

**ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO DE COMPOSTAJE PARA LA
VALORIZACIÓN DE LODOS PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO
DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL**

**JORGE FERNANDO RAMÍREZ LONDOÑO
DANIEL EDUARDO GALLEGO CARMONA**

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
INGENIERIA AMBIENTAL
MANIZALES
2016**

**ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA
LA VALORIZACIÓN DE LODOS PROVENIENTES DE PLANTAS DE
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL**

TRABAJO DE GRADO

Requisito para obtener el título de Ingeniero Ambiental

**DANIEL EDUARDO GALLEGO CARMONA
JORGE FERNANDO RAMÍREZ LONDOÑO**

TUTORES

**Ing. WILMAR OSORIO VIANA
Ing. JAVIER MAURICIO NARANJO**

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
INGENIERIA AMBIENTAL
MANIZALES**

2016

CONTENIDO

RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	8
JUSTIFICACIÓN	9
1. OBJETIVOS	10
1.1 Objetivo general	10
1.2 Objetivo específico.....	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 ¿Qué son los lodos residuales?.....	11
2.2 Origen de los lodos industriales	11
2.3 Técnicas de valorización de lodos residuales.....	12
2.4 Compostaje.....	15
2.5 Etapas del compost y su comportamiento en el tiempo	17
2.5.1 Etapa de latencia	17
2.5.2 Etapa mesófila I.....	18
2.5.3 Etapa termófila	18
2.5.4 Etapa mesófila II.....	18
2.6 Parámetros a supervisar.....	19
1.6.1 pH	19
2.6.2. Aireación	20
2.6.3. Temperatura.....	21
2.6.4 Humedad.....	22
2.6.5 Relación carbono – nitrógeno C/N	23
2.6.6 Capacidad de intercambio catiónico.....	25
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
3.1 Información inicial	27
3.3 Montaje del experimento.....	29
3.4 Métodos de análisis de muestras	30
3.4.1 Nitrógeno total	30
3.4.2 Capacidad de intercambio catiónico.....	31
5. RESULTADOS	33

5.1 Diseño y adecuación del terreno	34
6. PROYECCIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A UNA A ESCALA INDUSTRIAL	43
7.1 Lugar donde se va a realizar el compost:	43
7.2 Transporte requerido para el traslado de los lodos:.....	43
7.3 Tipo de operación a realizar:	43
7. CONCLUSIONES	45
8. REFERENCIAS	47

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de sistemas de compostaje. (S.A PORRAS. 2011).....	15
Tabla 2. Rangos de pH: (MANUAL DE COMPOSTAJE DEL AGRICULTOR EXPERIENCIAS EN AMÉRICA LATINA, FAO)	19
Tabla 3. Cambios en el porcentaje de humedad. Fuente: (COOLEMAR, 2012).....	22
Tabla 4. Rangos de relación Carbono/Nitrógeno (C/N). Fuente: (COLEMAR, 2012).....	24
Tabla 5. Equilibrio Carbono/Nitrógeno según materiales: Fuente: Manual para la elaboración del compost: Bases conceptuales y procedimientos.	25
Tabla 6. Caracterización fisicoquímica inicial.....	27
Tabla 7. Datos experimentales de temperatura durante el proceso de compostaje del lodo.....	36
Tabla 8. Comparación de parámetros fisicoquímicos iniciales (lodo) y finales (compost).....	40
Tabla 9. Costos de operación y de transporte	44

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de compostaje abierto. Fuente: Manual del compostaje casero.....	16
Figura 2. Sistema de compostaje cerrado. Fuente: Manual del compostaje del agricultor.....	17
Figura 3. Proceso del café soluble. Fuente:(HTTP://WWW.ESCOFFEE.COM/SOBRE_PROCESO.PHP)	27
Figura 4. Soporte base para el montaje de la pila.	34
Figura 5. Montaje del sistema de compost en pila de volteo.	34
Figura 6. Mezcla de lodo residual y aserrín para obtención de un óptimo equilibrio C/N y nivel de humedad.	35
Figura 7. Gráfico asociado a la Tabla 7 - Temperatura contra rango de número de días	37
Figura 8. Hongos filamentosos que crecen en el material, aumento en la población microbiana. Fuente: Propia	38
Figura 9. Hongos presentes en el cambio de fases del compostaje.	39

RESUMEN

La sostenibilidad y los impactos ambientales generados por el sector industrial se presenta actualmente como un reto significativo para nuestro bienestar y el correcto desarrollo sostenible, lo cual hace importante reconocer y atender los riesgos que genera este complejo sector para nuestro ambiente.

Uno de los problemas más frecuentes en el sector industrial es la contaminación de las aguas empleadas en sus procesos, es por esto que la mayoría de las empresas deban contar una planta de tratamiento de aguas residuales; al finalizar el tratamiento de estas aguas, todo el sedimento (lodo residual) se convierte en todo un reto para que la empresa u otras entidades realicen la mejor gestión sobre este residuo.

Las industrias de alimentos, son una de las principales fuentes generadores de lodo residual, antes de su generación, la empresa requiere realizar algunos procesos de saneamiento hídrico para poder verter o disponer de manera legal y adecuada las aguas que han sido usadas durante el proceso productivo. El lodo resultante, es un material que presenta una alta concentración de materia orgánica, es por esto que al someterlo a procesos de biotransformación se puede obtener grandes beneficios para la gestión ambiental que tanto se requiere.

Este estudio se ocupa del recuento técnico de un proceso de tratamiento de los lodos obtenidos en la PTAR de una empresa de alimentos derivados del café, de las características que obtuvo el material al termino del experimento y de cómo empresas del sector alimenticio, se pueden beneficiar de estos residuos de manera económica y ambiental, al sometersus lodosa un proceso de biotransformación (compostaje).

ABSTRACT

Sustainability and environmental impacts generated by the industrial sector is currently presented as a significant challenge for our well-being and sustainable development right, which makes it important to recognize and address the risks generated by this complex sector for our environment.

One of the most common problems in the industrial sector is the contamination of water used in their processes, which is why most companies should have a treatment plant wastewater; the end of treatment of these waters, all the sediment (sludge) becomes a challenge for the company or other entities performing better management of this waste.

Food industries, are one of the main generating sources of sewage sludge before its generation, the company needs to make some processes water sanitation to pour or have legally and properly waters have been used during the production process. The resulting sludge is a material having a high concentration of organic matter, which is why when subjected to biotransformation processes can reap significant benefits for both environmental management is required.

This study deals with the technical account of a treatment process sludge obtained in the WWTP of a food company from coffee, the characteristics that obtained the material at the end of the experiment and how food businesses, can benefit of these residues environmental and economic way, by subjecting their sludge to a biotransformation process (composting).

INTRODUCCIÓN

Los principales constituyentes del agua residual eliminados en las plantas de tratamiento incluyen basuras, arena, espumas y lodo. El lodo generado en las operaciones y procesos de tratamiento de las aguas residuales generalmente suele ser una suspensión con gran contenido en sólidos. La disposición correcta de estos residuos es una obligación y una necesidad constante de las industrias que poseen Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), lo que implica un costo de transporte y disposición, comúnmente en un relleno sanitario.

El aprovechamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua residual, ha venido cobrando interés en las últimas décadas como una forma de utilización eficiente de los materiales, para la reducción de los costos de operación de los procesos por generación interna de energía y/o por aumento de los ingresos por venta de subproductos de valor agregado. Todo lo anterior puede enmarcarse dentro de la filosofía de la producción más limpia y el desarrollo industrial sostenible(ÁLZATE, 2002).La aplicación de procesos de valorización de lodos puede generar nuevas líneas de negocio para el sector industrial, mejorar su viabilidad económica, reducir su impacto ambiental y por ende aportar al fortalecimiento de su competitividad(MENDOZA ET ALL, 2010).

Una biotecnología bastante interesante y posiblemente viable para la valorización de estos lodos es llamada compostaje, la cual por medio de descomposición biológica puede transformar grandes cantidades de materia orgánica; por eso el presente proyecto se enfoca en realizar un estudio teórico-experimental con los lodos provenientes de la planta de tratamiento de agua residual de lodos activados de una industria de alimentos (uno de los sectores de la producción industrial más importantes de la región Caldas y de Colombia), buscando cual es el posible sistema de tratamiento más eficiente (sistema abierto o sistema cerrado), proponiendo unos diseños básicos del proceso y evaluándolo experimentalmente a escala de laboratorio, para posteriormente estimar económica y técnicamente la viabilidad del proceso para su implementación a escala industrial.

JUSTIFICACIÓN

La situación actual en nuestra region exige, a todas las industrias, desarrollar e implementar novedosas alternativas ingenieriles que mitiguen la crisis ambiental en un marco de desarrollo sostenible. Dentro de las estrategias de las empresas que buscan aumentar su competitividad como parte de la mejora continua, se debe proyectar la aplicación de principios ambientales corporativos sostenibles e implementar procesos de producción más limpia; gran parte del sector industrial de nuestra región se encarga del procesamiento de alimentos, es por esto que el tratamiento de los lodos residuales con altas cargas orgánicas es una buena alternativa para obtener grandes beneficios a nivel económico, por ejemplo a todas las industrias que puedan aplicar un fertilizante orgánico obtenido por la valorización de los lodos residuales resultantes de su proceso productivo a todos sus cultivos. Más aun, esta es una opción a todas las empresas que quieran emprender con un producto adicional resultante del tratamiento de uno de sus residuos, beneficiándose de los grandes beneficios que puede tener esta alternativa a nivel económico y ambiental, apuntando al incremento en los indicadores de sostenibilidad.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

- Evaluar la posibilidad de valorizar, por compostaje, los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual en una industria de producción de alimentos.

1.2 Objetivo específico

- Seleccionar el sistema de compostaje más eficiente: sistema abierto o sistema cerrado.
- Proponer diseños básicos del proceso de compostaje de los lodos, a escala de laboratorio.
- Evaluar experimentalmente a escala de laboratorio el o los procesos propuestos.
- Estimar económica y técnicamente la viabilidad de implementar el proceso de valorización a escala industrial.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ¿Qué son los lodos residuales?

Son un residuo que se genera en el momento de tratar las aguas residuales, generalmente la variabilidad de sus componentes depende de la actividad a la que se dedica la industria.

Estos tipos de lodos pueden ser clasificados en función de la toxicidad y la prioridad de manejo, así (TREJOS, 2012):

- Lodos orgánicos con bajas concentraciones de contaminantes tóxicos, fácilmente biodegradable, prioridad I.
- Lodos orgánicos e inorgánicos con bajas concentraciones de contaminantes tóxicos, los orgánicos no fácilmente biodegradables, prioridad II.
- Lodos orgánicos e inorgánicos conteniendo contaminantes tóxicos, prioridad III.

Las opciones de manejo de acuerdo a los tipos de lodos se han establecido en función de su prioridad, así (TREJOS, 2012):

- Prioridad I: reúso como fertilizante, dependiendo de la composición; prevención dependiendo del proceso de generación, relleno sanitario o incineración.
- Prioridad II: reúso y revalorización, dependiendo de la composición; Compostaje, incineración o relleno.
- Prioridad III: Prevención, dependiendo de los procesos de generación del lodo o disposición en monorellenos.¹

2.2 Origen de los lodos industriales

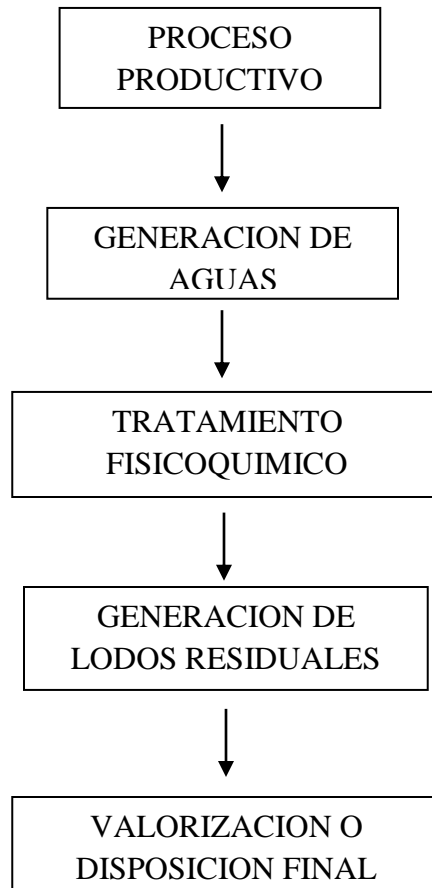
La generación de lodos industriales en procesos de producción es común, en prácticamente todos los sectores industriales: textil, química y farmacéutica, pulpa y producción del papel, metalmeccánica, electrotécnica, procesamiento de alimentos, curtido del cuero, etc. (CASTRO, 2011)

¹Monorellenos: Celda o depósito diseñado para recibir y confinar lodos, favoreciendo su degradación en condiciones controladas. (KDM EMPRESAS.2012).

Estos lodos se producen en el momento en que son tratadas las aguas residuales, resultantes de los procesos industriales. Su disposición y manejo es medianamente complejo, debido a los olores que pueden producir ² (debido al proceso de descomposición de la materia orgánica), y a las características físicas y químicas que estos pueden llegar a tener.

2.3 Técnicas de valorización de lodos residuales

La generación de lodos residuales en el proceso se resume de la siguiente manera:



El criterio para saber qué tan digeridos están los lodos provenientes de una PTAR varían según, los tratamientos realizados posteriormente salidos de la planta, las características iniciales que este tenga, y su estado durante su manejo, este último es mencionado ya que cuando el material

² Por lo general estos lodos son mezclados con cal, para elevar el pH y evitar que se descompongan anaeróbicamente, ya que la cal modifica la velocidad de descomposición de estos, reduciendo y evitando la generación de olores. (GUIAAMBIENTAL.COM.AR, 2010).

se encuentra estático puede comenzar procesos de degradación anaerobia la cual cambiaría sus características iniciales.

El proceso de compostaje puede ser monitoreado y controlado gracias a su temperatura que determina la fase y el momento de degradación en el que este está, de acuerdo a esto se pueden tomar acciones para corregir y mejorar todo el proceso de degradación que los microorganismos presentes en este realizan.

Dependiendo de la composición y tipo de lodo, este puede reciclarse al interior del proceso para recuperar ciertos materiales presentes o utilizarse como materia prima para la obtención de un producto de valor agregado. Entre las opciones de valorización de los lodos, se encuentran:

1. Obtención de abono orgánico, para promover la regeneración de la vida microbiana de la tierra y mejorar la composición química y física del suelo.
2. Obtención de fertilizantes, para generar un aporte de nutrientes necesarios para el suelo en un momento determinado (en terrenos autorizados por la autoridad competente), ya sea en forma cruda o después de algún tratamiento.
3. Obtención de energía, los lodos orgánicos pueden ser incinerados para producir energía, generando electricidad o produciendo vapor (principio desecho-a-energía), restringiendo aquellos que no pueden ser eliminados por este procedimiento debido a las características de sus componentes. Otra de las tecnologías más apropiadas para este proceso es la gasificación, que permite obtener gases combustibles que, una vez lavados, pueden ser usados en motores de combustión. También se usa la digestión anaerobia de los lodos para la producción de biogás metano. Parte de la energía así obtenida puede ser usada para el propio secado de los lodos, el cual es una etapa crítica en su tratamiento y gestión ya que su humedad puede oscilar entre 50-70% y su transporte requiere disminuirla a menos del 10%.
4. Recuperación de minerales mediante la “fusión” o mezcla de lodos procedentes de las cenizas de las incineradoras que contienen metales pesados. Estas cenizas se vitrifican en una cámara a 1400°C (lo que estabiliza y reduce el volumen). El material así obtenido

sirve para la fabricación de materiales de construcción compuestos (mezclado con cemento).

5. Ceramización al usar los lodos como materia prima secundaria en la fabricación de cerámicos³ convencionales, lo cual resulta interesante ya que los materiales cerámicos tienen una gran capacidad inertizadora⁴ de metales pesados, los cuales se embeben en la fase vítrea, mientras que el material orgánico se destruye térmicamente⁵, dando lugar a la formación de una estructura porosa.
6. Recuperación de espacios degradados mediante la aplicación a la regeneración de suelos desestructurados o agotados. (SAMOLADA, 2014)

El tratamiento que se debe dar a los lodos dependerá de las características requeridas para que cumpla totalmente con los requisitos necesarios para su reuso, valorización o disposición final, utilizando para esto procedimientos viables de acuerdo a las características del lodo y a la disponibilidad de tecnología, los que a su vez deben ser efectivos, fáciles de aplicar y que en lo posible no impliquen costos elevados.

Debido a que se tratará aquí con lodos provenientes de una PTAR industrial de una compañía de fabricación de alimentos, no se es para en principio que el lodo presente características de material peligroso (metales pesados o agentes tóxicos), por lo que la opción de valorización debe ser el compostaje. (SAMOLADA, 2014).

Además de esto, este proyecto de investigación viene enlazado a una fase de caracterización y experimentación con lodos provenientes de la misma planta y las mismas características del lodo que se utiliza para este compost; de acuerdo a esos resultados obtenidos, se determinó que la técnica de valorización para los lodos que se generan en esta empresa, por sus características fisicoquímicas y por su alto contenido de material orgánico la técnica de compostaje es la más apropiada, sistema de compostaje fue comparado teóricamente con otras tecnologías de

³ Cerámicos: Materiales caracterizados por estar compuestos de minerales arcillosos, minerales calcáreos y contenidos discretos de materia orgánica, empleados comúnmente en la fabricación de ladrillos para construcción. (CARDEÑO & AGRIPINO, 2009)

⁴ Capacidad inertizadora: Capacidad que tienen los materiales de inactivar o minimizar la potencial naturaleza química de ciertos compuestos u otros materiales. (WIKIMEDIA, 2014)

⁵ Destrucción térmica: Destrucción mediante combustión o quema técnicamente controlada de las sustancias orgánicas contenidas en un residuo o sustancia. (PAULINA, 2014).

valorización, como la generación de energía o la ceramización, pero los costos que implican estas otras tecnologías y por los criterios de operación fue definido el compostaje.

2.4 Compostaje

Se define el compostaje como el proceso de descomposición biológica de suficiente material orgánico en condiciones controladas. Las bacterias, los hongos y actinomicetos, son los microorganismos que controlan el proceso de degradación y descomposición la mayor parte del tiempo, existiendo especies mesófilas y termófilas. Este proceso consta de cuatro fases, en las cuales estos microorganismos interactúan con el medio para estabilizar⁶ el material. (MENDOZA, 2012).

El proceso de compostaje se ha realizado desde muy antiguo, principalmente por agricultores y ganaderos que han aprovechado la fracción orgánica de sus residuos para producir un fertilizante bastante efectivo en sus cultivos. Esta práctica ayudaba a minimizar los problemas ambientales y sanitarios que causan los residuos sólidos. (COOLEMAR, 2012)

El proceso de compostaje que se estudia en este trabajo, está ligado a los residuos que provienen de una PTAR de industria de alimentos, por lo que la materia prima para la biotransformación está compuesta principalmente por materia orgánica. (MERCHÁN & GÓMEZ, 2016)

En la tabla 1 se hace una comparación entre los dos sistemas de compostaje posibles, abiertos y cerrados, los cuales se diferencian en la tecnología que emplean y en los procedimientos en el manejo del material, siendo el proceso de biotransformación similar: pero los factores de área requerida para disponer el material, volumen ocupado por el sistema, tiempo de operación y costos de inversión, juegan un papel importante en el tratamiento a implementar.

Tabla 1. Comparación de sistemas de compostaje. (S.A PORRAS. 2011)

Parámetro	Descripción para sistemas abiertos	Descripción para Sistemas Cerrados
Superficie a ocupar	Grande	Reducida
Clima	Temperaturas no extremas	Variable y frío
Sustrato	Todos, pero con material de soporte	Principalmente aquellos con elevada humedad

⁶ Hace referencia tanto a la neutralización de agentes contaminantes y como al cese de variaciones en las características fisicoquímicas presentes en el material.

Tecnología	Relativamente sencilla. Dos opciones de sistemas de aireación: forzada ⁷ y volteos ⁸	Relativamente sofisticada. Múltiples opciones de sistemas de aireación.
Inversión	De baja a moderada	De elevada a muy elevada
Costos de explotación⁹	Variable	Elevado
Consumo energético	Bajo a medio	Medio a elevado
Olores	Problemas si no hay suficiente aireación	Se pueden controlar
Duración	Compostaje: 21 a 28 días Maduración mínimo 30 días	Compostaje: 3 a 15 días Maduración: mínimo a 30 días
Calidad final del producto	Buena si el proceso es adecuado	Mejor calidad

A continuación, se presentan dos figuras que ejemplifican los diseños de un sistema cerrado y de un sistema abierto de compostaje:

Figura 1. Sistema de compostaje abierto. Fuente: Manual del compostaje casero.



⁷ Aireación Forzada: Es un sistema de suministro de aire desarrollado de manera insuflada que puede realizarse de forma continua o por intervalos.

⁸ Volteo: Técnica de compostaje que se caracteriza por el hecho de que la pila se remueve periódicamente para homogeneizar la mezcla y su temperatura, a fin de eliminar el excesivo calor, controlar la humedad y aumentar la porosidad de la pila para mejorar la ventilación.

⁹ Costos de explotación: Son los costos que generan las actividades del proceso que no están conectadas directamente con la actividad principal de este. Gasto que se lleva a cabo día a día y no tiene que ver con la producción.

Figura 2. Sistema de compostaje cerrado. Fuente: Manual del compostaje del agricultor, (sf).



2.5 Etapas del compost y su comportamiento en el tiempo

2.5.1 Etapa de latencia¹⁰

Esta es la etapa inicial del proceso de biodegradación, ocurre desde el momento en que se construye la pila¹¹ de volteo (a temperatura ambiente) hasta que se comienza a notar un aumento en la temperatura inicial del lodo. Para que esta etapa comience de manera inmediata, se deben fijar de forma adecuada los parámetros de relación Carbono/Nitrógeno (C/N), pH, y la concentración parcial de oxígeno en los valores adecuados; otros parámetros o factores que pueden afectar en esta etapa son la cantidad de biomasa, la temperatura ambiente, la carga microbiana que contenga el material inicial. Con una temperatura ambiente valorada en el intervalo de 10° a 20°C, en pilas que contengan las dimensiones adecuadas para la cantidad de material con el cual se trabajará (Especificado en el capítulo de Materiales y métodos) sobre montaje, la fase de latencia puede llegar a durar hasta 72 horas desde el momento que se realice el montaje del compost.(COOLEMAR, GALLARDO. 2012)

¹⁰ Latencia microbiana: Periodo de adaptación de un microorganismo a un nuevo medio de cultivo.

¹¹ Pila de volteo: Acumulación del material en una forma parabólica con dimensiones estratégicas previamente definidas.

2.5.2 Etapa mesófila I¹²

Esta es una etapa donde la respiración aerobia comienza a notarse; ocurre generalmente a una temperatura entre los 10°C hasta los 40°C, en donde se destacan los microorganismos mesófilos en constante fermentación facultativa y está ligada a los procesos de oxidación y nitrificación de compuestos. La actividad que realizan los microorganismos para metabolizar la materia orgánica, genera un incremento paulatino en la temperatura. Los actinomicetos representan la microflora más común durante esta etapa, reconocidos por su gran capacidad en la creación de antibióticos, además es notorio en partes muy específicas de la pila la formación de hongos que permanecen desde el inicio hasta el final de la fase; los factores que definen el tiempo y la eficiencia en esta etapa, se relacionan con la humedad y la oxigenación del compost. (COOLEMAR, GALLARDO. 2012)

2.5.3 Etapa termófila¹³

En esta etapa los cambios en la temperatura generan que los actinomicetos y bacilos produzcan un cambio en la microflora que presenta el compost, ya que comienza a ser la microflora termófila la predominante. En esta etapa la temperatura puede incrementarse desde los 40° hasta los 70°C, provocando la eliminación de agentes patógenos, hongos, esporas y todos los elementos biológicos no deseados. De las características más importantes de esta etapa, podemos destacar la generación de vapor de agua y CO₂, elementos que son de gran importancia ya que pueden ser letales para el crecimiento de larvas dentro del material, por esto el alargamiento de esta etapa beneficia la higienización presentada en el compost. Al comenzar el desenlace de esta etapa, el agotamiento de nutrientes comienza a generar una disminución notoria en la temperatura y por ende la pérdida de microorganismos termófilos. (COOLEMAR, 2012)

2.5.4 Etapa mesófila II

Esta etapa, por la disminución en los nutrientes y con la muerte de los microorganismos termófilos, comienza nuevamente a aparecer los microorganismos mesófilos; también es conocida como una etapa de estabilización, en la cual estos microorganismos mesófilos comienzan a degradar los elementos más resistentes como la celulosa¹⁴ y la lignina¹⁵. La temperatura comienza a decrecer hasta llegar a temperatura ambiente. Al final de esta etapa se puede considerar el compost en estado biológicamente estable. (COOLEMAR, 2012)

¹² Etapa Mesófila: Etapa intermedia de un proceso, que en términos de temperatura se desarrolla entre los 10°C y los 40°C.

¹³ Termófila: organismos vivos que pueden soportar condiciones extremas de temperatura, por encima de los 45°C.

¹⁴ Celulosa: es la principal componente de las paredes celulares de los árboles y otras plantas.

¹⁵ Lignina: Es el constituyente intercelular incrustante o cementante de las células fibrosas de los vegetales.

2.6 Parámetros a supervisar

Los parámetros que se van a supervisar en este proceso de biotransformación, van ligados directamente con la eficiencia y condiciones de vida de los microorganismos, que durante su ciclo de vida metabolizan el lodo residual para resultar un abono orgánico con bastantes beneficios para el enriquecimiento de nutrientes (fosforo, potasio, magnesio, hierro) en un terreno determinado.

Estos parámetros se monitorean durante todo el proceso de biotransformación, para poder entender en qué etapa se encuentra el proceso, y guiar la toma de decisiones para su mantenimiento. Los parámetros a monitorear son:

1.6.1 pH

El pH del material presente en el proceso de biodegradación influye generalmente sobre la vida y calidad microbiana; aunque muchos de los microorganismos soporten ciertos cambios en este factor, casi la mayoría requiere que se sostenga en valores 6,5 – 7,5, intervalo que nos asegura el mejor desarrollo de la vida microbiana; si se presentan valores inferiores o superiores a los mencionados, se afecta el ambiente óptimo para la degradación del material. (COOLEMAN, 2012)

Un pH superior a 7.5 fomenta la pérdida del nitrógeno mediante volatilización¹⁶ de amoníaco e inhibe el crecimiento de microorganismos, puesto que precipita los nutrientes fundamentales del medio y de este modo no se encuentran disponibles para su aprovechamiento por parte de los microorganismos; un pH inferior a 5.5 también impide este desarrollo. (OSORIO ET AL, 2011).

Para la neutralización del pH se adiciona Piedra Caliza¹⁷, Calcáreo o Carbonato de calcio.

En la siguiente tabla se puede identificar algunas soluciones a las causas que asocia la variabilidad del pH en el proceso:

Tabla 2. Rangos de pH. Fuente: (FAO, 2013; OSORIO ET AL, 2011)

Ph	Descripción	Soluciones
----	-------------	------------

¹⁶Volatilización: es el paso de estado sólido a gaseoso en una sustancia.

¹⁷ Piedra Caliza: carbonato de calcio (CaCO₃).

< 4,5	Exceso de ácidos Orgánicos	Los materiales vegetales como restos de cocina, frutas, liberan muchos ácidos orgánicos y tienden a acidificar el medio.	Adición de material rico en nitrógeno hasta conseguir una adecuada relación C:N(25/1) o adicionar carbonato de calcio/piedra caliza para neutralizar.
Rango ideal (6,5 - 7,5)			
> 8,5	Exceso de Nitrógeno	Cuando hay un exceso de nitrógeno en el material de origen, con una deficiente relación de C:N, asociado a humedad y altas temperaturas se produce amoniaco, alcalinizando el medio	Adición de material más seco y con mayor contenido en carbono (restos de poda, hojas secas, aserrín)

Para conocer cuales materiales son ricos en nitrógeno o en carbono, es conveniente remitirse a la tabla 5 ubicada en la página 24.

2.6.2. Aireación

La aireación es uno de los principales parámetros a monitorear, pues la oxigenación del material es la encargada de propiciar un medio apto para el desarrollo de la vida microbológica aerobia, de lo contrario un déficit en la aireación puede provocar que los microorganismos encargados del proceso de descomposición orgánica, mueran y se comiencen a propiciar fermentaciones y por ende olores ofensivos que no son adecuados para el proceso. Generalmente el porcentaje de oxígeno en el ambiente es de 20%, niveles inferiores a estos influyen negativamente en los procesos aerobios.

Además de proveer oxígeno, la aireación remueve calor, vapor de agua y gases que se acumulan en el compost; en estos términos la tasa requerida para eliminar calor en el compost puede llegar a ser 10 veces mayor que para el suministro de oxígeno, por eso la aireación del compost frecuentemente va ligada a la temperatura que esté presente.(JHORAR, 1991).

Como el proceso que realizan los microorganismos presentes dentro del compost es aerobio, estos requieren grandes cantidades de oxígeno; durante los primeros días de compostaje, fácilmente se pueden degradar componentes dentro de la materia orgánica ya que pueden ser

metabolizados rápidamente. La necesidad para producir calor y oxigenar es mayor en las etapas tempranas, de este modo a medida que pasa a otras etapas esta necesidad disminuye. Si no se mantiene la cantidad suficiente de oxígeno, el proceso de compostaje puede ralentizarse y volverse anaerobio; la concentración mínima de oxígeno que se puede tener en los poros del compost es del 5%. (COOLEMAN, 2012)

La finalidad fundamental de este factor en el compostaje consiste en añadir oxígeno, también posibilita el control de la temperatura del material, el aislamiento de agua y la evacuación de CO₂ junto con otros gases producidos mediante la biodegradación de la materia orgánica. Si existe una aireación deficiente del material, entonces esto ocasionará atraso en el desarrollo de compostaje. (G. TORTOSA, 2011).

x

2.6.3. Temperatura

Este factor depende de la actividad microbiana y de la distribución y pérdida de esta en el sistema. Altas temperaturas contribuyen a eliminar organismos patógenos¹⁸ y parásitos termolábiles¹⁹, pero también puede causar la muerte de organismos favorables para el desarrollo del compostaje.

El compostaje inicia a temperatura ambiente y puede subir hasta los 65°C sin necesidad de ninguna actividad antrópica (calentamiento externo), luego, durante la fase de maduración llega nuevamente a una temperatura ambiente. Es deseable que la temperatura no decaiga demasiado rápido, ya que, a mayor temperatura y tiempo, mayor es la velocidad de descomposición y mayor higienización. (G. TORTOSA, 2011).

Por conveniencia, es importante tener en cuenta ciertos intervalos de temperatura donde los microorganismos son más activos; el proceso de compostaje puede llegar a ser más eficiente cuando la temperatura del compost se presente dentro de los rangos en la etapa mesófila (26°C – 50°C), y en la etapa termófila (40°C – 66°C); mantener temperaturas mesofílicas permiten obtener un buen proceso de compostaje, pero la mayoría de expertos sugieren mantener temperaturas entre (40°C – 70°C). (COOLEMAN, 2012)

El compost muchas veces podrá alcanzar temperaturas de hasta 75°C, debido al calor que se genera por la actividad microbiana. Cuando esta temperatura se alcanza, muchos de los microorganismos mueren, deteniéndose el proceso de transformación; el monitoreo de la temperatura es de gran importancia principalmente cuando las temperaturas comienzan a

¹⁸ Patógeno: todo agente biológico externo que se aloja en un ente biológico determinado.

¹⁹ Termolábiles: que se descompone o se desnaturaliza por el calor, perdiendo generalmente su actividad.

aumentar, cuando el compost comience a generar grandes cantidades de calor se debe aplicar una aireación forzada o el volteo de las pilas²⁰. A medida que la temperatura aumenta, la humedad comienza a disminuir, esto también genera el aumento exponencial de la temperatura. (COOLEMAR, 2012)

2.6.4 Humedad

El agua es un componente fundamental para el desarrollo de la actividad microbiana y un agente significativo en el intercambio gaseoso, puesto que procede como un mecanismo eficiente de regulación térmica y logra transformar la estructura física del material a compostar. El contenido en agua óptimo obedece a las propiedades físicas y de tamaño de partícula, además del tipo de sustrato. (GAJALAKSHMI, ABBASI, 2008).

Se define como contenido de humedad a la cantidad de agua por volumen de lodo (seco) que se encuentra en una cantidad específica. Monitorear es de vital importancia, puesto que el volumen de lodo depende en su mayoría del contenido de humedad. Un lodo primario²¹ tiene del 91 al 95% de humedad, con un valor típico del 94%. En cambio, un lodo secundario²², tiene del 98.5 al 99.5% de humedad, con un valor típico del 99.2%. (J, 2013)

La humedad influye en la manera de transportarse todos los microorganismos que se encuentren en el compost; una humedad bastante alta puede provocar la muerte microbiana gracias a que las gotas de agua hacen que la mayoría de poros por donde el compost transporta su oxígeno se taponen, y un compost con muy baja humedad, genera que los microorganismos no puedan moverse a través del material a degradar. Como inicialmente los lodos que provienen de la PTAR presentan una humedad bastante alta (98%- 99%) es necesario buscar la forma para que dicho factor baje considerablemente hasta un rango de 40 – 60%. Para lograr esto se puede extender el material para que por medio de evaporación del agua se reduzca la cantidad de agua presentada, o de otra manera se puede mezclar con algún material absorbente siempre y cuando la relación carbono- nitrógeno, no genere cambio en la calidad final del compost. (COOLEMAN, 2012)

La siguiente tabla nos indica cual debe ser el rango ideal y los efectos que conlleva el estar por debajo o encima de estos valores:

Tabla 3. Implicaciones en el porcentaje de humedad. Fuente: (COOLEMAR, 2012)

Humedad	Descripción	Soluciones
---------	-------------	------------

²⁰ Volteo de pilas: modificar la posición de las partículas y la totalidad del material de lodo que se está compostando.

²¹ Lodo primario: lodo producido durante el tratamiento primario de las aguas residuales (sedimentación)

²² Lodo secundario: lodo producido durante los procesos biológicos en el tratamiento de aguas residuales.

< 40 %	Humedad Insuficiente	El proceso de compostaje se puede detener por falta de agua a los microorganismos	Se debe regular la humedad adicionando agua al material fresco.
40 % - 60 % Rango Ideal			
> 60 %	Oxígeno Insuficiente	Material muy húmedo, el oxígeno se desplaza por cantidad excesiva de agua; puede dar lugar a zonas de anaerobiosis ²³ .	Volteo de la mezcla y/o adicionar material con bajo contenido de humedad y con alto valor en carbono, como serrines ²⁴ , paja u hojas secas.

Una abundante humedad ocasiona el taponamiento de los poros e impide el intercambio gaseoso y la aportación de oxígeno, si además de estos existe una retención hídrica insuficiente del sustrato, posiblemente causará fenómenos de lixiviación, implicando pérdidas de agua y elementos nutritivos del mismo, así mismo como la necesidad de un control de estos para prevenir la contaminación en zonas cercanas al área del proceso. (G. TORTOSA, 2011)

2.6.5 Relación carbono – nitrógeno C/N

Para un correcto compostaje en el que se aproveche y retenga la mayor parte del carbono y del nitrógeno del sustrato (lodo), la relación C/N del material de partida debe ser la adecuada. Los microorganismos utilizan generalmente entre 25 y 30 partes de carbono por cada una de nitrógeno; por esta razón se considera que el intervalo de C/N teóricamente óptimo para el compostaje de un producto es de 25/1 - 35/1. (JHORAR Y COL, 1991).

La siguiente tabla 4 presenta las implicaciones asociadas a cada intervalo del equilibrio Carbono/Nitrógeno:

²³ Anaerobiosis: Condición de vida de un organismo anaerobio.

²⁴ Serrines: Conjunto de partículas desprendidas de la madera cuando se sierra.

Tabla 4. Rangos de relación Carbono/Nitrógeno (C/N). Fuente: (COLEMAR, 2012).

IntervaloC/N	Interpretación
> 30/1. Alto	Indica que el material orgánico contiene un suministro de carbono bastante alto, lo cual puede llegar a ser inapropiado para la vida microbiana.
25/1 - 30/1. Recomendado.	Indica que la materia orgánica da un buen suministro de N, P, S, disponibles para las plantas y es propio de climas cálidos en suelos bien aireados
20/1 - 25/1. Medio.	Indica que hay un suministro normal de nutrientes por descomposición de la materia orgánica
< 20/1. Bajo.	Indica que el aporte por descomposición de la materia orgánica es muy lento.

Muchas veces, debido al alto contenido de humedad, se deben agregar algunos materiales secos para bajar su cantidad de agua, por lo cual se debe tener presente la relación C/N antes de agregarlos al proceso, esto con la finalidad de no afectar significativamente el equilibrio deseado y de esta manera lograr que el proceso sea lo más eficiente posible.

Para realizar la mezcla del sustrato (lodo) con el material complementario, es importante tener en cuenta la siguiente tabla 5 y determinar cuál de los materiales va a generar un equilibrio del parámetro.

Tabla 5. Equilibrio Carbono/Nitrógeno según materiales: Fuente: Manual para la elaboración del compost: Bases conceptuales y procedimientos.

EQUILIBRIO C/N SEGÚN MATERIALES			
MATERIAL COMPLEMENTARIO	NIVEL ALTO DE N	NIVEL EQUILIBRADO DE C/N	NIVEL ALTO DE C
Orines	1/1		
Estiércol de ave fresco	5-15/1		
Césped fresco	10-15/1		
Leguminosas o restos vegetales frescos	10-20/1		
Restos de cocina	15-25/1		
Estiércol de cerdo	15-16/1		
Estiércol de oveja o caballo con cama de paja		20-30/1	
Estiércol bovino		30-40/1	
Hojas de árboles frutales y arbustos		20-35/1	
Papel y cartón			150-300/1
Caña de maíz			150/1
Paja de cereales			Trigo: 100-130/1 Avena o cebada: 50-60/1
Aserrín			Nivel alto de c 638/1

2.6.6 Capacidad de intercambio catiónico

La CIC o capacidad de intercambio catiónico, es la capacidad del lodo para retener e intercambiar diferentes elementos minerales. Esta capacidad aumenta notablemente con la presencia de materia orgánica; por lo anterior, se puede decir que es la base de fertilidad del suelo.(ARIAS, 2007)

A veces la medición de cada catión es mucho más válida para indicar la fertilidad del compost que la medición de la capacidad de intercambio catiónico, sin embargo, la CIC se evalúa para valorar la fertilidad potencial del compost.(MCKEAN, 1993)

Su importancia: radica en que influye en propiedades físicas (estructura, estabilidad estructural, retención de agua), químicas (acidez, alcalinidad), fertilidad (reposición de nutrientes).(MERCHAN & GOMEZ, 2015)

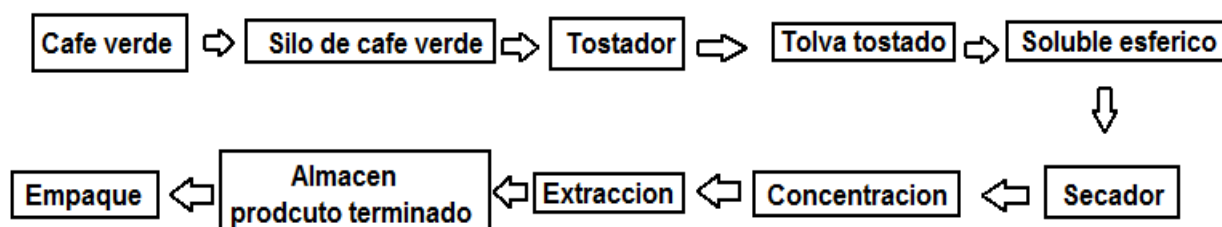
3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Información inicial

Para el desarrollo del proyecto se logró obtener material proveniente de una industria de alimentos de la región especializada en la producción de café soluble, es por esto que el material o lodo residual que es objeto de estudio, es en su mayoría compuesto por material orgánico y agua.

El proceso al que se somete el café en la industria se resume en el siguiente diagrama:

Figura 3. Proceso del café soluble. Fuente:([HTTP://WWW.ESCOFFEE.COM/SOBRE_PROCESO.PHP](http://www.escoffee.com/sobre_proceso.php))



Gracias al proceso productivo los subproductos que se generan en el tratamiento de aguas son de índole orgánica.

El terreno donde realizo el compostaje, requirió un acondicionamiento para el proceso, ya que la superficie no era plana, de esta manera fue necesario construir una plataforma para el montaje de la pila de compostaje.

Se realizó una caracterización inicial al lodo para determinar sus características iniciales y generar así la metodología a seguir (MERCHAN & GOMEZ, 2015). Estos análisis se realizaron para 3 muestras en un laboratorio certificado y los resultados fueron:

Tabla 6. Caracterización fisicoquímica inicial.

PARAMETROS	UNIDADES	VALOR
Conductividad Elect.	S/m	264,80
Humedad	%	79,75

Materia seca	%	20,25
Nitrógeno Total	%	1,91
Proteína Bruta	%	11,28
pH		5,37
Materia Orgánica	%	84,44
Cenizas Totales	%	18,13
Fósforo	%	0,02
Potasio	%	1,19
Calcio	%	0,20
Magnesio	%	0,05
Sodio	%	0,01
Hierro	mg/kg	1553,15
Cobre	mg/kg	39,57
Manganeso	mg/kg	44,46
Zinc	mg/kg	29,78

Con estos resultados se pudo evidenciar el alto valor de humedad que presenta el lodo, por lo que se debe retirar un poco la humedad del material antes de comenzar a armar las pilas. Es por esto que se dejó secar durante dos días; se identificó el estado de humedad apropiado tomando un puñado de material y apretando, este dejaba caer unas cuantas gotas de agua.

Se puede evidenciar que el lodo posee un buen contenido de nitrógeno y un alto porcentaje de material orgánico que debe ser regulado, sin embargo, la presencia de estas cantidades en el material, es una excelente señal de la posibilidad que tiene el material de ser sometido a un proceso de biodegradación y que es corroborada al identificar una relación de Carbono – Nitrógeno (C:N) inicial de 42:1 que será regulada a lo largo del proceso. Igualmente, encontramos un pH que a pesar de poseer un valor relativamente bajo indicando la acidez del material, se sitúa dentro de un intervalo apropiado para comenzar con el proceso.

3.2 Diseño y adecuación del terreno

Para el diseño del experimento se seleccionó el método de pila con volteo manual; tomando como referencia la práctica en el campo en relación al área disponible, es necesario que el terreno en el cual se dispondrá el lodo residual, tenga un área mínima de 3 m² (1 tonelada de material), con el fin de dar espacio al operario para realizar el volteo del lodo. La superficie

sobre la cual se realizará el proceso de compostaje debe ser plana, preferiblemente con una leve inclinación para la recolección de lixiviados, por lo tanto, debe tener ciertos conductos por los cuales correrá el lixiviado que se percola por el lodo.(COOLEMAR, 2012)

El terreno debe ser impermeabilizado con el fin de que los lixiviados que se generen no contaminen el suelo, por eso se puede utilizar una capa plástica o de otro material para su recolección de estos.

Se debe generar un ambiente óptimo en el cual se procesará el compost, por lo que es importante evitar que el lodo se disponga en zonas descubiertas expuestas al sol y la lluvia, lo que pueden alterar las condiciones ambientales del material, además de alterar parámetros esenciales como la humedad, la temperatura y el pH, lo que a su vez puede afectar el ambiente apropiado para que los microorganismos realicen el proceso de biotransformación.(GALLARDO. 2012)

1. Instalación

Entrada de la fracción de material orgánico: A esta fracción de material orgánico que procede de la PTAR se le debe retirar cualquier elemento que pueda afectar en la biotransformación del material, por lo que se eliminan manualmente elementos que no sean biodegradables.

2. De acuerdo a la humedad que posee en el momento de la recepción, definir si es necesario la mezcla con elementos absorbentes, o dejar secar un poco de forma natural.
3. Inspeccionar si la base que sostiene la pila cuenta con recolector de lixiviados, de no ser así es importante realizarlos para evitar cualquier impacto sobre el medio ambiente. Se procede a realizar el montaje de la pila, de acuerdo a las medidas establecidas. Para el montaje del compost se recircularon los lixiviados en los momentos de volteo, ya que todo este quedaba retenido gracias a al plástico que se adecuó sobre la superficie.
4. Monitorear y controlar parámetros durante su ciclo de compostaje.(GALLARDO. 2012)

3.3 Montaje del experimento

De acuerdo a la experiencia obtenida en campo durante el proceso, y de acuerdo a la información anterior, para determinar el tamaño del terreno que se requiere, es necesario relacionar la cantidad de lodo residual que se desea transformar con el área que se va a requerir; para tratar 1000 kg de lodo residual se requiere un área mínima 3 m². Se recomienda establecer el montaje en un lugar que contenga una cubierta que evite el humedecimiento del lodo por la lluvia.

Una vez determinada el área que se requiere, se debe impermeabilizar el terreno sobre el cual se va a disponer el lodo residual para su biotransformación, para lo que se recomienda utilizar plástico u algunos geotextiles que eviten el paso del lixiviado al terreno.

Para comenzar con el proceso de compostaje es importante destacar dos parámetros principales que se deben ajustar antes de comenzar; uno es la humedad y el otro es la relación carbono nitrógeno. Para esto es recomendable ajustar los valores teniendo en cuenta la tabla 1 que se presenta en el siguiente punto sobre control de parámetros. (GALLARDO, 2012)

Estos dos parámetros son importantes de medir tanto al principio como al final del proceso, ya que indican el óptimo metabolismo de los microorganismos como también la calidad final que adquiere el compost.

En algunos momentos, cuando la temperatura cae por problemas en la aireación o condiciones inadecuadas que provocan la muerte de los microorganismos, es necesario aplicarle un sustrato que actúa como activador microbiano, este es conocido como miel de purga y puede ayudar en momentos donde el compost presente bajas temperaturas, así servir para aumentar la temperatura y reactivar el proceso.

La temperatura es un parámetro importante que se debe monitorear constantemente, ya que este indica las fases y el comportamiento que presentan los microorganismos en determinado momento, y de esta forma se valora la manera en que se está realizando el proceso. Como también una mejora que necesita el sistema mediante los volteos; inicialmente se realizan volteos de manera periódica para lograr oxigenar de manera óptima el material orgánico, y posteriormente se procede a realizar el volteo cuando la temperatura se encuentra entre (60 – 70°C); para la medición de dicho parámetro se puede utilizar termómetros digitales, midiendo la temperatura en la superficie como también en el centro de la pila.

3.4 Métodos de análisis de muestras

Todos los métodos de análisis de muestras empleados para el desarrollo de este proyecto, están relacionados con la primera fase del proyecto de investigación sobre caracterización de lodos residuales (MERCHÁN Y GÓMEZ, 2015). Para más detalles sobre los procedimientos de caracterización del lodo se remite al lector al mencionado trabajo.

3.4.1 Nitrógeno total

El nitrógeno total de Kjeldhal es descrito como la cantidad de amonio libre y compuestos orgánicos nitrógenos que son transformados a sulfato de amonio, luego de realizarse una digestión de la muestra con ácido sulfúrico junto con un catalizador. Lo anterior busca definir las

condiciones necesarias para realizar la cuantificación total del nitrógeno en muestras de compost, suelos, biosólido u otro material que contenga el elemento en forma orgánica ó inorgánica.

Para el nitrógeno total de Kjeldhal se efectúa una digestión de la muestra para destruir la materia orgánica con ácido sulfúrico, el nitrógeno orgánico se transforma en sales de amonio (NH_4^+) con ayuda de un catalizador. Las muestras pueden contener formas iónicas como los nitratos (NO_3^-) y los nitritos (NO_2^-) para lo cual es necesaria la utilización de ácido salicílico en la digestión para que estos compuestos se conviertan en nitrosalicilatos, los cuales si pueden transformarse en sales de amonio para luego ser destilados en medio fuertemente básico donde se desprende el amonio (NH_3), el cual se captura en una solución de ácido bórico. Posteriormente se determina volumétricamente el NH_3 capturado al titular con ácido sulfúrico (H_2SO_4) o ácido clorhídrico (HCl) de normalidad conocida.(MERCHAN & GOMEZ, 2015).

3.4.2 Capacidad de intercambio catiónico

La CIC o capacidad de intercambio catiónico es la capacidad del suelo para retener e intercambiar diferentes elementos minerales. Esta capacidad aumenta notablemente con la presencia de materia orgánica; por lo anterior, se puede decir que es la base de fertilidad del suelo.

Esta prueba pretende determinar las condiciones para la medición de la capacidad de intercambio catiónico en muestras de biosólidos o suelos, por el método del acetato de amonio 1M a pH 7. Es recomendado para suelos con pH mayor de 5.5.

El método se basa en la saturación de los sitios de intercambio con el ión amonio mediante la aplicación a la muestra de un exceso de acetato de amonio. La concentración normal que se usa asegura una completa saturación de la superficie de intercambio, y como está amortiguada a pH 7.0, se logra mantener un cierto valor de pH. Posteriormente la muestra es lavada con etanol para eliminar o desplazar el exceso de saturante de amonio no intercambiado presente en el suelo y para minimizar la pérdida del amonio adsorbido. El NH_4^+ que ocupa los sitios de cambio es reemplazado luego por Na^+ mediante lavado de la muestra con una solución de cloruro de sodio al 10%.

Finalmente, a la solución extraída se le adiciona formaldehído que reacciona con el cloruro de amonio formado para producir ácido clorhídrico, el cual es valorado por titulación con hidróxido de sodio. (MERCHAN & GOMEZ, 2015).

3.4.3 Carbono orgánico total

Este procedimiento tiene por objeto definir las condiciones para la medición del contenido de carbono orgánico oxidable en muestras de suelo o compost por el método de Walkley y Black modificado (1934), con valoración volumétrica, el cual se basa en la oxidación de la muestra con una solución estándar de dicromato de potasio, utilizando el calor producido por la dilución del ácido sulfúrico concentrado en la solución crómica. Por titulación con solución de sulfato ferroso se establece la cantidad de dicromato que no ha sido reducido por la materia orgánica presente en la muestra. La diferencia entre el dicromato inicial (blanco) y la cantidad que no ha sido reducida corresponde al carbono orgánico oxidado presente en la muestra. (MERCHAN & GOMEZ, 2015).

3.4.4 pH

La determinación del pH está basada en la medida de la actividad de iones hidronio (H^+) en la suspensión suelo - agua, establecida con base en una relación peso - volumen. El pH es definido como el logaritmo negativo en base 10 de la actividad del ion hidronio.

Para medir el pH se usan métodos potenciométricos, los cuales se basan en la comparación entre el potencial eléctrico producido por los iones H^+ en solución y el potencial constante que produce un electrodo de referencia. El pH varía con respecto a la temperatura por lo que es necesario corregir la lectura a la temperatura a la cual esté calibrado el electrodo.

La medición de pH se hace generalmente en una suspensión suelo: agua en relación 1:1, sin embargo, existen otras suspensiones ampliamente utilizadas como son suelo: KCl 1M en relación 1:1 ó suelo: $CaCl_2$ 0.01M en relación 1:2 (MERCHAN & GOMEZ, 2015)

3.4.5 Humedad

En el momento de secar el suelo húmedo hasta un peso constante con una temperatura controlada se especifica el peso de agua eliminada. La disminución del peso a causa del secado es estimada como el peso del agua y el peso del suelo que continúa del secado es utilizado como el peso de las partículas sólidas.

Mediante este método el secado en horno a $105^\circ C$ no cuenta con unos resultados decisivos con materiales que contienen gran porcentaje de agua de hidratación o materia orgánica. Debido a este inconveniente se recomienda secar el suelo en un horno a una temperatura de $60^\circ C$ o en un desecador a temperatura ambiente.

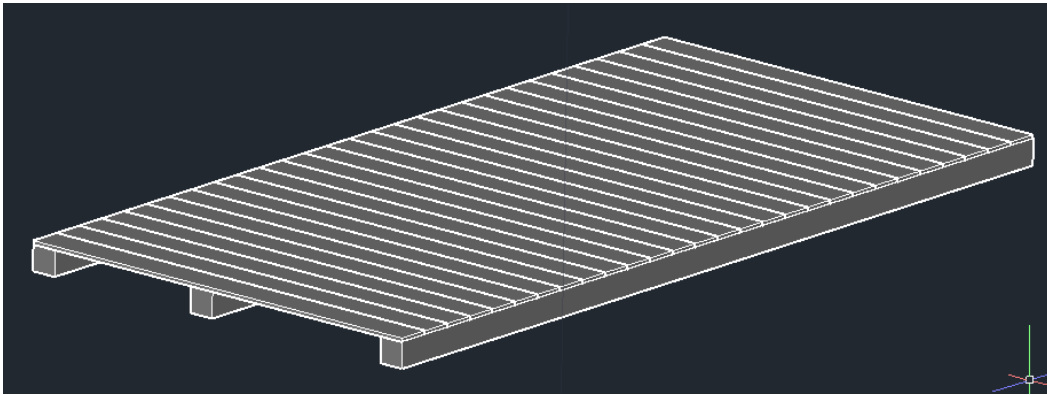
Por otra parte, para muchos tipos de suelo, el volumen de agua es una de las propiedades más relevantes, utilizadas para indicar para establecer la conexión entre el comportamiento de dicho suelo y otras propiedades. Además, el volumen de agua de un suelo se emplea generalmente en las ecuaciones que expresan las relaciones de fase entre aire, agua y sólidos, en un volumen determinado de material. (MERCHAN&GOMEZ, 2015)

5. RESULTADOS

5.1 Diseño y adecuación del terreno

Se diseñó la plataforma de soporte donde fue necesario colocar el material para procesar, la cual se dimensionó de con un área de 6 m² para soportar 1000 Kg. Se utilizó madera para la construcción de este, y se diseñó en AutoCAD un bosquejo para dimensionarlo sobre el área disponible.

Figura 4. Soporte base para el montaje de la pila.



Se adecuó el terreno y la plataforma donde realizó todo el proceso, utilizando plástico como método de retención y de recolección de lixiviados. Las dimensiones de la plataforma fueron de 3 m de largo por 2 m de ancho, garantizando que al momento de realizar el volteo se tuviera el espacio suficiente.

Figura 5. Montaje del sistema de compost en pila de volteo.



Ya que el material presentó un alto nivel de humedad al inicio (79,75 %), se realizó la mezcla con aserrín para equilibrar la relación C/N y la humedad del material. Se mezcló por cada 3 canecas de lodo 1 caneca de aserrín para disminuir su humedad de 79,75% a 60 %.

De acuerdo a los datos meteorológicos del sector donde se realizó el sistema de compostaje, se pudo determinar que la temperatura promedio durante la noche fue de 16 °C mientras que durante el día se alcanzó los 27°C, en algunos momentos de sol se alcanzó temperaturas de 30°C ya que se ubicó la pila de material en un invernadero.

Figura 6. Mezcla de lodo residual y aserrín para obtención de un óptimo equilibrio C/N y nivel de humedad.



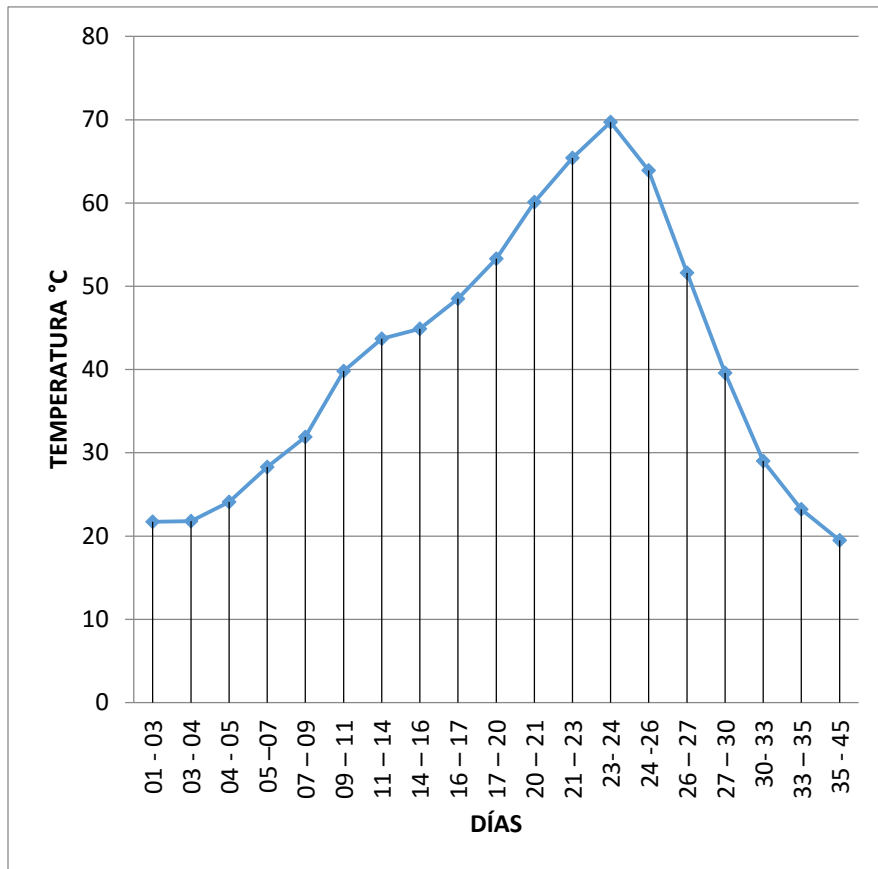
Desde el primer día que se armó la pila se comenzó a controlar el parámetro de temperatura para analizar cómo es su comportamiento durante los días de experimentación, y determinar en qué etapa del proceso éste se encontraba.

A continuación, se presenta la tabla 7 que consolida los resultados de temperatura obtenidos durante todo el proceso de compostaje junto a sus gráficos asociados que evidencian de manera más clara la evolución de la materia prima y sus diferentes fases de compostaje.

Tabla 7. Datos experimentales de temperatura durante el proceso de compostaje del lodo.

RANGO NÚMERO DE DIAS	TEMPERATURA (°C)
1 - 3	21,7
3 - 4	21,8
4 - 5	24,1
5 - 7	28,3
7 - 9	31,9
9 - 11	39,8
11 - 14	43,7
14 - 16	44,9
16 - 17	48,5
17 - 20	53,3
20 - 21	60,1
21 - 23	65,4
23- 24	69,7
24 -26	63,9
26 - 27	51,6
27 - 30	39,6
30- 33	29
33 - 35	23,2
35 - 45	19,5

Figura 7. Gráfico asociado a la Tabla 7 - Temperatura contra rango de número de días



La figura4 presenta la evolución que tuvo el material durante todo el proceso, evidenciando cada una de sus etapas.

Se puede apreciar una etapa de inicial que se sitúa sobre los 20°C en los 4 primeros días, esto se debe a que el lodo residual sale del tratamiento de la PTAR con una temperatura que fluctúa entre los 20°C y los 30°C. Esta muestra, tenía una temperatura de 21°C.

A partir del tercer muestreo se apreció un aumento sobre la temperatura, esto debido a un volteo previo realizado, lo cual aumentó la presencia de oxígeno en el material y redujo el nivel de humedad en el mismo, permitiendo a los microorganismos degradar la materia con mayor facilidad.

A partir de ese primer momento en el que la temperatura del sistema aumentó se dio como iniciada la etapa mesófila, en la cual se desarrolló al interior de la pila la aparición hongos filamentosos de color blanco, los cuales, hacia el fin de esta etapa, se multiplicaron hasta aparecer en las capas exteriores del lodo como lo muestra el siguiente mosaico:

Figura 8. Hongos filamentosos que crecen en el material, aumento en la población microbiana.
Fuente: Propia



Al término de la etapa mesófila, se desarrolló una colonia de hongos color amarillo característicos de la etapa termófila, los cuales, al igual que los hongos desarrollados en la etapa mesófila, colaboran en la transformación del lodo.

Figura 9. Hongos presentes en el cambio de fases del compostaje.



La etapa termófila evidenciaba la expulsión de gases metano, amoníaco, dióxido de carbono y vapor de agua principalmente, en el transcurso del experimento. Cabe resaltar, que, si en el sistema predomina el olor a metano, es indicador de que el material posee gran cantidad de materia orgánica, en cambio, si el olor característico es a amoníaco, indica una presencia importante de Nitrógeno en el tratamiento. En este experimento predominó olores a gas metano,

indicando de manera cualitativa, que el material, en la mayoría de su composición, posee material orgánico.

Durante la fase mesófila número 2 se observó la desaparición en un 90% de los hongos, larvas y demás insectos presentes durante las fases anteriores del tratamiento, esto indicó que el tratamiento concluía de manera correcta, estabilizando el material inicial y obteniendo un compost al final del proceso de biotransformación.

El proceso de compostaje finalizó a una temperatura ambiente cercana a los 20°C, con un olor a tierra y sin presencia de hongos, insectos ni larvas al interior del material.

A continuación, se presenta la tabla comparativa para los resultados obtenidos al principio y al final los dos procesos de caracterización fisicoquímica del material y del experimento en general. (MERCHAN & GOMEZ, 2015).

Tabla 8. Comparación de parámetros fisicoquímicos iniciales (lodo) y finales (compost).

PARAMETROS	UNIDADES	VALOR INICIAL	VALOR FINAL
Conductividad Elect.	S/m	264,80	379,25
Humedad	%	79,75	52,09
Materia seca	%	20,25	47,91
Nitrógeno Total	%	1,91	1,755
Proteína Bruta	%	11,28	
pH		5,37	6,68
Materia Orgánica	%	84,44	
Cenizas Totales	%	18,13	52,7
Fósforo	%	0,02	0,115
Potasio	%	1,19	0,2
Calcio	%	0,20	0,37
Magnesio	%	0,05	0,31
Sodio	%	0,01	0,14
Hierro	mg/kg	1553,15	1625,88
Cobre	mg/kg	39,57	152,68
Manganeso	mg/kg	44,46	244,15
Zinc	mg/kg	29,78	125,855

Los resultados evidencian un cambio en las características del material tales como:

Se encontró que la humedad se redujo manifestando un valor promedio de 52,1%, comparando este valor con el material final no se evidencia exceso de agua, se comprueba que la textura del compost con la humedad existente, presenta unas partículas mucho más sueltas y un mejor manejo del producto

La temperatura logro llegar a los valores necesarios durante la fase termófila, indicando que la actividad microbiana que debía intervenir en ese momento pudo desarrollarse adecuadamente y de la manera esperada, gracias a los tratamientos que se hicieron sobre el material, la regulación de la humedad mediante la aplicación de aserrín al lodo y la adición del sustrato miel de purga como estrategia de activación microbiana fueron claves para el éxito del sistema y es evidenciado en la biotransformación obtenida.

El pH se estabilizo y se encuentra en el rango esperado, ya que, por su cercanía a un valor de 7, demuestra cómo se ha estabilizado dicho parámetro a través del proceso de biotransformación; aunque el pH comienza en un valor bajo cuando se inicia el proceso, este ayuda a que las primeras poblaciones logren incrementar la temperatura del material. Durante los primeros días el pH siempre tendera a bajar un poco en su valor, pero es debido a la actividad microbiana presente en el material

Entendiendo el aumento y/o disminución en los valores de los micro y macro nutrientes del compost, se obtiene que:

Los micronutrientes como el hierro (Fe), importante en la formación de la clorofila, fijación del nitrógeno y en el proceso respiratorio de los vegetales; el manganeso (Mn), que favorece la síntesis de clorofila, la fotosíntesis y la asimilación de nitratos; el cobre (Cu), Importante por sus funciones enzimáticas e interviene en la producción de aminoácidos y en la formación de la clorofila; y el zinc (Zn), que tiene importancia en la formación y maduración de las semillas, en la fotosíntesis y en la asimilación del nitrógeno y posee parte de la responsabilidad en el crecimiento de las plantas; aumentaron significativamente, debido a la adición del activador microbiano (Miel de purga), el cual posee en su composición química, elevados valores de hierro, cobre, fosforo, manganeso, calcio, magnesio, zinc y cenizas totales, que al momento de aplicarlo al material en la etapa inicial del proceso con el objeto de acelerar el proceso de descomposición, fueron también aportados dichos nutrientes favoreciendo las características del compost

Al igual que en los micronutrientes, el aumento en los valores de los macronutrientes como el fosforo (P), el cual tiene su participación en la maduración de flores, semillas y frutos e interviene en la formación y desarrollo de las raíces; el calcio (Ca), que es importante en la formación de las paredes celulares de las plantas; y magnesio (Mg) que forma parte de la clorofila y actúa en el metabolismo del fosforo; fue debido a la adición del activador microbiano en la fase inicial del proceso.

Tanto el agua que tomamos a diario, como aquella obtenida de la lluvia o fuentes de naturales, posee entre sus componentes pequeñas pero importantes cantidades de sodio (auxiliar en el metabolismo y la síntesis de clorofila en las plantas), por lo cual puede atribuirse el incremento en la cantidad final de este macronutriente en el material, a la adición del agua como parte de la solución que funcionaría como activador microbiano (Agua + Miel de purga).

La miel purga también explica el aumento en la cantidad de cenizas totales del material ya que la solución cuenta con la presencia de cenizas totales en un 16% de su composición aportando de igual manera esta cantidad al compost.

A diferencia de los demás nutrientes, el nitrógeno (N), que fomenta el crecimiento del tallo y las hojas y el potasio (K), relevante en el desarrollo de raíces, tallo, hojas y frutos y a demás colabora en la circulación de los otros nutrientes alrededor de la planta regulando las funciones del vegetal; presentaron una disminución en la cantidad preexistente en el material debido al proceso de lixiviación el cual es uno de los principales motivos de pérdida de estos dos elementos en cultivos y procesos de compost, esto supone una baja en los beneficios del producto sin embargo puede ser corregido controlando la humedad del material manteniéndola en un valor bajo (35% - 45%) con respecto al intervalo sugerido, o con la implementación de compuestos y/o materiales ricos en estos dos elementos como cascara de coco, hojas secas, excremento de herbívoros o legumbres para el nitrógeno y algas, hierbas aromáticas, plátano, zanahoria, garbanzos, entre otros, para el potasio.

El proceso de compostaje mejoro los valores de conductividad eléctrica presentando un resultado significativo en la calidad del compost, ya que este optimo valor obtenido indica que el producto del tratamiento realizado, cuenta tanto con una cantidad nutritiva muy importante para las plantas, como con la capacidad necesaria para permitir que las estas asimilen dichos nutrientes.

6. PROYECCIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A UNA A ESCALA INDUSTRIAL

A la hora de realizar un proceso de compostaje a escala industrial se deben de tener en cuenta los siguientes factores:

7.1 Lugar donde se va a realizar el compost:

Si la empresa decide realizar el proceso de compostaje en un área propia cerca de su actividad productiva, va a presentar costos muy bajos, ya que no se va a requerir alquilar ni comprar algún terreno para realizar el proceso de compostaje, es por esto que anteriormente se había mencionado el requerimiento de área por cantidad de material a procesar. Si la empresa decide adquirir o alquilar algún lote, se recomienda que este sea lo más cercano a su actividad productiva, de esta manera puede llegar a ahorrar costos en transporte y en monitoreo; el costo del terreno puede variar de acuerdo a las condiciones y a la ubicación que se desee.

7.2 Transporte requerido para el traslado de los lodos:

Si la empresa cuenta con el área disponible en sus instalaciones, el transporte va a ser mínimo, ya que, al momento de generarse el residuo, este puede ser trasladado al lugar fácilmente. Por esto se debe tener como mínimo unas carretas (buggies) para cargar el material. Si la empresa requiere trasladar los lodos residuales a un lote donde se pueda realizar el proceso de compost al no poseer el área para procesar el material, la empresa se ve obligada a trasladar todo el material hasta una zona determinada, es por esto que se debe de tener en cuenta el alquiler del vehículo en caso de no poseerlo, tener en cuenta el consumo partiendo de que en promedio es de 6.5 km /litro de ACPM para la mayoría de camiones, esto indica que debe ser calculado con base a la moneda a emplear y al precio actual del combustible en la región.

7.3 Tipo de operación a realizar:

Se puede operar de manera manual con ayuda de una pala, pero este método requiere grandes periodos de tiempo además del número de operarios de acuerdo a la cantidad de material a procesar; se recomienda la ayuda mecánica para voltear de manera rápida todo el material, se debe partir de que una hora de alquiler de un buldócer ronda los \$80.000.

7.1 Costo y evaluación económicas

Partiendo de que la empresa generadora debe pagar \$ 500.000 en promedio por cada tonelada de residuo para su disposición final, con la empresa prestadora del servicio de aseo, los costos que se le generan a la empresa por estos residuos están en un valor de \$ 2.000.000 al mes, sin contar el proceso de secado y estabilización que se realiza en cada una de ellas, presentamos un modelo

económico de cómo se estarían beneficiando estas empresas por realizar el proceso de compostaje para estos residuos.

Se puede establecer algunos rangos en los costos que conlleva el proceso de compostaje para algunas generadoras de lodos residuales:

Tabla 9. Costos de operación y de transporte

Transporte (\$)		Costo de operación	
Área en el lugar de generación	En lote o alquiler	Manual	Mecánica
presenta costos muy bajos por el mínimo desplazamiento que tiene el material	6.5 Km /Litro, el valor por cada litro consumido está entre (\$1.350 a \$2.000) puede variar.	El costo de este tipo de operación puede estar comprendido ente (\$200.000/4 Horas). Varía de acuerdo al número de operarios contratados, puede presentarse costos muy altos por el tiempo que requiere el volteo de las pilas manualmente.	Para este tipo de operación se requiere de maquinaria mecánica. Para un buldócer tamaño pequeño se estimó un valor de \$80.000/ 1 Hora.

Si la empresa genera 40 Ton/mes, tiene un área disponible en el lugar de generación y tiene posibilidad de realizar la operación de forma mecánica los costos que genera el proceso de compostaje pueden redondear los \$ 2.000.000, el mismo valor que genera realizarles disposición final en relleno sanitario cada mes. La empresa puede decidir si utilizar este compost para sus propios cultivos, o puede comercializar un producto adicional para generar ingresos adicionales.

De acuerdo a este breve análisis económico de una pequeña empresa generadora de este tipo de lodos residuales, se logró determinar que una empresa podrá pasar de tener el gasto mensual de \$2.000.000 por manejo y disposición final de estos, a tener ganancias de valores superiores a \$ 80.000.000 si desea crear un producto a base de abono orgánico para la venta a terceros, empleando valores de venta aproximados a \$8.000 / Kilo de abono orgánico; o podrá tener un ahorro bastante significativo si la empresa desea aplicar este abono a sus propios cultivos.

7. CONCLUSIONES

- ✓ Los resultados permiten concluir que el tratamiento desarrollado fue exitoso valorando en esta calificación la obtención de un producto con buenas características físicas y con un importante contenido nutricional para cultivos, la valorización de un residuo inicialmente inútil y que generaba un costo significativo de transporte y disposición, y más importante aún se minimizó el impacto ambiental generado por una empresa reduciendo la problemática ambiental referida a la gran generación de residuos sólidos que actualmente enfrenta el país.

- ✓ La implementación del compostaje como alternativa de valorización de lodos residuales provenientes de una PTAR de una industria alimentaria, resulta adecuada y efectiva, siempre y cuando, por un lado, no exista en el material presencia de metales pesados ni una elevada concentración de agentes químicos y por el otro, cuente con una correcta adecuación previa, con el manejo y la supervisión necesaria y con la implementación oportuna de elementos que el sistema requiera durante el proceso.

- ✓ Gracias a la revisión teórica desarrollada para la ejecución del proyecto, se pudo entender el funcionamiento y los requerimientos de los dos sistemas (Cerrado y abierto) lo que permitió definir como el más ajustado a las necesidades y facilidades iniciales, el sistema de pilas que corresponde a un sistema abierto.

- ✓ Los procesos de compostaje no son sistemas que operan de igual manera en todos los casos ya que la materia prima a usar no siempre será la misma ni se encontrará en óptimas condiciones, por lo que un proceso de compostaje debe incluir previamente un análisis fisicoquímico riguroso que permita identificar las potencialidades, limitantes y condiciones de manejo del sistema.

- ✓ El tratamiento de lodos residuales por medio del compostaje, es económica y técnicamente viable, ya que, si la empresa desea implementar el abono obtenido en su proceso productivo, aplicándolo sobre sus propios cultivos, podrá obtener un ahorro en la fertilización de ciertas áreas, además del costo ahorrado por disposición final que debe pagar a la empresa de aseo que presta este servicio. Por otro lado, si la empresa toma la decisión de comercializar el abono obtenido podrá obtener las ganancias por la venta de este y así disminuiría también los costos por disposición final del lodo residual.

- ✓ Los lodos residuales generados por las PTAR de las industrias de Caldas actualmente no cuentan con una disposición final ambientalmente sostenible, convirtiéndose en una oportunidad para desarrollar e implementar nuevas soluciones sobre esta problemática ambiental que tanto impacta al departamento y a Colombia en general por ser un país con una actividad económica principalmente agropecuaria.

8. REFERENCIAS

Luis C., F. G. (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos*.

Jaramillo, D. F. (2002), *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Pág. 361.
<http://www.bdigital.unal.edu.co/2242/1/70060838.2002.pdf>

Jhorar, B.S.; Phogat, V., Malik E. (1991). Kinetics of composting rice straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment.

Márquez. (2010). D. B. Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje.
<http://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf>

Eddy, M. (1981). Tratamiento y depuración de las aguas residuales, Ingeniería Sanitaria, Laboratorio de suelo (2a Edición ed.). Barcelona: Labor S.A.

J, L. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?

Arias, A. (2007). Suelos tropicales. San José, Costa Rica: Ed. UNED.

Ecohortum.(2013). Huerto en Casa: el pH óptimo en suelo. Obtenido de
<http://ecohortum.com/huerto-en-casa-el-ph-optimo-en-suelo/>

Cerón, A. ((s.f) Pág 44). Manual internacional de fertilidad de suelos. Obtenido de Instituto de la Potasa y el Fósforo AC INPOFOS:
https://www.academia.edu/7145740/porque_se_deben_encalar_los_suelos_acidos

Colemar, Gallardo.(2012), Manejo integral de residuos sólidos urbano.

Mihelcic y Zimmerman. (2011). Ingeniería ambiental, Fundamentos, Sustentabilidad, Diseño. Alfaomega Grupo Editor.

Colemar y Gallardo. (2007). Tratamiento y gestión de residuos Sólidos.

Vanegas V., Moreno J., García C., León, Hernández T., (2006). Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust. Waste Management. 07(27), 1317–1327

Verdonck, O. (1987). Compost from organic waste materials as substitutes for the usual horticultural substrates biological. Wastes 26, 325-330

Moreno J., “Compostaje”, Ediciones Mundi-Empresa: Madrid, 2008, Capítulo 5: Microbiología y bioquímica del proceso de compostaje

Golueke, C.G., Díaz L.F., (1990). Understanding the basics of composting. Biocycle

Gajalakshmina, S., Abbasi, S. A., (2008). Solid waste management by composting: state of the art. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 38, 311-400.

Heredia S. (2008). Degradación del almidón mediante la amilasa saliva. Revista Eureka, Vol. 5(1), pp 104-106.

Epstein E., The Science of Composting., CRC Press, EE.UU, 1997, Chapter 3: Microbiology and Chapter 4: Biochemistry.

Miller, F.C., (1992). Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. En: Metting, F.B., Jr. (Ed.), Soil Microbial Ecology, Applications in Agricultural and Environmental Management. Marcel Dekker, Inc., New York, pp.

Stentiford, E.I., (1993). Diversity of composting systems. En: Science and Engineering of Composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects. Eds.: Harry A. J. Hoitink and Harold M. Keener. Renaissance Publications. Ohio, pp.