOSTAJE DE LODOS	Secado de las pilas	Dos semanas antes de finalizar el proceso de compostaje se dejan secar las pilas, no se riegan.
	Transporte del compost al área de tamizado	El compost se traslada al área de tamizado.
	Tamizado del compost	Se realiza el tamizado de las pilas de compostaje, donde se obtiene el compost y el residuo.
	Pesado y envasado del producto final y los residuos	Se pesa y se coloca el compost y los residuos en sacos con cantidades iguales.
	Transporte del compost y los residuos al almacén	El compost y los residuos son trasladados a sus respectivos almacenes.
	Almacenamiento del producto final y los residuos	Se almacena el compost y los residuos en sus respectivas áreas de almacenaje.

1.1.2 Cursograma analítico del material

Un cursograma analítico del material es una gráfica en la cual se describen las secuencias de actividades de un determinado proceso, lo cual permite un mayor detalle visual de las actividades que se llevan a cabo en el proceso y es especialmente útil para poner de manifiesto costos ocultos, como: distancias recorridas, retrasos, almacenamientos temporales y los de manejo de materiales. En este caso se aplicará esta gráfica para el proceso de mantenimiento de las lagunas, asignando cada actividad a una tarea específica, tal como: operaciones, transporte, inspección, demora, almacenamiento o alguna combinación de estas. A continuación se detalla el significado de cada tarea. (Dominguez, 1995, pág. 158).

- **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.

La simbología que se utilizará para representar cada tarea se muestra en la **tabla 4.2**.

Tabla 4.2. Simbología utilizada en los cursogramas.

Tarea	Símbolo
Operación	○
Transporte	➔
Inspección	□
Demora	D
Almacén	▽
Operación e inspección	◻

Fuente: Domínguez, J. (1995). "Dirección de operaciones - Aspectos estratégicos en la producción y los servicios". (3ª ed.). España. pág. 158.

En la **tabla 4.3** se muestran los cursogramas analíticos de materiales propuestos para los cuatro subprocesos correspondientes al proceso de mantenimiento de las lagunas de estabilización. Los símbolos pintados de negro representan que a dicha actividad le corresponde una tarea específica de operación, operación e inspección, transporte, demora o almacenaje, según sea el caso.

Tabla 4.3. Cursograma analítico del material para las actividades del proceso de mantenimiento de las lagunas.

	Actividad	Operación	Operación e inspección	Transporte	Inspección	Demora	Almacenaje
PLANEAMIENTO	Caracterización inicial de las lagunas	○	◻	➔	■	D	▽
	Medición de volúmenes y recojo de muestras de lodos	○	●	➔	□	D	▽
	Transporte de muestras al laboratorio	○	◻	➔	□	D	▽
	Caracterización inicial de los lodos	○	●	➔	□	D	▽
	Estimación del tiempo de secado de lodos	○	◻	➔	■	D	▽
	Estimación del volumen final de lodos	○	◻	➔	■	D	▽

Tabla 4.3-continuación. Cursograma analítico del material para las actividades del proceso de mantenimiento de las lagunas.

	Actividad	Operación	Operación e inspección	Transporte	Inspección	Demora	Almacenaje
REMOCIÓN DE LODOS	Desvío del afluente a otra laguna	●	◻	→	◻	⊔	▽
	Drenaje de la laguna	●	◻	→	◻	⊔	▽
	Transporte del agua al lugar de almacenamiento	○	◻	➔	◻	⊔	▽
	Almacenamiento de agua extraída de la laguna	○	◻	→	◻	⊔	▼
	Recolección de muestras de lodos húmedos	●	◻	→	◻	⊔	▽
	Transporte de muestras al laboratorio	○	◻	➔	◻	⊔	▽
	Caracterización de lodos húmedos	○	●	→	◻	⊔	▽
	Secado de lodos (esparcimiento y volteo)	●	◻	→	◻	⊔	▽
	Remoción de lodos secos	●	◻	→	◻	⊔	▽
	Rellenado de la laguna	●	◻	→	◻	⊔	▽
DISPOSICIÓN FINAL DE LODOS	Transporte de lodos al lugar de almacenaje	○	◻	➔	◻	⊔	▽
	Almacenamiento de lodos	○	◻	→	◻	⊔	▼
	Esparcimiento de los lodos secos	●	◻	→	◻	⊔	▽
	Recolección de muestras de lodos secos	●	◻	→	◻	⊔	▽
	Transporte de muestras al laboratorio	○	◻	➔	◻	⊔	▽
	Caracterización de lodos secos	○	●	→	◻	⊔	▽

Tabla 4.3-continuación. Cursograma analítico del material para las actividades del proceso de mantenimiento de las lagunas.

	Actividad	Operación	Operación e inspección	Transporte	Inspección	Demora	Almacenaje
COMPOSTAJE DE LOS LODOS	Distribución y dimensionamiento de pilas y áreas para el compostaje.	○	◻	→	■	⌒	▽
	Seleccionar ubicación	○	◻	→	■	⌒	▽
	Preparación del terreno	●	◻	→	□	⌒	▽
	Construcción de pozas para las pilas de compostaje y áreas.	●	◻	→	□	⌒	▽
	Recojo de materias primas	●	◻	→	□	⌒	▽
	Transporte de materias primas al almacén.	○	◻	➔	□	⌒	▽
	Pesado de materias primas	●	◻	→	□	⌒	▽
	Almacenamiento de materias primas	○	◻	→	□	⌒	▼
	Transporte de materias primas del almacén al área de compostaje	○	◻	➔	□	⌒	▽
	Formación de las pilas	●	◻	→	□	⌒	▽
	Riego diario de las pilas	●	◻	→	□	⌒	▽
	Medición de temperatura en las pilas	○	●	→	□	⌒	▽
	Volteo de pilas	●	◻	→	□	⌒	▽
	Secado de las pilas	○	◻	→	□	◐	▽
	Transporte del compost al área de tamizado	○	◻	➔	□	⌒	▽
	Tamizado del compost	●	◻	→	□	⌒	▽
	Pesado y envasado del producto final y los residuos	●	◻	→	□	⌒	▽
	Transporte del compost y los residuos al almacén	○	◻	➔	□	⌒	▽
	Almacenamiento del producto final y los residuos	○	◻	→	□	⌒	▼

1.2 Requerimientos de materiales, recursos y mano de obra de las actividades del proceso

En la **tabla 4.4**, se muestran los requerimientos de materiales, recursos y mano de obra mínima, necesarios para llevar a cabo cada actividad de los cuatro subprocesos incluidos en el proceso general del mantenimiento de las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura.

Tabla 4.4. Requerimientos de materiales, recursos y mano de obra para las actividades del proceso de mantenimiento de las lagunas.

	Actividad	Requerimiento de materiales	Requerimiento de recursos	Requerimiento mínimo de mano de obra	
				Tipo de personal	Cantidad
PLANEAMIENTO	Caracterización inicial de las lagunas	Investigación en planos	Planos de diseño de lagunas	Personal calificado	1
	Medición de volúmenes y recojo de muestras de lodos	Lancha, cordel, huincha, reglilla graduada, draga para recolección de lodos, recipiente para almacenar muestras, cooler.		Personal calificado	3
	Transporte de muestras al laboratorio	Camioneta	Combustible	Personal no calificado	1
	Caracterización inicial de los lodos	Laboratorio LIS del IHHS de UDEP	Reactivos, instrumentos de laboratorio.	Especialista	1
	Estimación del tiempo de secado antes de remover los lodos	Cálculos numéricos		Personal calificado	1
	Estimación del volumen final de los lodos	Cálculos numéricos		Personal calificado	1

Tabla 4.4-continuación. Requerimientos de materiales, recursos y mano de obra para las actividades del proceso de mantenimiento de las lagunas.

	Actividad	Requerimiento de materiales	Requerimiento de recursos	Requerimiento mínimo de mano de obra	
				Tipo de personal	Cantidad
REMOCIÓN DE LODOS	Desvío del afluyente a otra laguna	Caja de herramientas		Personal no calificado	1
	Drenaje de la laguna	Bomba, manguera de la bomba al camión cisterna	Energía eléctrica	Personal no calificado	3
	Transporte del agua al lugar de almacenamiento	Camión cisterna	Combustible	Personal no calificado	1
	Almacenamiento de agua extraída de la laguna	Tubo de camión cisterna al lugar de almacenaje		Personal no calificado	1
	Recolección de muestras de lodos húmedos	Cordel, huincha, reglilla graduada, draga para recolección de lodos, recipiente para almacenar muestras, cooler.		Personal calificado	1
	Transporte de muestras al laboratorio	Camioneta	Combustible	Personal no calificado	1
	Caracterización de lodos húmedos	Laboratorio LIS del IHHS de UDEP	Reactivos, instrumentos de laboratorio	Especialista	1
	Secado de lodos – esparcimiento y volteo	Palas, carretillas	Combustible	Personal no calificado	10
	Remoción de lodos secos	Cargador frontal, palas, carretillas	Combustible	Personal no calificado	10
	Rellenado de la laguna	Caja de herramientas		Personal no calificado	1

Tabla 4.4-continuación. Requerimientos de materiales, recursos y mano de obra para las actividades del proceso de mantenimiento de las lagunas.

	Actividad	Requerimiento de materiales	Requerimiento de recursos	Requerimiento mínimo de mano de obra	
				Tipo de personal	Cantidad
DISPOSICIÓN FINAL DE LODOS	Transporte de lodos al lugar de almacenaje	Cargador frontal, camión volquete	Combustible	Personal no calificado	1
	Almacenamiento de lodos	Cargador frontal, camión volquete	Combustible	Personal no calificado	1
	Esparcimiento de los lodos secos en el lugar de almacenaje	Cargador frontal, palas.	Combustible	Personal no calificado	5
	Recolección de muestras de lodos secos	Cordel, huincha, reglilla graduada, draga para recolección de lodos, recipiente para almacenar muestras, cooler.		Personal calificado	1
	Transporte de muestras al laboratorio	Camioneta	Combustible	Personal no calificado	1
	Análisis de lodos secos	Laboratorio LIS del IHHS de UDEP	Reactivos, instrumentos de laboratorio	Especialista	1
COMPOSTAJE DE LODOS	Distribución y dimensionamiento de pilas y áreas para el compostaje.	Cálculo numérico		Personal calificado	1
	Seleccionar ubicación	Cálculo numérico		Personal calificado	1
	Preparación del terreno	Palas, madera, tubos de metal, plástico, huincha, alambre.		Personal no calificado	3
	Construcción de pozas para las pilas de compostaje y áreas.	Palas, cordel, huincha.		Personal no calificado	3

Tabla 4.4-continuación. Requerimientos de materiales, recursos y mano de obra para las actividades del proceso de mantenimiento de las lagunas.

	Actividad	Requerimiento de materiales	Requerimiento de recursos	Requerimiento mínimo de mano de obra	
				Tipo de personal	Cantidad
COMPOSTAJE DE LODOS	Recojo de materias primas	Sacos, palas, carretillas, trinchas.		Personal no calificado	4
	Transporte de materias primas al almacén.	Camioneta	Combustible	Personal no calificado	1
	Pesado de materias primas	Balanza	Batería	Personal no calificado	2
	Almacenamiento de materias primas	Carretillas		Personal no calificado	2
	Transporte de materias primas del almacén al área de compostaje	Carretillas		Personal no calificado	2
	Formación de las pilas	Palas, trinchas		Personal no calificado	4
	Riego diario de las pilas	Manguera	Agua	Personal no calificado	1
	Medición de temperatura en las pilas	Termómetro de suelos		Personal calificado	1
	Volteo de pilas	Palas, trinchas, manguera		Personal no calificado	2
	Secado de las pilas	Palas, trinchas		Personal no calificado	2
	Transporte del compost al área de tamizado			Personal no calificado	2
	Tamizado del compost	Malla de tamizado, palas, plástico.		Personal no calificado	4

Tabla 4.4-continuación. Requerimientos de materiales, recursos y mano de obra para las actividades del proceso de mantenimiento de las lagunas.

	Actividad	Requerimiento de materiales	Requerimiento de recursos	Requerimiento mínimo de mano de obra	
				Tipo de personal	Cantidad
COMPOSTAJE DE LODOS	Pesado y envasado del producto final y los residuos	Sacos, palas, balanza		Personal no calificado	2
	Transporte del compost y los residuos al almacén	Camioneta	Combustible	Personal no calificado	1
	Almacenamiento del producto final y los residuos	Carretillas		Personal no calificado	1

1.3 Metodología del diseño del proceso aplicado a la situación actual de la Universidad de Piura.

En febrero del 2012 se les hizo un mantenimiento a las lagunas de la Universidad, se removieron los lodos acumulados en el fondo de estas lagunas y se almacenaron en un área, listos para su disposición. En este apartado se aplicará el diseño del proceso descrito anteriormente para futuros mantenimientos de las lagunas de estabilización y para la compostación de los lodos almacenados actualmente.

Cabe mencionar que se trabajarán con las actividades más críticas de los subprocesos, algunas actividades que no necesiten mayor explicación del tema no serán tomadas en cuenta.

1.3.1 Planeamiento

4.3.1.1 Caracterización inicial de las lagunas

Se deben contar con las características iniciales de diseño de las lagunas de estabilización mostradas en la **tabla 4.5**; esta información se saca de los planos de diseño iniciales de las lagunas.

Aunque se cuenten con los parámetros iniciales de diseño es importante hacer un estudio topográfico antes de llevar a cabo el proceso de remoción de los lodos, ya que estos parámetros pueden sufrir cambios luego de un tiempo determinado, debido a la acción del agua residual y de los lodos acumulados sobre las lagunas.

Tabla 4.5. Caracterización de las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura.

Parámetros	Descripción	Valores de laguna primaria UDEP	Valores de laguna secundaria UDEP
Largo (m)	Largo de la laguna medida al borde de esta.	74.80	85.20
Ancho (m)	Ancho de la laguna medida al borde de esta.	72.60	84.30
Relación horizontal/vertical del talud interior	Por lo general es de 3/1.	3 : 1	3 : 1
Profundidad (m)	Profundidad de la laguna, sin considerar los lodos.	2.60	2.00
Área del fondo* (m ²)	Área de la laguna medida al fondo de esta.	3374.4	5292.36
Volumen (m ³)	Volumen de aguas residuales que puede almacenar la laguna.	9494	9975

*En caso que no se disponga del área del fondo de las lagunas, se puede calcular con la siguiente ecuación: $A_f = (l - 2iP)(a - 2iP)$

En donde:

A_f = área del fondo, m²

l = largo de la laguna, m

a = ancho de la laguna, m

P = profundidad de la laguna vacía de lodos, m

i = relación horizontal/vertical del talud interior (generalmente $i = 3/1$)

En el caso de las lagunas UDEP, tenemos:

$$A_{f \text{ laguna } 1} = (74.80 - 2 \times 3 \times 2.60)(72.60 - 2 \times 3 \times 2.60) = 3374.40 \text{ m}^2$$

$$A_{f \text{ laguna } 2} = (85.20 - 2 \times 3 \times 2.00)(84.30 - 2 \times 3 \times 2.00) = 5292.36 \text{ m}^2$$

4.3.1.2 Medición de volúmenes y recojo de muestras de lodos.

Se realiza un estudio de batimetría para obtener las profundidades de agua y lodos dentro de las lagunas; una vez obtenidas las profundidades se pueden calcular los volúmenes de estos, utilizando el largo y ancho de las lagunas, descritas en el apartado anterior.

Para realizar el estudio de batimetría se sigue el siguiente procedimiento:

- La medición de profundidades se realizará en varios puntos de las lagunas. Se debe formar una cuadrícula imaginaria sobre toda el área de la laguna, tomando como base el área de fondo (A_f).

- Utilizando una lancha y una reglilla graduada (o estadía graduada), se la sumerge hasta sentir contacto con el fondo, teniendo en cuenta no forzar la reglilla hacia el fondo ya que se podría alterar el dato de la altura de los lodos.
- En lugar de una reglilla o estadía se puede utilizar un tubo claro graduado de plástico, y después de medir la altura se puede insertar hasta al fondo para medir la profundidad del lodo.
- Se mide el dato de profundidad de lodos y la ubicación del punto en la laguna en la cuadrícula. En las **figura 4.1 y 4.2** se muestran todos los puntos (P1, P2,..., P23) en los que se deben medir las profundidades (Pi), para luego sacar un promedio final (Po). Esto se hace para obtener datos más confiables.
- Se realiza el cálculo del volumen de los lodos, por medio de la siguiente ecuación:

$$V_{\text{lodos}} = P_o \times A_f$$
- Mientras se toman los datos de las profundidades se aprovecha para sacar muestras de los lodos, utilizando un una draga especial diseñada para la recolección de sedimentos, o un tubo diseñado especialmente para la recolección de muestras de lodos. Estas muestras se utilizarán para caracterizar los lodos. Solo se tomarán muestras de los puntos P1, P3, P5, P10, P12, P14, P19, P21 y P23.
- De acuerdo con los requisitos del laboratorio en donde se analizarán las muestras, se ponen las muestras para los análisis físico-químicos en un tipo de recipiente especial, y las muestras para el análisis microbiológico en otro tipo de recipiente especial.
- El mismo día de la recolección se llevan todas las muestras en una hielera al laboratorio de Ingeniería Sanitaria del Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura para su posterior análisis.

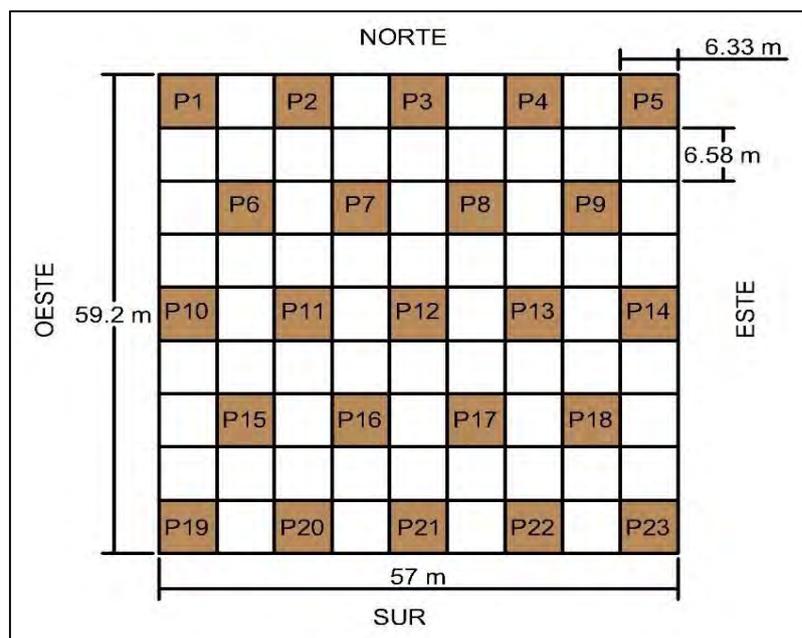


Figura 4.1. Puntos de profundidades y muestreos en la laguna primaria.

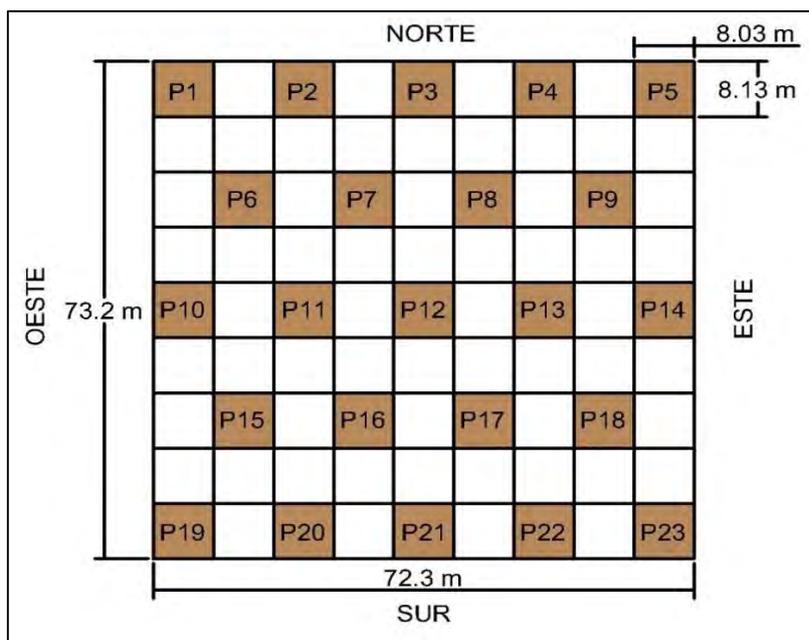


Figura 4.2. Puntos de profundidades y muestreos en la laguna secundaria.

4.3.1.3 Caracterización físico-química y microbiológica de los lodos

Una vez obtenidas las muestras se procede a analizarlas en el laboratorio; los parámetros que se analizarán se muestran en la **tabla 4.6**.

Tabla 4.6. Parámetros a analizar en las muestras de lodos para el subproceso de planeamiento.

		Sigla	Unidad
Parámetros físico químicos	Sólidos totales	S_T	%
	Sólidos fijos	S_F	%
	Sólidos volátiles	S_V	%
Parámetros microbiológicos	Huevos de helmintos	Hh	Número de huevos/gramos seco

Fuente: Stewart M., O. (2005). “Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad”. Honduras. pág. 179.

Las fórmulas presentadas en este apartado han sido extraídas del libro publicado por Stewart M. (2005, pág. 179-180).

Siendo: $S_T = S_F + S_V$

El porcentaje de S_F corresponde al porcentaje de cenizas y el porcentaje de S_V corresponde al porcentaje de materia orgánica total. Los procedimientos para el cálculo de estos parámetros en el laboratorio se describen en los apartados **2.7.4** y **2.7.5**.

Los parámetros físico químicos se analizan con el objetivo de obtener la gravedad específica de los sólidos (GE_S) y los parámetros microbiológicos, para tener una idea de la disposición

final que podrán tener los lodos. El cálculo de la GE_S se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{GE_S} = \frac{S_V}{1.0} + \frac{S_F}{2.5}$$

Donde:

GE_S = Gravedad específica de los sólidos.

S_V = Porcentaje como decimal de sólidos volátiles en los lodos.

S_F = Porcentaje como decimal de sólidos fijos en los lodos.

Después de determinar la gravedad específica de los sólidos, se calcula la gravedad específica de los lodos (GE_L) por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{GE_L} = \frac{S_T}{GE_S} + \frac{1 - S_T}{1.0}$$

Donde:

GE_L = Gravedad específica de los lodos.

S_T = Porcentaje como decimal de sólidos totales en los lodos.

$1 - S_T$ = Porcentaje como decimal de humedad en los lodos.

Después de calcular GE_L , y con el volumen de lodos medidos con la batimetría, se puede calcular directamente la masa estimada de lodos secos con la siguiente ecuación:

$$M_s = V_{\text{lodos}} \times \rho_{\text{agua}} \times GE_L \times S_T$$

4.3.1.4 Estimación del tiempo requerido para el secado de los lodos antes de removerlos

Como se explicará más adelante, para remover los lodos de las lagunas UDEP a la cuales se les darán mantenimiento, es necesario drenar el agua, desviar el flujo de alimentación a la otra laguna UDEP y dejar secar los lodos. El mecanismo de secado de lodos es principalmente por evaporación natural dentro de la laguna drenada; por tal razón, resulta fundamental estimar la duración del secado y tratar de minimizarlo.

Los factores que influyen en el tiempo de secado son:

- El clima local.
- La profundidad de lodos.
- La fracción de agua en los lodos que drene e infiltre por el fondo.
- La concentración de sólidos totales iniciales y finales de los lodos.
- La naturaleza de la superficie de los lodos.

Esta relación entre el tiempo de secado y los factores que influyen en este, se puede expresar por medio de la ecuación mostrada a continuación. (Stewart M., 2005, pág. 181)

$$t_s = \frac{P_0 \times \left(1 - \frac{S_{T_0}}{S_{T_f}} \right) \times (1 - D)}{k_e \times (E_n - P_n)_{\text{Min}}}$$

Donde:

t_s = tiempo de secado de lodos, días.

P_0 = profundidad inicial de lodos (obtenido de la barimetría), m.

S_{T_0} = concentración de sólidos totales inicial expresada como decimal.

S_{T_f} = concentración de sólidos totales final expresada como decimal.

D = porcentaje de agua removido por infiltración expresado como decimal.

k_e = factor de reducción de evaporación del agua de lodos versus un espejo de agua (varía entre 0.6 a 1.0)

E_n = Evaporación en el mes n, m/día

P_n = Precipitación en el mes n, m/día

$(E_n - P_n)_{\text{Min}}$ = evaporación neta mínima de los n meses contiguos considerados, m/día

La fórmula del tiempo de secado asume que los lodos están esparcidos por toda el área del fondo de la laguna con una profundidad uniforme. De no ser éste el caso, el tiempo de secado fuera más largo.

S_{T_0} corresponde al porcentaje de sólidos totales analizados de las muestras tomadas anteriormente (apartado 4.3.1.3) y S_{T_f} corresponde a al porcentaje final de sólidos que pueden tener los lodos luego del secado. Se estima que para poder remover los lodos con equipo pesado el valor de S_{T_f} debe estar entre 20 - 30 % del valor inicial, por tanto se trabajará con el valor mínimo de este valor (20 %). (Franci Gonçalves, 1999, pág. 37).

Para una laguna de estabilización se asume que el secado de los lodos se da exclusivamente por la evaporación, por tanto, el porcentaje de agua que pasa por infiltración al fondo de la laguna (D) es igual a cero.

El término $(E_n - P_n)_{\text{Min}}$ es la evaporación neta mínima de los meses de la época seleccionada para el secado (típicamente dos o tres meses), lo que debe ser la época más seca del año. Estos valores se pueden obtener del centro meteorológico de la Universidad de Piura.

El término k_e en la ecuación del tiempo de secado es el factor de reducción de evaporación del agua de los lodos comparada a un espejo de agua. Los lodos forman una capa dura cuando empiezan a secar, lo que impide la evaporación de agua en las capas inferiores. Durante este período de secado se estima que el valor de k_e debe ser aproximadamente 0.6. Luego, cuando los lodos secan más, empiezan formar grietas, los cuales facilitan el secado. Con tiempo, después de formar muchas grietas, el valor de k_e se aproxima el valor 1.0.

Una manera de mantener el valor de k_e más cercano a 1.0 es esparcir los lodos por toda el área del fondo de la laguna y voltearlos cada cierto tiempo durante el secado con un tractor agrícola, con un arado o una barrena horizontal. Para el caso específico de las lagunas de la Universidad de Piura, se tomará un $k_e = 1.0$.

4.3.1.5 Estimación del volumen final de lodos después del secado

Después de secar los lodos, se calcula su profundidad final, por tanto también su volumen final para extraer y almacenar, con la siguiente ecuación:

$$P_f = P_0 \times \left(\frac{S_{T_0}}{S_{T_f}} \right)$$

$$V_f = P_f \times A_f$$

Donde:

P_f = Profundidad final

A_f = Área del fondo de la laguna

1.3.2 Remoción de lodos

4.3.2.1 Desvío del afluente a otra laguna.

El afluente que ingresa a la laguna a la cual se le dará mantenimiento debe ser desviado a la otra laguna UDEP que se encuentra en funcionamiento.

El desvío debe ser por gravedad y no bombeo, utilizando los canales existentes en el sistema de tratamiento.

Se debe tener en cuenta el impacto que tendrá el desvío del caudal a la otra laguna, la cual estaría sobrecargada durante un período de 2 o 3 meses. Debido a que el secado en la laguna a la que se le dará mantenimiento ocurre durante los meses más calurosos, se asume que el impacto será mínimo ya que las lagunas tendrán mayor capacidad de tratamiento durante esta época, en términos de la carga orgánica.

4.3.2.2 Drenaje de laguna

Se debe drenar la laguna hasta alcanzar un nivel que permita la exposición de los lodos al ambiente.

Este drenaje se realiza por medio del bombeo utilizando un sistema sifón, hasta llegar a obtener una capa visible de lodos, para posteriormente ponerlos a secar.

4.3.2.3 Recolección de muestras y análisis de lodos húmedos

Antes de secar los lodos se les deben tomar muestras, para posteriormente analizarlos en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria del Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, con el propósito de caracterizarlos y tener un registro de estos para evaluar una correcta disposición final.

El procedimiento para la toma de muestras es el siguiente:

- La toma de muestras se debe realizar en varios puntos. Se trazará con cordel una cuadrícula sobre el área de fondo de la laguna en que se encuentran dispersos los lodos. Ver **figuras 4.3 y 4.4**.

- Se extraerán muestras en los puntos P1, P2, ..., P13 a diferentes profundidades (en la superficie, en la mitad y en la parte más profunda), utilizando una draga especial diseñada para la recolección de sedimentos, o un tubo diseñado especialmente para la recolección de muestras de lodos.
- De acuerdo con los requisitos de los laboratorios que analizan las muestras, se ponen las muestras para los análisis físico-químicos en un tipo de recipiente especial, y las muestras para el análisis microbiológico en otro tipo especial.
- El mismo día de la recolección se llevan todas las muestras en una hielera al laboratorio para sus respectivos análisis. Los parámetros a analizar en el laboratorio se muestran en la **tabla 4.7**.

Tabla 4.7. Parámetros a analizar en los lodos.

Parámetros físico químicos	Humedad (%)
	pH
	Fósforo total (%)
	Sólidos totales (%)
	Sólidos fijos (% cenizas)
	Sólidos volátiles (% materia orgánica total)
	Carbono orgánico total (%)
	Nitrógeno orgánico total (%)
	Relación C/N
Parámetros microbiológicos	Huevos de helmintos (Número huevos / gramo de lodo)
	Coliformes totales (NMP / 100 g de lodo)
	Coliformes termotolerantes (NMP / 100 g de lodo)

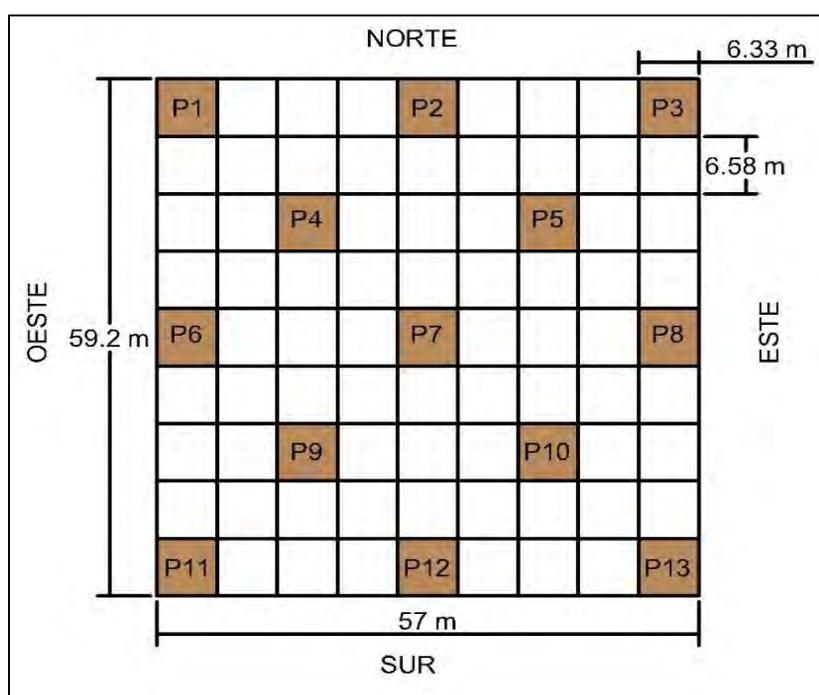


Figura 4.3. Disposición de la toma de muestras para lodos húmedos en la laguna primaria.

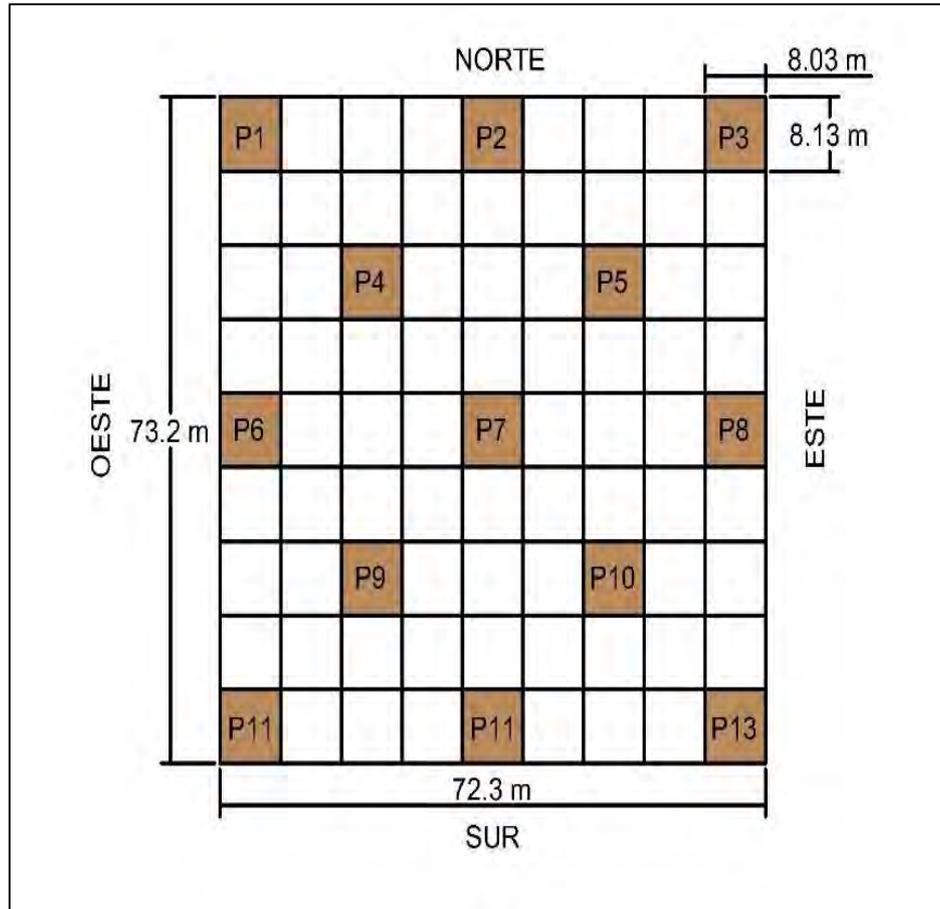


Figura 4.4 Disposición de la toma de muestras para los lodos húmedos en la laguna primaria.

La metodología utilizada para el análisis de parámetros se encuentra descrita en el apartado 2.7 del capítulo 2 de este estudio de tesis.

4.3.2.4 Secado de lodos

EL secado de los lodos se realiza por evaporación natural, estos se deben dejar secar por el tiempo máximo de secado, calculado en el apartado 4.3.1.4 (entre 2 a 3 meses); como se vio en ese apartado el factor k_e se debe aproximar al valor de 1.0 para asegurar un tiempo de secado mínimo, esto se logra esparciendo y volteando los lodos periódicamente.

El esparcimiento y volteo de lodos se puede hacer utilizando un tractor agrícola con arado o barrena horizontal, o por un medio manual, utilizando netamente mano de obra. Debido a que el área de las lagunas primaria y secundaria son de 3374.40 m² y 5292.36 m² respectivamente, la utilización de maquinaria pesada representaría menores esfuerzos para alcanzar este fin, pero también representaría un riesgo, por el daño que esta pueda causarle a la capa impermeable del fondo de la laguna, si no se tiene el suficiente cuidado del caso. La elección de uno u otro método depende del presupuesto previsto para este proyecto de mantenimiento de las lagunas.

La frecuencia de esparcimiento y volteos también depende del presupuesto del proyecto, pero se aconseja realizarlos una vez por semana, para obtener un tiempo de secado menor.

4.3.2.6 Remoción de los lodos secos

El método más apropiado de extraer los lodos es utilizando cargadores frontales con rueda de goma u orugas. Es fundamental que la maquinaria pesada no dañe la capa impermeable al fondo de la laguna, generalmente compuesta de arcilla.

También se puede extraer el lodo de manera manual, utilizando palas y carretillas, para esto el lodo debe tener una consistencia de terrones para que pueda sacarse fácilmente. Una gran ventaja de éste método es que no se daña la capa impermeable del fondo de las lagunas.

La elección de uno u otro método queda a criterio de la persona al mando del proyecto de mantenimiento. Cabe mencionar que si la capa impermeable se daña, hay que repararla con arcilla, lo cual genera un gasto extra y a su vez un retraso de la puesta en marcha de la laguna, generando un costo de oportunidad adicional.

Los lodos se deben transportar a un lugar cercano acondicionado para su almacenamiento.

4.3.2.7 Rellenado de la laguna

Se debe rellenar la laguna con agua del cuerpo receptor para después ponerla en funcionamiento, desviando el afluente original de la laguna a la que se desvió.

1.3.3 Disposición final de lodos

Como se ha visto en este estudio de tesis, los lodos pueden ser tratados y reusados para su aprovechamiento en agricultura. La **tabla 4.8** muestra las normas de la Organización Mundial de Salud (OMS) para el reúso de lodos en agricultura.

Inicialmente todos los lodos estarán muy contaminados con huevos de helmintos, ubicándonos en la categoría C de la tabla, por lo que no se pueden reutilizar en la agricultura inmediatamente después de la remoción. De ser este el caso, los lodos se deben enterrar en trincheras o excavaciones con una cobertura mínima de 25 cm, restringiendo la exposición de trabajadores y prohibiendo la siembra de cultivos de raíces comestibles encima de los lodos enterrados.

Es recomendable almacenar los lodos. A medida que pasa el tiempo los huevos de helminto disminuirán hasta que los lodos se ubiquen en las Categorías B o A, se debe reservar un área en la instalación donde se puedan almacenar los lodos en pilas por un tiempo mínimo de un año (tiempo recomendado para la eliminación de huevos de helminto). Antes de mover los lodos para cualquier reúso se debe verificar que no contienen huevos vivos de helmintos por un análisis microbiológico.

Tabla 4.8. Normas microbiológicas de la OMS de calidad de lodos providentes de agua residual tratada para reúso en agricultura.

Categoría y condiciones de reúso	Grupo expuesto	Promedio de una serie de muestras de los lodos antes del periodo de reúso	
		Helmintos intestinales. Número Huevos/1 g peso mojado (Media aritmética)	Coliformes Fecales NMP/100 g peso mojado (Media geométrica)
Categoría A Reúso no restringido: Cultivos que se consumen crudos: campos deportivos; parques públicos.	Trabajadores Consumidores Público	≤ 1	≤ 1.000
Categoría B Reúso restringido: Cultivos de cereales, praderas, forrajeros, y árboles.	Trabajadores	≤ 1	Ninguna norma recomendada
Categoría C Reúso restringido: Antes de sembrar los cultivos, se entierra los lodos en trincheras con una cobertura mínima de 25 cm de suelo; encima de las trincheras se prohíbe la siembra de cultivos de raíces comestibles; todo sin exposición de trabajadores.	Ninguno	No se aplica	No se aplica

Fuente: Stewart M., O. (2005). "Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad". Honduras. pág. 187.

A continuación se muestran las principales actividades involucradas en el subproceso de disposición final de los lodos.

4.3.3.1 Almacenamiento

Los lodos deben ser almacenados como mínimo 1 año, por su contaminación con huevos de helmintos, o hasta que se asegure una presencia menor a 1 huevo de helminto / 1000 g de lodo mojado.

El área de almacenaje debe estar cercada por una maya, cuya función principal es restringir el ingreso de animales que habitan en los alrededores, evitando así, su contaminación.

Para evitar la contaminación del suelo con estos lodos, se debe recubrir el área de almacenaje con una capa protectora, antes de colocar los lodos, la capa debe ser de un material que resistente a los efectos del clima y con un tiempo de duración mayor a un año.

4.3.3.2 Recolección de muestras y análisis de lodos secos.

Una vez almacenados los lodos se deben hacer muestreos y análisis periódicos de estos. Ya que se almacenarán como mínimo por un año, los muestreos y análisis deben hacerse cada dos meses, esto con el propósito de obtener un patrón de comportamiento de los lodos, y así saber el momento en que estén listos para ser tratados. Los parámetros a analizar se muestran en la **tabla 4.9**.

La metodología de cada muestreo está descrita en el capítulo 2 apartado 2.2.1.

Al igual que el análisis de los lodos húmedos los parámetros serán:

Tabla 4.9. Parámetros a analizar en los lodos secos.

Parámetros físico químicos	Humedad (%)
	pH
	Fósforo total (%)
	Sólidos totales (%)
	Sólidos fijos (% cenizas)
	Sólidos volátiles (% materia orgánica total)
	Carbono orgánico total (%)
	Nitrógeno orgánico total (%)
	Relación C/N
Parámetros microbiológicos	Huevos de helmintos (Número huevos / gramo de lodo)
	Coliformes totales (NMP / 100 g de lodo)
	Coliformes termotolerantes (NMP / 100 g de lodo)

Las metodologías para el análisis de los lodos se presentan en el capítulo 2, apartado 2.7.

1.3.4 Compostación de los lodos

Luego de remover los lodos y almacenarlos por lo menos un año, o hasta asegurar la no presencia de huevos de helmintos, se le deben dar un tratamiento que asegure su aprovechamiento. El tratamiento que se les darán será: el compostaje, del cual se ha hablado en los capítulos anteriores.

En el capítulo 2 se hizo un estudio experimental para la construcción de 12 pilas de compostaje. Tomando como base dicho estudio, en este apartado se describirá la metodología propuesta a utilizar en las actividades involucradas en la compostación de los lodos removidos y almacenados actualmente y en futuros mantenimientos de las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura.

4.3.4.1 Distribución y dimensionamiento de pilas y áreas para el compostaje

4.3.4.1.1 Elección del número de pilas y sus dimensiones

En el apartado **3.3.10** y **3.4** de este estudio de tesis, se concluyó que el tratamiento óptimo para las pilas de compostaje, en este caso específico, fue el tratamiento 1, cuya composición es de 10 % de lodo, 40 % de residuos de jardín y 50 % de hojarasca de algarrobo; por tanto, se tomarán estas proporciones para determinar la cantidad de materia que deberá contener cada pila de compostaje, el número de pilas de compostaje y las dimensiones de estas.

Del apartado **2.2** se obtiene que la oferta materiales destinados para la elaboración del compost es de 125 000 kg de lodo, 2740 kg de residuos de jardín por mes y 68 000 kg de hojarasca de algarrobo por mes.

En la **figura 4.5** se muestra la composición de masas para los diferentes materiales utilizados en una pila de compostaje, donde:

M = Cantidad de materia total utilizada en una pila al inicio del proceso de compostaje.

N = Número de pilas de compostaje.

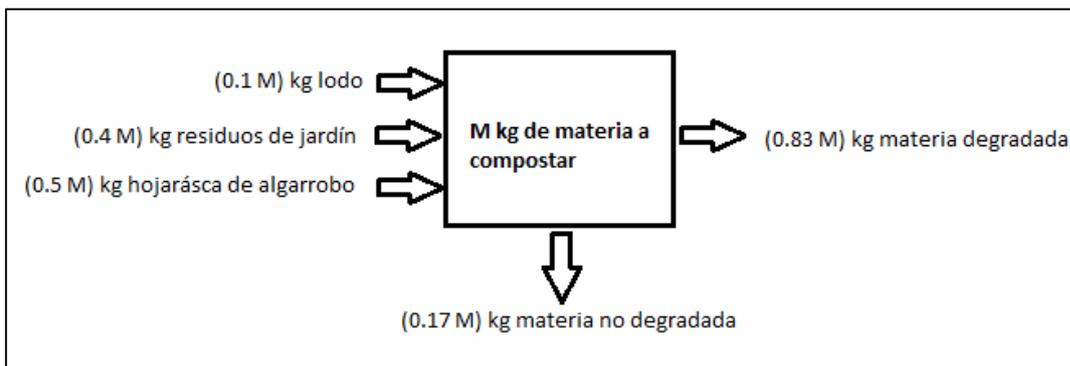


Figura 4.5. Distribución de masas en el proceso de compostaje para una pila.

Una pila de compostaje ideal debe tener un ancho de 1.2 a 2 m, una altura de 1 a 1.5 m y el largo varía de acuerdo a la cantidad de terreno que se dispone. Para las dimensiones de las pilas se escogerá las máximas posibles, siendo el ancho de 2 m y el alto de 1.5 m; el largo de las pilas se pueden determinar en función de las pilas que se construirán.

Hay dos métodos para compostar todo el lodo obtenido del mantenimiento de las lagunas de estabilización:

- Método 1, el cual consiste en compostar todo el lodo en un solo esfuerzo (un solo ciclo de trabajo).
- Método 2, el cual consiste en compostar el lodo por partes (varios ciclos de trabajo).

Explicación del método 1

Este método propone procesar todo el lodo en un solo ciclo de trabajo, lo cual quiere decir que el proceso de compostaje tomará un tiempo aproximado de 47 días, que fue el tiempo que se empleó para obtener el compost en el trabajo experimental.

Dado que se compostará todo el lodo en un solo ciclo de trabajo, la capacidad de procesamiento dependerá de la oferta de lodo existente. Entonces, si se necesitan compostar 125 000 Kg de lodo, se puede decir que $(0.1 M)N = 125\ 000\text{ kg}$ (ver **figura 4.5**), despejando se obtiene $MN = 125\ 000\text{ kg}$, siendo MN el total de materia utilizada en un solo ciclo en todo el proceso de compostaje.

En la **tabla 4.10** se muestra la cantidad de cada material utilizada en el proceso de compostaje.

Tabla 4.10. Cantidad de materia prima utilizada en el proceso de compostaje.

Material	Composición (%)	Cantidad utilizada en todo el proceso (kg)
Lodo	10	125 000
Residuos de jardín	40	500 000
Hojarasca de algarrobo	50	625 000

A continuación se demostrará la expresión matemática que pone en relación el número de pilas y la longitud de estas.

El volumen de una pila se calcula por la expresión:

$$V = \frac{\pi h a L}{2}$$

La densidad viene a ser:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad y \quad V = \frac{M}{\rho}$$

Igualando los volúmenes se tiene:

$$V = \frac{\pi h a L}{2} = \frac{M}{\rho}$$

Despejando L, tenemos:

$$L = \frac{2M}{h a \pi \rho}$$

Anteriormente se vio: $M N = 1250000$, entonces:

$$M = \frac{1\ 250\ 000}{N}$$

Reemplazando M en L, obtenemos:

$$L = \frac{2 \times 1\ 250\ 000}{h a \pi \rho N}$$

De esta forma se obtiene una expresión del largo de las pilas en función del número de pilas de compostaje.

La densidad de una pila de compostaje con la composición de materiales específicos de este estudio se puede determinar experimentalmente. En el apartado **2.2.3** se determinaron pilas experimentales de 0.90 m de ancho, 0.80 m de alto y 2 m de largo, con lo cual se puede hallar su volumen, el cual sería $V = \left(\frac{\pi}{2}\right) 0.8 \times 0.90 \times 2 = 2.26 \text{ m}^3$. Una vez hallado el volumen se puede hallar la densidad por la expresión de $\rho = \frac{M}{V}$, siendo la masa utilizada en cada pila de 100 kg. Por tanto:

$$\rho = \frac{100}{2.26} = 44.23 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Debido a que se tienen los valores de h, a y ρ son constantes, la expresión matemática de L queda de la siguiente forma:

$$L = \frac{2 \times 1\,250\,000}{1.5 \times 2 \times 3.1416 \times 44.23 \times N}$$

$$L = \frac{5997.23}{N}$$

Tabulando los datos se obtiene:

Tabla 4.11: Número de pilas en función del largo de pila para compostar todo el lodo en un solo ciclo de trabajo.

N	L (m)	N	L (m)
20	300	35	171
21	286	36	167
22	273	37	162
23	261	38	158
24	250	39	154
25	240	40	150
26	231	41	146
27	222	42	143
28	214	43	140
29	207	44	136
30	200	45	133
31	194	46	130
32	188	47	128
33	182	48	125
34	176	49	122

Como se aprecia en la **tabla 4.20** el número de pilas y el largo de cada pila representan valores muy elevados. Por tanto, compostar toda la oferta de lodo en un solo ciclo de trabajo resulta ineficiente, por consiguiente este método se descarta.

Explicación del método 2

En este método todo el lodo obtenido se trabajará por partes, compostando partes de lodo en varios ciclos de compostaje, lo cual quiere decir que se realizarán varios procesos de compostaje hasta lograr compostar toda la cantidad de lodo presente. Cada ciclo de

compostaje demora aproximadamente 47 días, por tanto el tiempo total para compostar toda la cantidad de lodo presente dependerá del número de ciclos que se empleen.

La capacidad de procesamiento en cada ciclo de compostaje dependerá de la oferta de materia prima menor, siendo para este caso, los residuos de jardín. Para lograr compostar toda la cantidad de lodo presente de manera continua se igualará el tiempo de cada ciclo de compostaje y el tiempo de recolecta de residuos de jardín a dos meses. Entonces, se logrará recolectar 5480 kg de residuos de jardín para ser procesados en cada ciclo de compostaje.

Siendo el residuo de jardín el factor determinante se puede decir que se necesitan compostar 5480 kg de residuos de jardín, por lo tanto se puede decir que $(0.4 M)N = 5480$ kg (ver **figura 4.5**), despejando se obtiene $MN=13\ 700$ kg, siendo MN el total de materia utilizada en cada ciclo de compostaje.

En la **tabla 4.12** se muestra la cantidad de cada material utilizada en el proceso de compostaje.

Tabla 4.12. Cantidad de materia prima utilizada en el proceso de compostaje.

Material	Composición (%)	Cantidad utilizada en todo el proceso (kg)
Lodo	10	1370
Residuos de jardín	40	5480
Hojarasca de algarrobo	50	6850

A continuación se determinará la expresión matemática que pone en relación estos dos parámetros.

El volumen de una pila se calcula por la expresión:

$$V = \frac{\pi h a L}{2}$$

La densidad viene a ser:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad y \quad V = \frac{M}{\rho}$$

Igualando los volúmenes se tiene:

$$V = \frac{\pi h a L}{2} = \frac{M}{\rho}$$

Despejando L, tenemos:

$$L = \frac{2M}{h a \pi \rho}$$

Anteriormente se vio: $M N = 13700$, entonces:

$$M = \frac{13\ 700}{N}$$

Reemplazando M en L, obtenemos:

$$L = \frac{2 \times 13\,700}{h a \pi \rho N}$$

De esta forma se obtiene una expresión del largo de las pilas en función del número de pilas de compostaje.

La densidad de una pila de compostaje con la composición de materiales específicos de este estudio se puede determinar experimentalmente. En el apartado **2.2.3** se determinaron pilas experimentales de 0.90 m de ancho, 0.80 m de alto y 2 m de largo, con lo cual se puede hallar su volumen, el cual sería $V = \left(\frac{\pi}{2}\right) 0.8 \times 0.90 \times 2 = 2.26 \text{ m}^3$. Una vez hallado el volumen se puede hallar la densidad por la expresión de $\rho = \frac{M}{V}$, siendo la masa utilizada en cada pila de 100 kg. Por tanto:

$$\rho = \frac{100}{2.26} = 44.23 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Debido a que se tienen los valores de h, a y ρ son constantes, la expresión matemática de L queda de la siguiente forma:

$$L = \frac{2 \times 13\,700}{1.5 \times 2 \times 3.1416 \times 44.23 \times N}$$

$$L = \frac{65.73}{N}$$

Tabulando los datos se obtiene:

Tabla 4.13. Número de pilas en función del largo de pila para un ciclo de compostaje.

N	L	N	L
1	66	11	6
2	33	12	5
3	22	13	5
4	16	14	5
5	13	15	4
6	11	16	4
7	9	17	4
8	8	18	4
9	7	19	3
10	7	20	3

Utilizando este método se opta por trabajar con **12 pilas** de compostaje, cada una con dimensiones de **5 m, 2 m y 1.5 m** de largo, ancho y alto respectivamente. Para compostar toda la cantidad de lodos se necesitarán $125\,000 / 5480 = 23$ ciclos de trabajo que equivalen aproximadamente a 46 meses.

4.3.4.1.2 Descripción de áreas necesarias en el proceso

Área de recepción y pesaje de materia prima

En esta área se recibirá la hojarasca de algarrobo, los residuos de jardín y el lodo removido de las lagunas. Inmediatamente después que se reciben estos materiales, se pesan y empaacan en sacos.

La hojarasca de algarrobo se empaacará en sacos de 15 kg cada uno, los residuos de jardín en sacos de 10 kg y los lodos en sacos de 20 kg. La elección de estos pesos es debido a densidad de cada material, los residuos de jardín ocupan un gran volumen y poco peso, por tanto se necesita más cantidad de residuos para llenar un saco.

Almacén de materia prima

En esta área se almacenarán los sacos de materiales empacados en el área anterior. Cada saco tiene un largo de 60 cm, un ancho de 40 cm y una altura de 20 cm.

En la **tabla 4.14** se muestran la cantidad de sacos necesarios para almacenar toda la materia prima. Los sacos se pueden apilar uno encima del otro hasta llegar a una altura de 1.60 m, la cual se considera una altura aceptable para manipular los sacos sin utilizar escaleras; por tanto los sacos se apilarán en columnas y filas de 8 sacos de altura cada una. En la **tabla 4.15** se muestra el número de columnas y filas en que se apilarán los sacos de materia prima, así mismo como la longitud que ocupan.

Tabla 4.14. Cantidad y capacidad de sacos utilizados para almacenar la materia prima.

Material	Cantidad utilizada en todo el proceso (kg)	Capacidad de los sacos (kg)	Número de sacos utilizados
Lodo	1370	20	69
Residuos de jardín	5480	12	457
Hojarasca de algarrobo	6850	15	457

Tabla 4.15. Espacio requerido para almacenar la materia prima.

Área de almacenaje		Número de sacos	Capacidad de almacenaje de sacos	Longitud utilizada (m)
Lodo	Altura	8	80	1.6
	Columnas	5		3.0
	Filas	2		0.8
Residuos de jardín	Altura	8	480	1.6
	Columnas	5		3.0
	Filas	12		4.8
Hojarasca de algarrobo	Altura	8	480	1.6
	Columnas	5		3.0
	Filas	12		4.8

Almacén de herramientas y materiales

Lugar donde se guardan los equipos tales como: el termómetro, palas, escobas metálicas, sacos y otras herramientas que se utilizarán para hacerle mantenimiento y limpieza de la maquinaria como: la tamizadora.

Área de compostaje

Espacio destinado a la construcción de las pilas de compostaje y en donde se llevará a cabo todo el proceso de compostaje.

Se construirán 12 pilas con un largo de 5 m y un ancho de 2 m cada una.

El espacio entre pilas y entre bordes será de 3 m aproximadamente.

Área de tamizado y pesaje

Es el área donde se realiza el cernido del compost utilizando una máquina vibro tamizadora, ésta cuenta con una canaleta por donde sale el compost ya cernido y es recibido en sacos para posteriormente ser pesados en cantidades de 25 kg.

Almacén de producto terminado

Es el área donde se almacenará el compost ya terminado, en sacos con capacidad de 25 kg.

Las dimensiones de estos sacos son: 0.6 m de largo, 0.4 m de ancho y 0.2 m de alto.

En el apartado 3.4 de este estudio se aprecia que el tratamiento 1 obtuvo, en base húmeda, 110.73 kg de producto terminado luego de compostar 100 kg de mezcla de materia prima; haciendo una regla de tres simple se puede decir que al compostar 13 700 kg de materia prima, se obtendrá aproximadamente 15 170 kg de producto terminado, en base húmeda. En consiguiente, se almacenarán aproximadamente 607 sacos de compost.

Al igual que en el almacén de materia prima, se pueden apilar los sacos unos encima de otros y se considera hasta una altura de 1.60 m, por lo que en este caso también se pueden almacenar los sacos en columnas y filas de 8 sacos de altura cada una.

En la **tabla 4.16** se muestra la cantidad de columnas y filas que se utilizarán para cubrir con la demanda de almacenaje de 607 sacos de compost por ciclo de trabajo; así mismo, se muestra el espacio requerido para dicho almacenaje

Tabla 4.16. Espacio requerido para almacenar el producto terminado.

	Altura	Columnas	Filas	Capacidad de almacenaje de sacos
Número de sacos	8	9	9	648
Longitud utilizada (m)	1.6	5.4	3.6	

Almacén de residuos

Es el área donde se almacenarán los residuos que no se pudieron compostar; es decir, aquellos que no pasaron por la máquina tamizadora. Estos se almacenarán en sacos con capacidad de 25 kg. Las dimensiones de estos sacos son: 0.6 m de largo, 0.4 m de ancho y 0.2 m de alto. Los residuos se pueden tamizar y ser reutilizados como material en nuevos ciclos de compostaje.

En el apartado 3.4 de este estudio se aprecia que el tratamiento 1 arrojó, en base húmeda, 24.27 kg de residuos luego de compostar 100 kg de mezcla de materia prima; al igual que el caso anterior, haciendo una regla de tres simple podemos decir que al compostar 13 700 kg de materia prima, se obtendrá aproximadamente 3325 kg de residuos en base húmeda. En consiguiente, se almacenarán aproximadamente 133 sacos de residuos.

Al igual que en el almacén de materia prima, se pueden apilar los sacos unos encima de otros y se considera hasta una altura de 1.60 m, por lo que en este caso también se pueden almacenar los sacos en columnas y filas de 8 sacos de altura cada una.

En la **tabla 4.17** se muestra la cantidad de columnas y filas que se utilizarán para cubrir con la demanda de almacenaje de 133 sacos de residuos; así mismo, se muestra el espacio requerido para dicho almacenaje.

Tabla 4.17. Espacio requerido para almacenar los residuos del compost.

	Altura	Columnas	Filas	Capacidad de almacenaje de sacos
Número de sacos	8	4	5	160
Longitud utilizada (m)	1.6	2.4	2.0	

4.3.4.1.3 Evaluación de proximidad entre áreas

Para asegurar que todo el proceso de compostaje se desarrolle bajo condiciones óptimas es necesario evaluar la proximidad entre las diferentes áreas y así mismo establecer la ubicación adecuada de estas. Para esto se realizará un análisis de relación de actividades, presentando en 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 4.18**. (Muther, 1970, págs. 241-243)

Tabla 4.18. Códigos de importancia de la ubicación entre áreas.

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.

Fuente: Muther, R. (1970). *“Técnicas de organización industrial - Distribución en planta”*. (2ª ed.). España. pág. 241.

Se debe establecer unas razones de códigos, con la finalidad de explicar el motivo mediante el cual se justifica dicha proximidad entre dos áreas. Se debe utilizar las que considere necesarios y codificarlos con números, tal como se muestra en la **tabla 4.19**.

Tabla 4.19. Códigos de motivos de proximidad entre áreas.

Código	Motivo
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.

Fuente: Muther, R. (1970). “*Técnicas de organización industrial - Distribución en planta*”. (2ª ed.). España. pág. 241.

A continuación se muestra en la **tabla 4.20** las interrelaciones de las áreas para la disposición del proceso de compostaje. La representación que se utilizó para relacionar los códigos de importancia y de motivo de proximidad es: Letra (Número).

Tabla 4.20. Tabla de interrelación entre áreas.

Área / Área	Recepción y pesaje de materia prima	Almacén de materia prima	Almacén de herramientas y materiales	Compostaje	Tamizado y pesaje	Almacén de producto terminado	Almacén de residuos
Recepción y pesaje de materia prima	-	A (1)	O (5)	E (1)	O (2)	U (4)	U (4)
Almacén de materia prima	-	-	U (4)	A (1)	U (4)	U (4)	U (4)
Almacén de herramientas y materiales	-	-	-	E (5)	I (5)	O (5)	O (5)
Compostaje	-	-	-	-	A (1)	U (3)	U (3)
Tamizado y pesaje	-	-	-	-	-	A (1)	A (1)
Almacén de producto terminado	-	-	-	-	-	-	O (3)
Almacén de residuos	-	-	-	-	-	-	-

4.3.4.1.4 Determinación del espacio requerido para cada área

Para determinar las áreas requeridas para cada departamento establecido se ha utilizado el método de P.F Guerchef, (Zaracóndegui, 1991, págs. 88-89). El cual propone el cálculo del espacio total necesario para cada área, por medio de la suma de tres superficies parciales:

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

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

- **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.

$$Sg = Ss \times N$$

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.

$$Se = (Ss + Sg) \times K$$

Siendo “K” la relación entre las dimensiones de los hombres (altura promedio: 1.65 m) u objetos (superficie) 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.

$$St = (Ss + Sg + Se) \times n$$

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

A continuación se detalla el cálculo del espacio requerido para cada área utilizada en el proceso de compostaje.

- **Área de recepción y pesaje de materia prima**

Área para:	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Ss (m ²)	N	Sg (m ²)	K	Se (m ²)	n	St (m ²)
Balanza de plataforma	0.40	0.50	0.75	0.20	4	0.80	1.06	1.06	2	4.13
Escritorio con silla	1.50	0.60	0.80	0.90	2	1.80	1.06	2.87	1	5.57
Superficie total requerida (m ²)										9.70

- **Almacén de materia prima**

Área para:	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Ss (m ²)	N	Sg (m ²)	K	Se (m ²)	n	St (m ²)
Espacio de almacenaje lodos	0.80	3.00	1.60	2.40	2	4.80	0.52	3.71	1	10.91
Espacio de almacenaje residuos de jardín	4.80	3.00	1.60	14.40	3	43.20	0.52	29.70	1	87.30
Espacio de almacenaje hojarasca de algarrobo	4.80	3.00	1.60	14.40	2	28.80	0.52	22.28	1	65.48
Superficie total requerida (m ²)										163.69

- **Almacén de herramientas y materiales**

Área para:	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Ss (m ²)	N	Sg (m ²)	K	Se (m ²)	n	St (m ²)
Carretillas	1.00	0.52	1.25	0.52	2	1.04	0.64	1.00	4	10.25
Espacio para herramientas	2.00	2.00	1.00	4.00	3	12.00	0.64	10.29	1	26.29
Estante para materiales	3.00	1.00	1.60	3.00	2	6.00	0.64	5.79	1	14.79
Superficie total requerida (m ²)										51.32

- **Área de compostaje**

Área para:	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Ss (m ²)	N	Sg (m ²)	K	Se (m ²)	n	St (m ²)
Espacio para pilas de compostaje	5.00	2.00	1.50	10.00	4	40.00	0.55	27.50	12	930.00
Superficie total requerida (m ²)										930.00

- **Área de tamizado y pesaje**

Área para:	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Ss (m ²)	N	Sg (m ²)	K	Se (m ²)	n	St (m ²)
Maquina vibro tamizadora	3.00	1.00	1.80	3.00	4	12.00	0.65	9.71	1	24.71
Balanza de plataforma	0.40	0.50	0.75	0.20	4	0.80	0.65	0.65	1	1.65
Superficie total requerida (m ²)										26.35

- **Almacén de producto terminado**

Área para:	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Ss (m ²)	N	Sg (m ²)	K	Se (m ²)	n	St (m ²)
Espacio para almacenaje	3.60	5.40	1.60	19.44	1	19.44	0.52	20.05	1	58.93
Superficie total requerida (m ²)										58.93

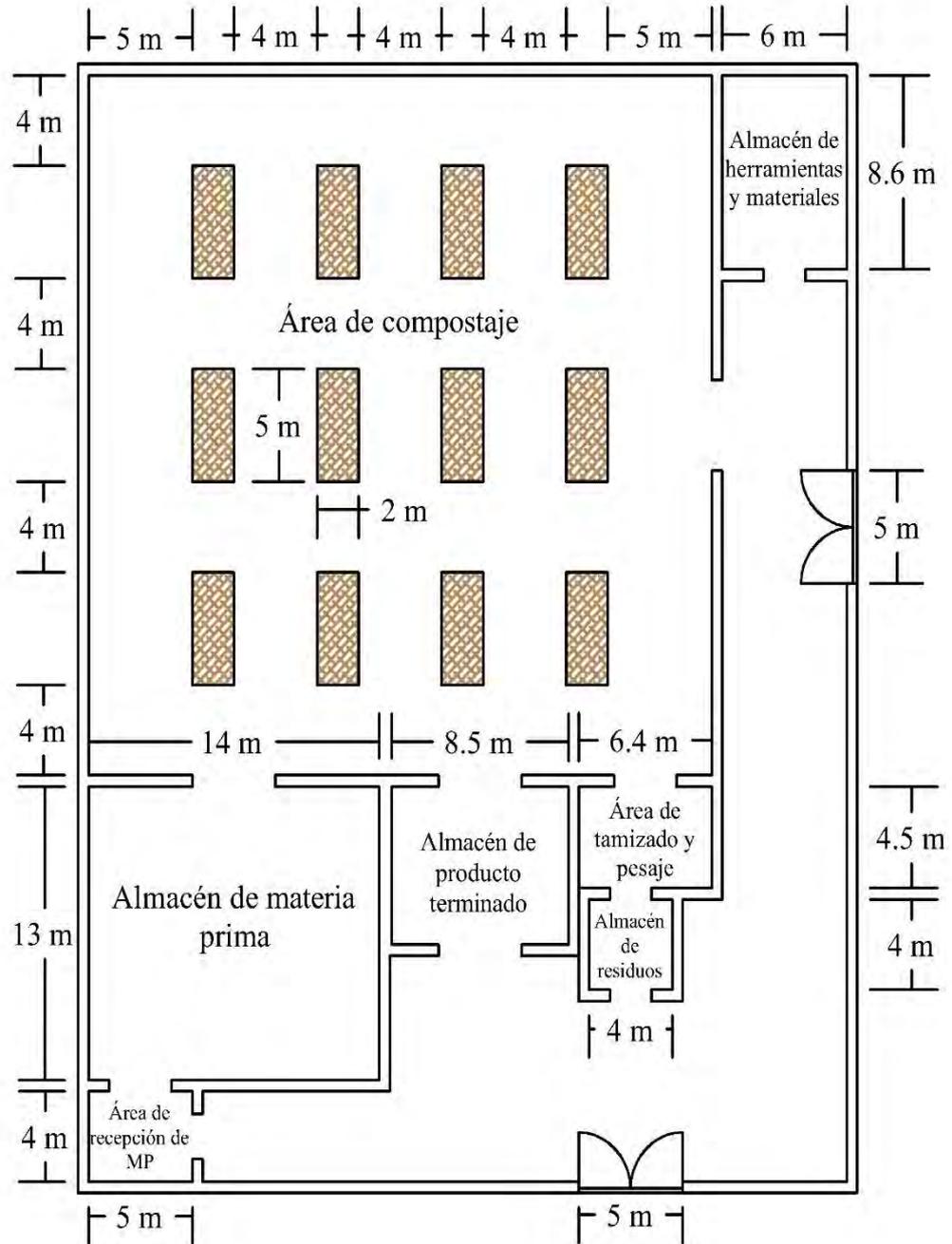
- **Almacén de residuos**

Área para:	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Ss (m ²)	N	Sg (m ²)	K	Se (m ²)	n	St (m ²)
Espacio para almacenaje	2.00	2.40	1.60	4.80	1	4.80	0.52	4.95	1	14.55
Superficie total requerida (m ²)										14.55

Sumando todas las superficies totales requeridas se calcula un total de 1239.99 m² para poder llevar a cabo el proceso de compostaje.

4.3.4.1.5 Distribución de áreas

Con la ayuda de las medidas superficiales de cada área y la evaluación de proximidades entre estas, se realizó la distribución de estas áreas, utilizando un plano en 2D, mostrado a continuación.



Fecha: 22/10/2013	UNIVERSIDAD DE PIURA FACULTAD DE INGENIERÍA	
Propuesta de compostaje para lodos removidos del mantenimiento de las lagunas de estabilización de la Universidad de Piura en febrero del 2012	Distribución de áreas	Escala: 1:300
Enrique Chunga Zapata		Plano N° 1

4.3.4.2 Localización

Se necesita una superficie de 50.0 m x 37.5 m según el diseño del plano en 2D, requiriendo un área total de 1875 m².

En la actualidad, la Universidad de Piura cuenta con espacios libres disponibles para poder llevar a cabo en un futuro el subproceso de compostaje de los lodos. Se ha elegido dos posibles zonas libres dentro del campus, tal como se puede apreciar en la **figura 4.6**, para ser evaluadas por medio de unas variables denominadas factores de localización con el fin de elegir la ubicación ideal.



Figura 4.6. Ubicación de las dos zonas posibles para llevar a cabo el subproceso de compostaje.

Fuente: *Google maps*.

Para llevar a cabo esta elección se ha utilizado el método de factores ponderados, (Dominguez, 1995, pág. 265), 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 la siguiente:

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

Donde:

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 4.21** los factores de localización que se han establecidos según las zonas elegidas, además los pesos ponderados a cada factor para determinar la calificación.

Tabla 4.21. Calificación asignada a cada factor

Factores de localización	Peso ponderado (%)	Alternativas	
		Zona 1	Zona 2
Proximidad a la materia prima	20	6	8
Accesibilidad a la zona	20	9	5
Requerimiento de energía eléctrica	10	8	6
Requerimiento de agua potable	50	3	3
Total	100	5.3	4.7

Según los resultados, la localización óptima se encuentra en la zona 1.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Los parámetros más importantes a medir y que permiten conocer la calidad del proceso de compostaje al inicio, durante y al final de este, son la temperatura, el pH, la relación carbono/nitrógeno y la densidad de coliformes; sin embargo estos parámetros no son los únicos que se deben medir, ya que están en función de los demás parámetros mostrados en este estudio de tesis (humedad, porcentaje de cenizas, porcentaje de materia orgánica, porcentaje carbono orgánico total y porcentaje de nitrógeno total). La temperatura depende de la humedad y la relación carbono/nitrógeno, de los demás.
- Los resultados obtenidos en los análisis físicos, químicos y microbiológicos del compost demuestran que el tratamiento 1 presentó una mayor calidad con respecto a los otros tratamientos evaluados. Así mismo, los resultados de las pruebas de eficiencia de degradación demuestran que el tratamiento 1 degradó mayor cantidad de materia en un plazo de 47 días, siendo este el más eficiente con respecto a los otros tratamientos evaluados. De esta manera, si se desea poner en práctica el método del compostaje como un medio de tratamiento de los lodos almacenados actualmente, se puede asumir la utilización del 10 % de lodo como material base, acompañado del 40 % de residuos de jardín y 50 % de hojarasca de algarrobo en la construcción de cada pila de compostaje.
- La temperatura no indica la calidad que posee el compost; sin embargo, es muy importante medirla en las composteras durante el proceso de compostaje, ya que este parámetro indica en qué etapa se encuentra el proceso, por tanto, permite saber aproximadamente cuando es que el proceso ha llegado a su etapa final y está listo para ser tamizado y empacado. Además permite controlar el proceso y evitar retrasos. Si la temperatura se eleva demasiado ($> 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) pueden morir muchos microorganismos que hacen posible el desarrollo del proceso y en algunos casos, dependiendo del clima y la frecuencia de riego, se podrían producir incendios naturales en las composteras. Las temperaturas medidas en este estudio se mostraron normales y no representaron complicaciones.
- La medición de la temperatura es el medio más fácil de para controlar el proceso de compostaje, pero no es el único. Un método más complicado es la medición del pH, especialmente en su etapa final. 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.

- La relación carbono/nitrógeno es un indicador muy importante de la calidad edáfica que posee el compost a lo largo de su proceso de elaboración. El compost del tratamiento 4 arrojó una relación C/N menor a 8 en su etapa final del proceso de compostaje, por lo que se clasifica como un compost de muy buena calidad edáfica, mientras que los tratamientos 1, 2 y 3 presentan relaciones C/N entre 8 y 10, clasificándose como compost de buena calidad edáfica, lo cual sugiere al tratamiento 4 como el óptimo, según la evaluación de este parámetro; sin embargo, la elección del tratamiento 1 como el tratamiento guía en la construcción de las pilas de compostaje no representa una decisión errada.
- Con respecto a la evaluación de la población de los coliformes ningún tratamiento alcanzó el rango permisible ($< 1 \times 10^5$ NMP / 100 g compost) de densidad de coliformes fecales, en un tiempo de 47 días, pero se observa una tendencia decreciente a lo largo del tiempo en los tratamientos 1 y 4; sin embargo, el tratamiento 1 muestra los valores más cercanos al límite permisible, por tal motivo se espera que el tratamiento 1 alcance los valores permisibles en un tiempo menor que los otros tratamientos, pero mayor a los 47 días evaluados en este estudio de tesis.
- El mantenimiento de una laguna de estabilización representa un elevado esfuerzo y una inversión grande, por lo que debe planificarse adecuadamente. El mantenimiento no solo consiste en remover los lodos acumulados en el fondo de las lagunas, sino que empieza desde la planificación de esta actividad, sigue con la remoción de los lodos, luego corresponde el almacenamiento de estos y finalmente se les tiene que dar un tratamiento.
- La compostación de los 125 000 kg de lodo almacenado actualmente genera aproximadamente 607 sacos de compost, de 25 kg cada uno, por cada ciclo de compostaje. Se necesitan alrededor de 23 ciclos para lograr compostar todo el lodo, siendo un total de 13 961 sacos de compost, los cuales pueden ser vendidos o ser usados para abonar las áreas verdes del campus, ahorrándose el dinero que invierte la universidad en la compra de estiércol vacuno, destinado para ese fin. Esto ayudará a solventar en una parte los gastos incurridos en el mantenimiento de las lagunas, sin mencionar los beneficios ambientales que trae consigo.

Recomendaciones

- Antes de iniciar cualquier actividad de mantenimiento se recomienda evaluar y prever los costos en que se incurrirá.
- En la remoción de lodos se recomienda utilizar mano de obra, en vez de maquinaria pesada, ya que si no se tiene el suficiente cuidado, la maquinaria pesada podría dañar las capas impermeables de las lagunas de estabilización, teniendo que incurrir en un gasto mayor para repararlas.

- Se recomienda que la frecuencia de muestreo en los lodos almacenados para los análisis físico-químicos y microbiológicos sea mensualmente, de tal forma que se tenga un registro del comportamiento de los lodos almacenados a lo largo del tiempo. Los precios unitarios para los servicios de análisis de muestras que brinda el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria del IHHS de la Universidad de Piura son de S/. 225.90 para los parámetros físico-químicos requeridos y de S/. 138.60 para los análisis microbiológicos requeridos, siendo un total de S/.364.50 por muestra. En este estudio de tesis se consideró que se debería sacar 13 muestras de los lodos almacenados, siendo un total de S/. 4738.50 por mes, lo que al año sería S/. 56 862.00. Si se desea estudiar el comportamiento de los lodos almacenados es muy importante no disminuir la frecuencia de muestreo, sin embargo si no se dispone de suficiente capital para el proyecto, se pueden disminuir el número de muestras, de preferencia para los análisis físico-químicos, ya que en esta etapa los análisis microbiológicos son más importantes, por lo que determinan en que momento los lodos están listos para ser compostados.
- Para el compostaje de los lodos, 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.
- Se recomienda que la frecuencia de muestreo en las pilas de compostaje para los análisis físico-químicos sean cada dos semanas, mientras que los muestreos microbiológicos, semanalmente. Si se trabaja con las 12 pilas de compostaje propuestas en este estudio y considerando una muestra por pila, sin repetición, el costo será de S/. 2710.80 cada 2 semanas para los análisis físico-químicos y de S/. 1663.20 semanalmente para los microbiológicos, en todo el ciclo de compostaje se incurrirá en un gasto de S/. 24 148.80. Si no se cuenta con el capital para solventar este gasto, se puede iniciar los análisis a partir de la quinta o sexta semana de compostaje, tiempo para el cual, el compost ya va tomando forma.
- Se recomienda que el tiempo que dure el proceso de compostaje sea mayor a 47 días. El tiempo debe ser el suficiente hasta que la presencia de coliformes fecales tenga una densidad menor a 1×10^5 NMP / 100 g compost, el cual es un valor permisible para este parámetro.
- Para asegurar un desarrollo óptimo del proceso de compostaje, la medición de la temperatura y el control de la oxigenación no deben dejar de efectuarse mientras dure el proceso. La temperatura se mide utilizando un termómetro especial de suelos y el control de la oxigenación se realiza por medio de volteos. Se recomienda medir la temperatura con una frecuencia interdiaria y la aplicación de volteos, 2 veces a la semana, debido a que se cuentan con pilas de 5 m de largo.
- Se recomienda que los residuos generados en el tamizado sean triturados y compostados junto con los materiales del siguiente ciclo de compostaje que se presente. Por lo cual se deberá adquirir una máquina vibrotamizadora. El precio de ésta máquina varía aproximadamente entre S/10 000.00 y S/ 15 000.00

- Para compostar toda la cantidad de lodo presente se necesita aproximadamente 3 años. Después cumplir con este propósito, restan entre 7 a 12 años para llevar a cabo el próximo mantenimiento. En ese lapso de tiempo las instalaciones de compostaje quedarán libres, por lo que se recomienda usarlas como una pequeña planta procesadora de compost, utilizando como materias primas la hojarasca de algarrobo, los residuos de jardín y otro u otros materiales generados en el campus de la universidad, en la medida en que sea factible. La metodología de compostaje seguirá siendo la misma.

Bibliografía

1. **Álvarez, J.** (2009). *“La calidad del suelo y del compost del parque de Itchimbia en su proceso de recuperación”*. Quito - Ecuador.
2. **Arrea, G., Calvo, N., García, D., & Hernando, J.** (s.f.). *“Relación C/N en un suelo”*. Disponible en <af2.wikispaces.com/file/view/Relación+C.N.doc>. Consultado el 24 de junio de 2013.
3. **Bonilla, M., & Mosquera, M.** (2007). *“Seguimiento de la presencia de rotavirus a un proceso de compostaje realizado a partir de los residuos orgánicos domiciliarios y contenido rumial”*. Pontificia Universidad Javeriana - Facultad de Ciencias - Carrera de Microbiología Industrial y Microbiología Agrícola y Veterinaria. Bogotá - Colombia.
4. **Cantanhede, A., Monge, G., & Wharwood, G.** (s.f.). *“Compostificación de residuos de mercado”*. Empresa de Servicios Municipales de Limpieza de Lima. Lima - Perú. Disponible en <<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/composti.pdf>>. Consultado el 02 de febrero de 2013.
5. **Carranza, E. T.** (s.f.). *“Reutilización de aguas y lodos residuales”*. Madrid - España.
6. **Cogger, C., Sullivan, D., & Koprí, J.** (2001). *“Como hacer y usar el compost”*. Universidad Estatal de Oregon - Departamento de Agricultura. Oregon - Estados Unidos. Disponible en <<http://extension.oregonstate.edu/catalog/pdf/ec/ec1544-se.pdf>>. Consultado el 19 de enero de 2013.
7. **Collado Arias, I.** (s.f.). *“Reingeniería de la E.D.A.R. de Tarija- Operación, mantenimiento y control de las lagunas”*. Escuela Internacional de Ingeniería del Agua de Andalucía. España. Disponible en <http://prueba2.aguapedia.org/master/ebiblio/proyectos_Fc/proyecto_isabel_collado/DOCUMENTOS/ANEJOS/ANEJO%20N%C2%BA3%20LAGUNAS.pdf>. Consultado el 26 de febrero de 2013.
8. **Comisión Nacional del Agua.** (2007). *“Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento”*. Disponible en <<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/10DisenoDeLagunasDeEstabilizacion.pdf>>. Consultado el 17 de enero de 2013.
9. **Dios Perez, M.** (2008). *“Estudio y desarrollo de técnicas respirométricas para el control de la estabilidad del compost”*. Universidad de Córdoba. Córdoba -España.

Disponible en <<http://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/366>>. Consultado el 19 de enero de 2013.

10. **Domínguez, J.** (1995). *“Dirección de operaciones - Aspectos estratégicos en la producción y los servicios”*. (3ª ed.). España.
11. **EM- Effective Microorganisms.** (s.f.), *“Portal Oficial de la tecnología EM en América Latina”*. Disponible en <<http://em-la.com/index.php?idioma=1>>. Consultado el 19 de enero de 2013
12. **EM-Microorganismos Eficaces.** (s.f.). *“Portal oficial del BIOEM”*. Disponible en <<http://www.bioem.com.pe/index.php>>. Consultado el 19 de enero de 2013
13. **Fuentes Beltrán, R.** (s.f.). *“Lagunas de maduración - Sistemas de depuración natural - Tecnología para la depuración sostenible del agua residual”*. Disponible en <<http://depuranatura.blogspot.com/2011/05/lagunas-de-maduracion-la-tecnologia-de.html>>. Consultado el 23 de enero de 2013
14. **Franci Gonçalves, R.** (1999). *“Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas”*. Departamento de Hidráulica y Saneamiento - Centro Tecnológico de la Universidad Federal de Espírito Santo. Estado de São Paulo - Brasil.
15. **Gomez Palacios, J., & Estrada de Luis, I.** (2005). *“Índices de calidad de suelos y compost desde la perspectiva agro-ecológica”*. II Congreso sobre residuos biodegradables y compost. Sevilla - España. Disponible en <http://www.bpeninsular.com/pdfs/Ponencia_ISR_Sevilla.pdf>. Consultado el 19 de enero de 2013.
16. **López Armenta, S., Ramírez Camperos, E., Cardoso Vigueros, L., Mijaylova Nacheva, P., & Moeller Chávez, G.** (s.f.). *“Tratamiento de lodos residuales municipales con un proceso aerobio-termofílico”*. Disponible en <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/peru/mextar014.pdf>>. Consultado el 19 de enero de 2013.
17. **Meckes, M., & Rice, E.** (2003) *“Microbiological examination PART 900 - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 9221 Multiple-Tube Fermentation Technique for Members of the Coliform Group”*.
18. **Mendoza Juárez, M.** (2012). *“Propuesta de compostaje de los residuos vegetales generados en la Universidad de Piura”*. Universidad de Piura – Facultad de Ingeniería. Piura.
19. **Montserrat, S., & Huerta, O.** (2004). *“Compostaje de lodos resultantes de la depuración de aguas residuales urbanas”*. Escuela Superior de Agricultura de Barcelona. Barcelona-España. Disponible en <http://mie.esab.upc.es/ms/recerca_experimentacio/articulos_ESAB/Compostaje%20lodos.pdf> Consultado el 20 de enero de 2013.
20. **Muther, R.** (1970). *“Técnicas de organización industrial - Distribución en planta”*. (2ª ed.). España.

21. **Norma mexicana NMX-AA-16-1984.** (1992). “*Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de humedad*”. Disponible en < <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa016.pdf>>. Consultado el 13 de junio de 2013
22. **Norma mexicana NMX-AA-18-1984.** (1992). “*Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos - Determinación de cenizas*”. Disponible en < <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa018.pdf>>. Consultado el 13 de junio de 2013.
23. **Norma mexicana NMX-AA-25-1984.** (1992). “*Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de pH - Método potenciométrico*”. Disponible en < <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa025.pdf>>. Consultado el 13 de junio de 2013.
24. **ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD.** (1996). “*Lagunas de estabilización*”. Panamá.
25. **Pacheco Rodríguez, F.** (2009). “*Evaluación de la eficacia de la aplicación de inóculos microbiales y de eisenia fetida en el proceso de compostaje doméstico de desechos urbanos*”. Disponible en <http://www.rapaluruaguay.org/organicos/articulos/PRACTICUM_FABIAN_PACHECO.pdf>. Consultado el 20 de enero de 2013.
26. **Ruiz, A.** (2002). “*Compostación de los residuos sólidos orgánicos generados en la Universidad de Piura*”. Universidad de Piura – Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.
27. **Silva V., J. P., López M., P., & Valencia A., P.** (s.f.). “*Recuperación de nutrientes en fase sólida a través del compostaje*”. Universidad del Valle - Facultad de Ingeniería. Cali - Colombia. Disponible en <<http://www.bvsde.paho.org/bvsars/fulltext/compostaje.pdf>>. Consultado el 20 de enero de 2013.
28. **Stewart M., O.** (2005). “*Lagunas de estabilización en Honduras - Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad*”. Honduras.
29. “*Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades*”. (s.f.). Recuperado el 17 de enero de 2013 de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/19117/Capitulo4.pdf>.
30. “*Tratamiento de lodos, capítulo 1*”. (s.f.). Recuperado el 2013 de Enero de 27, de <<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/18831/Capitulo1.pdf>>
31. **Yanez, F.** (1971). “*Lagunas de estabilización*”. Disponible en <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/04828/04828-03.pdf>>. Consultado el 17 de enero de 2013.
32. **Zaracóndegui, A.** (1991). “*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.