



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE LOMBRICOMPOST A PARTIR DE LA ESTABILIZACIÓN Y
SECADO DE LODOS RESIDUALES CON ÓXIDO DE CALCIO Y LA ADICIÓN DE NINFAS
PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA ASOCIACIÓN AMIGOS
DEL LAGO UBICADA EN SANTA CATARINA PALOPÓ, SOLOLÁ, GUATEMALA**

Gino Vittorio Aresti Alvarado

Asesorado por el Ing. Marco Vinicio Carballo García

Guatemala, octubre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE LOMBRICOMPOST A PARTIR DE LA ESTABILIZACIÓN Y
SECADO DE LODOS RESIDUALES CON ÓXIDO DE CALCIO Y LA ADICIÓN DE NINFAS
PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA ASOCIACIÓN AMIGOS
DEL LAGO UBICADA EN SANTA CATARINA PALOPÓ, SOLOLÁ, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

GINO VITTORIO ARESTI ALVARADO
ASESORADO POR EL ING. MARCO VINICIO CARBALLO GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

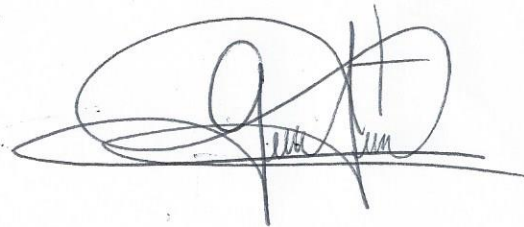
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Pablo Enrique Morales Paniagua
EXAMINADORA	Inga. Eva Leonor Dubón Nájera
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE LOMBRICOMPOST A PARTIR DE LA ESTABILIZACIÓN Y SECADO DE LODOS RESIDUALES CON ÓXIDO DE CALCIO Y LA ADICIÓN DE NINFAS PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA ASOCIACIÓN AMIGOS DEL LAGO UBICADA EN SANTA CATARINA PALOPÓ, SOLOLÁ, GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 25 de julio de 2017.

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the bottom.

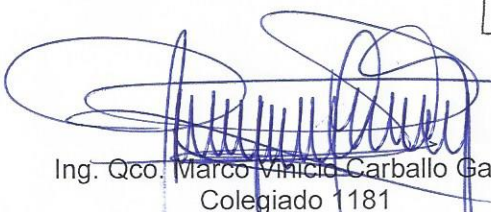
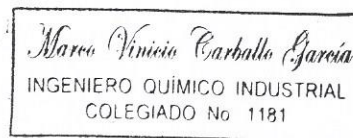
Gino Vittorio Aresti Alvarado

Guatemala 3 de julio de 2019

Sr. Ing. Williams Alvarez
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Por medio de la presente hago de su conocimiento que el estudiante **Gino Vittorio Aresti Alvarado** que se identifica con carné No. **201212884** y CUI **2144 34567 0101** de la Facultad de Ingeniería, USAC, de la carrera de Ingeniería Química ha finalizado el trabajo de graduación correspondiente a un tema de investigación otorgado por la empresa Cementos Progreso denominado **“EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE LOMBRICOMPOST A PARTIR DE LA ESTABILIZACIÓN Y SECADO DE LODOS RESIDUALES CON ÓXIDO DE CALCIO Y LA ADICIÓN DE NINFAS PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA ASOCIACIÓN AMIGOS DEL LAGO UBICADA EN SANTA CATARINA PALOPÓ, SOLOLÁ, GUATEMALA”**, habiendo sido revisado y aprobado en presencia de mi persona.

Sin otro particular:



Ing. Qco. Marco Vinicio Carballo García
Colegiado 1181
Gerente de Investigación y Desarrollo Cal y Pulverizados
Centro de Investigación y Desarrollo
Cementos Progreso



CENTRO DE
INVESTIGACIÓN & DESARROLLO
Cementos Progreso, S. A.



Guatemala, 25 de julio de 2019.
Ref. EIQ.TG-IF.028.2019.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez Mejía:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **006-2017** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-**

Solicitado por el estudiante universitario: **Gino Vittorio Aresti Alvarado**.
Identificado con número de carné: **2144 34567 0101**.
Identificado con registro académico: **201212884**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:


EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE LOMBRICOMPOST A PARTIR DE LA ESTABILIZACIÓN Y SECADO DE LODOS RESIDUALES CON ÓXIDO DE CALCIO Y LA ADICIÓN DE NINFAS PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA ASOCIACIÓN AMIGOS DEL LAGO UBICADA EN SANTA CATARINA PALOPÓ, SOLOLÁ, GUATEMALA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el profesional: **Marco Vinicio Carballo García**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.



"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Jaime Domingo Carranza González
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.057.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación, de la carrera de Ingeniería Química, del estudiante, **GINO VITTORIO ARESTI ALVARADO** titulado: **“EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE LOMBRICOMPOST A PARTIR DE LA ESTABILIZACIÓN Y SECADO DE LODOS RESIDUALES CON ÓXIDO DE CALCIO Y LA ADICIÓN DE NINFAS PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA ASOCIACIÓN AMIGOS DEL LAGO UBICADA EN SANTA CATARINA PALOPÓ, SOLOLÁ, GUATEMALA”**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Williams G. Álvarez Mejía, M.I.Q., M.U.I.E
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre de 2019

Cc: Archivo
WGAM/ale



La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA ELABORACIÓN DE LOMBRICOMPOST A PARTIR DE LA ESTABILIZACIÓN Y SECADO DE LODOS RESIDUALES CON ÓXIDO DE CALCIO Y LA ADICIÓN DE NINFAS PROVENIENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA ASOCIACIÓN AMIGOS DEL LAGO UBICADA EN SANTA CATARINA PALOPÓ, SOLOLÁ, GUATEMALA,** presentado por el estudiante universitario: **Gino Vittorio Aresti Alvarado,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, Octubre de 2019

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mi soporte, auxilio durante el trayecto de mi carrera y en todo lo que acontece en mi vida.
Mis padres	Italo Aresti y Rosa Alvarado, por su apoyo incondicional.
Marilyn Castillo	Por haberme permitido ser acompañado durante gran parte de mi carrera, siendo de gran influencia.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis padres

Por el apoyo durante toda la etapa académica de mi carrera.

Familia Castillo Mayen

Por su apoyo incondicional por la importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.

Cementos Progreso

Por la oportunidad de ejecutar un proyecto de impacto social y ambiental; además por la asesoría y apoyo económico.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Estabilización alcalina para el control de patógenos de lodos residuales.....	1
1.2. Efecto de la adición de cal en los microorganismos en los lodos.....	1
1.3. Estabilización de lodos utilizando lombricultura.....	2
1.4. Generación de compost a partir de la ninfa acuática del lago de Amatitlán.....	2
1.5. Posibilidad de utilizar el jacinto de agua para la elaboración de abono.....	2
1.6. Utilización de Eichhornia Crassipes (jacintos acuáticos) para la remoción de nitratos y fosfatos de un efluente tratado biológicamente	3
1.7. Preparación de sustrato para pie de cría Eisenia Foetida L	3
2. DISEÑO METODOLÓGICO	5
2.1. Delimitación.....	5

2.2.	Metodología de elaboración del lombricompost	5
2.3.	Variables	8
2.4.	Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos, lodos estabilizados, ninfas y lombricompost	10
2.5.	Recursos humanos disponibles	10
2.6.	Cristalería y equipo	10
2.7.	Técnica cuantitativa o cualitativa	12
2.8.	Recolección y ordenamiento de la información	12
2.9.	Técnica de muestreo	13
2.10.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	15
2.11.	Análisis estadístico	17
2.11.1.	Cálculo de promedio por corrida	17
2.11.2.	Cálculo de desviación estándar	17
2.11.3.	Balance de masa por componente	18
3.	RESULTADOS	19
4.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	23
5.	MARCO TEÓRICO	27
5.1.	Santa Catarina Palopó, Sololá, Guatemala	27
5.1.1.	Descripción del municipio de Santa Catarina Palopó	27
5.1.2.	Planta de tratamiento en el municipio de Santa Catarina Palopó	27
5.2.	Procesos de tratamiento de aguas residuales	28
5.3.	Tratamientos biológicos en medio suspendido	31
5.3.1.	Pretratamiento de lodos activados	32

5.3.2.	Tratamiento primario.....	32
5.3.2.1.	Aireación con difusores	32
5.3.3.	Tratamiento secundario	32
5.3.3.1.	Método aireación convencional	33
5.3.4.	Tratamiento terciario / fitodepuración	33
5.3.4.1.	Definición de fitodepuración.....	34
5.3.4.2.	Sistema de tratamiento basado en macrófitas de hojas flotantes	34
5.3.4.3.	Descripción de la macrófita Eichhornia crassipes.....	34
5.3.4.4.	Procedencia de la macrófita Eichhornia crassipes.....	35
5.3.4.5.	Características de la macrófita Eichhornia crassipes.....	35
5.4.	Tratamiento primario de lodos residuales.....	36
5.4.1.	Acondicionamiento	36
5.4.2.	Espesado.....	36
5.4.3.	Deshidratación.....	36
5.4.4.	Secado térmico.....	37
5.4.5.	Estabilización con cal	37
5.4.5.1.	Pretratamiento con cal.....	37
5.4.5.2.	Postratamiento con cal	38
5.5.	Óxido de calcio (cal viva).....	38
5.5.1.	Obtención de la piedra caliza.....	38
5.5.1.1.	Preparación de la piedra caliza.....	39
5.5.1.2.	Calcinación de la piedra caliza	39
5.5.1.3.	Principales usos del óxido de calcio	39
5.6.	Tratamiento secundario de lodos residuales	42
5.6.1.	Digestión aerobia.....	42

5.6.2.	Digestión anaerobia	43
5.6.3.	Secado térmico	43
5.6.4.	Incineración	43
5.6.5.	Compostaje	44
5.6.5.1.	Hileras volteadas tradicionales.....	44
5.6.5.2.	Pila estática aireada	44
5.6.5.3.	Lombricomposteo.....	44
5.6.5.4.	Definición del lombricomposteo.....	45
5.6.5.5.	Organismos implicados en el lombricompost	45
5.6.5.6.	Factores que afectan el proceso de lombricomposteo	46
5.6.5.7.	Naturaleza y acondicionamiento de los residuos orgánicos o materiales de partida	46
5.6.5.8.	Humedad.....	47
5.6.5.9.	Temperatura.....	47
5.6.5.10.	Aireación	48
5.6.5.11.	Densidad de población.....	48
5.6.5.12.	Lombricomposteo y microorganismos patógenos	49
5.7.	Legislación ambiental respecto la disposición de los lodos.....	49
5.8.	Métodos para el análisis de los parámetros físicos y químicos de los lodos, ninfas, lodos estabilizados y lombricompost.....	51
5.8.1.	Potencial de hidrógeno: (Método potenciométrico (Willard & Bates))	51
5.8.2.	Porcentaje de humedad: (método gravimétrico a 104 °C)	51

5.8.3.	Porcentaje de carbono: (M.O - Walkley Black)	52
5.8.4.	Porcentaje de nitrógeno: (Micro-Kjeldahl).....	52
5.8.5.	Metales pesados: (EPA 3051 A).....	52
5.8.6.	Salmonella: (SMWW 9260 B)	53
5.8.7.	Helmintos: (Formalin-Ethyl Acetate Sedimentation Concentration. Lynne S. Garcia & David. A. Bruckne).....	53
CONCLUSIONES		55
RECOMENDACIONES		59
BIBLIOGRAFÍA		61
ANEXOS		67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Recolección y ordenamiento de la información para la caracterización del lodo residual de la planta de aguas residuales de Santa Catarina Palopó, Sololá, Guatemala.....	13
2.	Recolección y ordenamiento de la información para la caracterización de la ninfa desechada del tratamiento terciario de la planta de aguas residuales de Santa Catarina Palopó, Sololá, Guatemala.....	14
3.	Recolección y ordenamiento de la información para la caracterización del lodo estabilizado y secado	14
4.	Recolección y ordenamiento de la información para la elaboración de lombricompost de los lodos de la planta de aguas residuales de Santa Catarina Palopó, Sololá, Guatemala.....	15
5.	Elaboración de lombricompost.....	16
6.	Trampa de grasa del pretratamiento en la planta de efluentes de la asociación Amigos del Lago.....	28
7.	Reactor de aireación del primer tratamiento en la planta de efluentes de la Asociación Amigos del Lago	29
8.	Tratamiento secundario en la planta de efluentes de la Asociación Amigos del Lago	29
9.	Tanques fitorremediadores del tratamiento terciario en la planta de efluentes de la Asociación Amigos del Lago	30
10.	Patio de secado del tratamiento primario de los lodos residuales, en la planta de efluentes de la Asociación Amigos del Lago.....	30

11.	Segundo patio de secado del tratamiento primario de los lodos residuales, en la planta de efluentes de la Asociación Amigos del Lago.....	31
12.	Diagrama de un equipo mecanizado del mezclado de cal a lodos	42

TABLAS

I.	Valores fijos	8
II.	Valores independientes	9
III.	Variables dependientes	9
IV.	Materia a tratar.....	10
V.	Cristalería y equipo	11
VI.	Recursos generales	11
VII.	Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos residuales	19
VIII.	Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos estabilizados con óxido de calcio	20
IX.	Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de las ninfas.....	20
X.	Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de la mezcla de lodos estabilizados con óxido de calcio, ninfas y lombrices	21
XI.	Tiempo de procesado de una pila de 7 toneladas	48
XII.	Artículo 42, límites máximos permisibles de lodos.....	50

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Ar	Arsénico
Cd	Cadmio
Cr	Cromo
%p/p	Fracción másica
°C	Grado Celsius
kg	Kilogramo
L	Litro
Hg	Mercurio
N/A	No aplica
N.D	No se determinó
NSO	No se observó
Pb	Plomo
%H	Porcentaje de humedad
pH	Potencial de concentración de hidrógeno
C/N	Relación carbono con respecto al nitrógeno
H	Unidad de tiempo hora

GLOSARIO

Agua residual	Agua de descarga proveniente de uso domiciliar.
Estabilización de lodos	Eliminación de presencia microbiológica en lodos de aguas residuales mediante la adición de óxido de calcio.
Fitorremediación	Tratamiento terciario a partir del secuestro de minerales mediante ninfas acuáticas.
Lodo activado	Tratamiento de agua residual mediante la implementación de microorganismos.
Lombricompost	Degradación de materia orgánica a partir de la depuración con <i>Eisenia Foetida</i> .

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo determinar la posibilidad de tratar los lodos residuales provenientes del tratamiento de aguas grises, mediante lombricomposteo evaluando la factibilidad de la elaboración, homogenizando los lodos residuales previamente estabilizados y secados con óxido de calcio y ninfas provenientes de la planta de tratamiento de efluentes ubicada en Santa Catarina Palopó, Sololá, Guatemala.

Para lo cual, se caracterizaron los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de tres muestras de lodos residuales y tres muestras de ninfas, provenientes de la misma planta de tratamiento; se determinó la presencia de microorganismos patógenos, el potencial de hidrógeno, la relación de carbono respecto del nitrógeno y el porcentaje de humedad. Sin embargo, el parámetro que dicta la factibilidad de la utilización tanto de los lodos residuales como de la ninfa, para la elaboración de un lombricompost y de la disposición final se fundamenta en la presencia de los metales pesados:(arsénico, plomo, cromo, mercurio y cadmio), en función del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

De manera, que si los lodos y las ninfas, presentan una concentración de los metales pesados mencionado por debajo de los parámetros limitados en el acuerdo gubernativo, es posible su disposición para fines definidos en el mismo documento en referencia; se hace constar que tanto las muestras de lodos, lodos estabilizados con óxido de calcio y ninfas cumplieron con el Acuerdo Gubernativo 236-2006; el óxido de calcio dosificado con la cal viva adiciona aniones hidroxilo, lo cual al reaccionar con el plomo reacciona formando un hidróxido de plomo insoluble; en el caso del arsénico por acción floculante del

calcio termina siendo insoluble en la solución; es imperceptible al análisis utilizado para la caracterización de los metales pesados utilizada.

Posteriormente, se procedió a tomar tres muestras de lodos, a las cuales se les agregó un sexto de la masa de óxido de calcio, 1/6 % (p/p), respecto de los lodos residuales, con el propósito de eliminar la presencia de microorganismos patógenos y la alta concentración de agua en los lodos residuales, a partir del aumento de la temperatura y del potencial de hidrógeno. De modo que se realizó el análisis microbiológico presentando ausencia de microorganismos patógenos.

Posteriormente, se agregó una única proporción másica de ninfas un medio de la concentración másica en función de los lodos residuales estabilizados con un medio de masa de óxido de calcio, 1/2 % (p/p); de modo que sea posible recrear las condiciones mediante la reducción del potencial de hidrógeno a una magnitud de entre ocho y nueve unidades de potencial de hidrógeno, para la supervivencia y procreación del espécimen, Eisenia Foetida (lombriz coqueta roja), en la mezcla elaborada.

Debido a que los especímenes no lograron sobrevivir, se da por finalizado la evaluación a causa de la elaboración del lombricompost mediante la dosificación de una única concentración másica de ninfas a las muestras de lodos residuales estabilizados con óxido de calcio.

OBJETIVOS

General

Evaluar la elaboración de lombricompost a partir de la estabilización y el secado de los lodos residuales, y la adición de ninfas provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Asociación Amigos del Lago ubicada en Santa Catarina Palopó, Sololá, Guatemala.

Específicos

1. Caracterizar cuantitativamente la presencia de los metales pesados (arsénico, plomo, mercurio, cadmio y cromo) en muestras de lodos residuales, lodos residuales estabilizados con óxido de calcio y ninfas.
2. Determinar la factibilidad de disponer de los lodos residuales, lodos residuales estabilizados con óxido de calcio y ninfas, en función de la presencia de los parámetros limitantes dictados en el Acuerdo Gubernativo 236-2006.
3. Determinar la presencia de microorganismos patógenos en las muestras de los lodos residuales, lodos estabilizados con óxido de calcio y ninfas.
4. Caracterizar cuantitativamente el potencial de hidrógeno de los lodos residuales, lodos estabilizados con óxido de calcio y las ninfas.

5. Caracterizar cuantitativamente la humedad relativa de los lodos residuales, lodos estabilizados con óxido de calcio y las ninfas.
6. Caracterizar cuantitativamente la relación de carbono respecto el nitrógeno presente en los lodos residuales y las ninfas.
7. Determinar la factibilidad de elaborar un lombricompost a partir de la sobrevivencia y reproducción de los especímenes *Eisenia Foetida* (lombriz coqueta roja), en la mezcla de lodos residuales estabilizados con óxido de calcio y ninfas a una concentración de un medio proporción másica.

HIPÓTESIS

H₀₁: se evaluará la factibilidad de elaborar un lombricompost a partir de la mezcla entre lodos residuales estabilizados con óxido de calcio y ninfas trituradas, con la finalidad de acondicionar el medio y así adicionar el espécimen *Eisenia Foetida* y se lleve a cabo el proceso biológico del mismo.

- Hipótesis nula

H₀₁: no existe diferencia significativa en los parámetros fisicoquímicos (pH, % de humedad y C/N) respecto a los lodos residuales.

H₀₂: no existe diferencia significativa en los parámetros fisicoquímicos (pH, % de humedad y C/N), respecto de las ninfas.

H₀₃: no existe diferencia significativa en los parámetros fisicoquímicos (pH, % de humedad y C/N), respecto del óxido de calcio agregado a los lodos.

H₀₄: no existe diferencia significativa en los parámetros fisicoquímicos (pH, % de humedad y C/N), respecto del lombricompost.

- Hipótesis alternativa

H₁₁: existe diferencia significativa en los parámetros fisicoquímicos (pH, % de humedad y C/N), respecto a los lodos.

H₂: existe diferencia significativa en los parámetros fisicoquímicos (pH, % de humedad y C/N), respecto de las ninfas.

H₃: existe diferencia significativa en los parámetros fisicoquímicos (pH, % de humedad y C/N), respecto del óxido de calcio agregado a los lodos.

H₄: existe diferencia significativa en los parámetros fisicoquímicos (pH, % de humedad y C/N), respecto del lombricompost.

INTRODUCCIÓN

Los lodos residuales producto del tratamiento provenientes del proceso de lodos activados de la planta de tratamiento de efluentes, ubicada en Santa Catarina Palopó, Sololá, Guatemala, son contenidos en un depósito denominado reactor, que tarda alrededor de 3 a 4 semanas en llenarse, para posteriormente ser descargados en un patio de secado donde se ejecuta el tratamiento de secado solar y por medio de deshumidificación. Sin embargo, debido al diseño de la planta y a las condiciones atmosféricas, el tratamiento de secado de los lodos no finaliza en un tiempo menor al llenado del reactor de los lodos residuales, de modo que, al no contar con otro contenedor, son arrojados en los terrenos cercanos a la planta, contaminando de forma indirecta el lado y los mantos friáticos ubicados debajo de la corteza terrestre a 60 metros de profundidad.

La importancia de llevar a cabo este proyecto radica en promover una solución práctica y sostenible en la ejecución del tratamiento de lodos residuales, sin modificar la infraestructura de la planta de tratamiento de agua residual. Para lo cual, el propósito del presente trabajo es evaluar la viabilidad de elaborar un lombricompost, a partir de lodos estabilizados con óxido de calcio, provenientes de la planta de tratamiento de agua residual antes mencionada y su adición de ninfas previamente trituradas provenientes del tratamiento terciario de depuración. De manera que la reacción exotérmica de hidratación del óxido de calcio libera calor, que provoca la reducción del contenido de agua mediante la evaporación de la misma, además de aumentar su potencial de hidrógeno, que provoca la muerte de los microorganismos patógenos contenidos en los lodos a causa de la alta alcalinidad.

Para reducir el potencial de hidrógeno de los lodos estabilizados, se propone la adición de ninfa con la finalidad de recrear las condiciones óptimas de sobrevivencia de las lombrices para llevar a cabo el proceso de lombricomposteo; hasta alcanzar un cincuenta por ciento (50 %) de humedad y un potencial de hidrógeno entre siete (7) y nueve (9) unidades.

Para realizar lo anterior, será necesario evaluar la calidad de los lodos y las ninfas, determinando la presencia de metales pesados y las condiciones físicas, químicas y microbiológicas de los lodos sin tratamiento; además de caracterizar la dosificación óptima de óxido de calcio a agregar a los lodos, en función de la presencia de microorganismos patógenos.

Por lo tanto, el producto final en caso de no contar con la presencia de metales pesados y de microorganismos patógenos, es posible comercializar el lombricompost como abono para el crecimiento de flora, así como de hortalizas cultivadas alrededor del lago de Atitlán, teniendo presente que el costo de la elaboración del lombricomposteo se basa únicamente en la adición del óxido de calcio y los desechos provenientes del proceso de tratamiento de aguas residuales, entre otros.

1. ANTECEDENTES

1.1. Estabilización alcalina para el control de patógenos de lodos residuales

El estudio de la estabilización alcalina con cal, elaborado por el ingeniero químico Juan Manuel Méndez Contreras, es una alternativa de control de patógenos, incluso reconocida por la agencia de protección al medio ambiente de los estados unidos (US EPA,1994) como un proceso capaz de reducir significativamente el contenido de microorganismos y producir biosólidos. En México, la estabilización con cal es utilizada en algunas plantas de tratamiento de agua residual.

La elevación de pH por la adición de óxido de calcio reduce el contenido de patógenos a niveles muy bajos. Además, produce una reacción secundaria la cual da como resultado la generación de hidróxido de amonio el cual a su vez genera amoníaco, el cual es un gas con un olor característico, poco agradable al humano. Por otra parte, se ha demostrado que el amoníaco reduce la viabilidad de los huevos de helmintos en lodos.

El uso de sistemas cerrados para estabilizar lodos con óxido de calcio resuelve los problemas de olores e incrementa la eficiencia del proceso de estabilización que se logra en los sistemas abiertos por la retención del amoníaco producido. En este caso interviene el calor producido por la reacción de hidratación del óxido de calcio, el cual incrementa la temperatura y favorece la desinfección; al incrementar la temperatura, algunos microorganismos como las bacterias, no se adaptan rápidamente al cambio y muere.¹

1.2. Efecto de la adición de cal en los microorganismos en los lodos

“Un estudio del departamento de microbiología de la escuela de medicina en Ohio, Toledo, Estados Unidos, determinó que el aumento de pH, la deshidratación y la producción de amoníaco, genera un habitat inhabitable para los microorganismos, dando como tiempo de acción alrededor de 12 a 24 horas, para la estabilización de los lodos”².

¹ MENDOZA, Francisco José Colomer. *Tratamiento y gestión de residuos sólidos*. p. 136.

² CANO, Manuel. *Preparación de sustrato para pie de cría *Eisena Foetida* L.* p. 58.

1.3. Estabilización de lodos utilizando lombricultura

Una propuesta de la Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira, para el aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa Comestibles la Rosa, departamento de Risaralda, Colombia; desarrolló un método alternativo para la generación de biosólidos, utilizando la lombricultura como medio de estabilización y además se la adición de sustrato, producto del desecho de material orgánico de la propia empresa.

Por lo cual determinaron que la proporción adecuada para la elaboración de lombricomposteo fue de 1:1, de lodo y el sustrato alimenticio para las lombrices. De manera que se concluyó la factibilidad de implementar el lombricomposteo para el tratamiento de los lodos provenientes, además de sus múltiples beneficios como lo son los medios ambientales y los económicos.³

1.4. Generación de compost a partir de la ninfa acuática del lago de Amatlán

La Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Roger Berliér Ríos Perez evaluó la generación de un abono orgánico (compost) de la ninfa acuática del lago de Amatlán, una planta que ha crecido en este cuerpo de agua debido al excedente de nutrientes por la contaminación del agua. Para lo cual se realizaron dos técnicas diferentes: la lombricomposteo (proceso utilizando lombrices) y el Bocashi (proceso utilizando levaduras).

Utilizando diferentes concentraciones de levaduras y se determinará si esta variable influye en la calidad de compost producido. Se determinó que el compost por el sistema Bocashi tiene mejores beneficios en comparación con el sistema lombricomposteo.⁴

1.5. Posibilidad de utilizar el jacinto de agua para la elaboración de abono

La Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala, Elvira Victoria Casasola Aldana estudió la posibilidad de que utilizar el Jacinto de agua (*E. crassipes*) para la elaboración de abono, siendo esta, una de

³ TREJOS VÉLEZ, Mariana; AGUDELO CARDONA, Natalia. *Propuesta para el aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa Comestible La Rosa como alternativa para la generación de biosólidos.* scielo. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000300011. Consulta: 22 de noviembre de 2016.

⁴ QUECHE SETENA, Gabriel. *Página de inicio, Santa Catarina Palopó.* <http://www.santacatarina.palopo.info/index.html>. Consulta: 25 de mayo de 2017.

las especies más estudiadas y utilizadas como depuradoras de aguas residuales, utilizada en el Lago de Amatitlán para evitar la creciente contaminación por su principal afluente el río Villalobos.

De manera que se reduzcan los desechos generados por la planta han sido en su mayoría acumulados o desechados en rellenos sanitarios, por lo cual este estudio evaluó a través de la cuantificación de nutrientes y determinación de contaminantes. A partir del resultado de los análisis de los nutrientes, se determinó que, por la presencia de arsénico en las plantas en cantidades elevadas, no se recomendó la elaboración de abono.⁵

1.6. Utilización de Eichhornia Crassipes (jacintos acuáticos) para la remoción de nitratos y fosfatos de un efluente tratado biológicamente

El estudio tuvo como objetivo la determinación de parámetros de diseños basados en remociones de nitratos y fosfatos por unidad de peso de planta de Eichhornia Crassipes, así como requerimientos de área de terreno para su cultivo. De manera que, se cosechó y pesó el Jacinto acuático, determinándole el potencial de hidrogeno a su respectiva temperatura. Dando como resultado que, a una temperatura promedio de 20,75 °C, el potencial de hidrogeno fue de 7 unidades, removiendo hasta 57,14 % de nitratos y 33,39 % de fosfatos.⁶

1.7. Preparación de sustrato para pie de cría Eisenia Foetida L

El estudio, llevado a cabo por el licenciado Manuel Cano de AMSA, se enfoca en el aprovechamiento de la macrófita que habita en el lago de Amatitlán, Eichhornia crassipes, la cual es una especie que se encuentra en estado híper-eutrófico por la recepción de descargas de vertidos domésticos. De modo que, la transformación de la macrófita es posible su utilización como sustrato para pie de cría de la lombriz de tierra.

Para lo cual, se debe secar la macrófita hasta obtener un porcentaje de humedad entre 50 y 60; esto evita condiciones anóxicas que da como resultado un sustrato tóxico para la lombriz, provocado por la descomposición anaeróbica. Otro aspecto recomendado es eliminación de la raíz, con el fin de eliminar el transporte de metales, contenidos en el sistema radicular.

⁵ ALDANA CASASOLA, Elvira Victoria. *Cuantificación de nutrientes (calcio, cobre, fósforo, hierro, magnesio, manganeso, nitrógeno, potasio, sulfato, zinc) y determinación de contaminantes (arsénico, mercurio, plomo, cadmio) en el Jacinto de agua (eichhornia crassipes) del lago de Amatitlán para uso en abono orgánico.* p. 36.

⁶ ALVARADO CUADRA, Lydiester. *Utilización de Eichhornia Crassipes (jacintos acuáticos) para la remoción de nitratos y fosfatos de un efluente tratado biológicamente.* p. 48.

Posteriormente al proceso de secado, es necesario triturar la macrófita, para luego ser introducido en recipiente que contiene agua, por un periodo de 15 días; lo cual, permite la fermentación de la materia y adecuación del sustrato.⁷

⁷ CANO, Manuel. *Preparación de sustrato para pie de cría Eisena Foetida L.* p. 24.

2. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1. Delimitación

El presente estudio se desarrollará en la planta de tratamiento de agua residual ubicada en Santa Catarina, Palopó, Sololá, Guatemala. enfocará en el tratamiento de lodos a partir de la estabilización y el secado, por medio de la adición de óxido de calcio, en la dosificación de un sexto relación másica 1/6 %p/p, respecto de la masa de los lodos, y luego en la elaboración de lombricompost, a partir de los lodos estabilizados y la adición de ninfas reduzca el potencial de hidrógeno a ocho, además de ser un sustrato para el espécimen Eisenia Foetida (lombriz coqueta roja).

Para lo cual, será necesario caracterizar los lodos residuales, los lodos estabilizados, las ninfas y el lombricompost; a partir de los siguientes parámetros: presencia de metales pesados, presencia de microorganismos patógenos, contenido de humedad, potencial de hidrógeno y la relación de carbono respecto del nitrógeno (C/N).

2.2. Metodología de elaboración del lombricompost

- Drenar los lodos producto del tratamiento de agua residual del reactor hacia el patio de secado.
- Tomar tres muestras de lodos residuales y ninfas de una libra.

- Analizar en el laboratorio los grupos del parámetro fisicoquímico y microbiológico.
- Tomar la decisión de utilizar los lodos residuales y las ninfas para el lombricomposteo, en función de la presencia de metales pesados.
- En caso de presentar presencia de algún metal pesado por sobre los estándares fijados en el Acuerdo Gubernativo 236-2006, disponer de los residuos en un relleno sanitario y en el área de confinamiento.
- En caso de que no presente metales pesados se encuentra por debajo de los estándares fijados en el acuerdo gubernativo 236-2006, proceder con la estabilización de los lodos residuales con la adición de un sexto de óxido de calcio con respecto a la masa de los lodos residuales.
- Tomar 3 muestras de lodos residuales de 1 libra.
- En función de la masa de los lodos residuales, agregar un sexto de la masa de óxido de calcio (0,166 libras) directamente a los lodos residuales, homogenizándolo manualmente.
- Mezclar manualmente los lodos residuales en conjunto con el óxido de calcio, hasta homogenizar la mezcla.
- Esperar 48 horas después de haberse agregado el óxido de calcio a los lodos residuales.
- Tomar con la mano una porción de lodo estabilizado y secado y presionarlo.

- Contar las gotas que derrama la porción de lodo estabilizado y secado para verificar la humedad contenida.
- Triturar los restos de las ninfas desechadas del tratamiento terciario de la planta, hasta tener 2 milímetros de longitud como máximo.
- En función de la masa de los lodos estabilizados y secados, agregar un medio de la masa (0,66 libras) de ninfa triturada a los lodos estabilizados y secados.
- Agregar hojas secas a la mezcla de lodos estabilizados y ninfa triturada.
- Homogenizar manualmente los lodos estabilizados y secados en conjunto con la ninfa triturada.
- Tomar con la mano una porción del producto y presionarlo.
- Contar las gotas que derrama la porción de lodo estabilizado y secado para verificar la humedad contenida.

Nota: si se cuantifican menos de 8 gotas agregar agua, hasta alcanzar 8 gotas.

- Medir el potencial de hidrógeno del producto apilado en las hileras con papel pH.

Nota: si el potencial de hidrógeno se encuentra superior a 9, se suspende la elaboración de lombricomposteo a la dosificación propuesta debido a que no

cumple con los parámetros requeridos para la sobrevivencia de la lombriz coqueta roja.

Nota: si el potencial de hidrógeno se encuentra entre 9 o por debajo, proceder con la adición de lombrices a la mezcla.

- Agregar 0,25 libras de lombrices.
- Homogenizar la mezcla mecánicamente, cuidadosamente.
- Medir el contenido de humedad y del potencial de hidrógeno diariamente.
- Esperar 4 semanas.
- Remover las lombrices ubicadas en el lombricompost, mediante una rejilla de tamiz 50.
- Analizar en el laboratorio la composición del lombricompost.

2.3. Variables

Los materiales utilizados para el desarrollo de la investigación se detallan a continuación en conjunto con la cristalería y el equipo para determinar las propiedades fisicoquímicas de interés:

Tabla I. **Valores fijos**

Núm.	Variable	Dimensiones	Descripción
1	Tiempo	Horas (h)	El tiempo para la elaboración del lombricompost y la estabilización con cal viva será constante.
2	Fracción másica	Adimensional	La cantidad de óxido de calcio que se le agregara en función de las variaciones del flujo másico de los lodos, además de la cantidad de ninfas trituradas agregadas a los lodos estabilizados con óxido de calcio.

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Valores independientes**

Núm.	Variable	Dimensiones	Descripción
1	Cantidad de óxido de calcio (1/6 %p/p)	Kg	Se determinará la cantidad de óxido de calcio, para la estabilización y secado del lodo residual.
2	Lodo	Kg	Se determinará la cantidad de lodo evacuado del tratamiento de aguas residuales.
3	Ninfas	Kg	Se cuantificará la cantidad de ninfa producto de la fitorremediación ejecutada en la planta de tratamiento de aguas residuales.

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Variables dependientes**

Núm.	Variable	Dimensiones	Descripción
1	Metales pesados (Ar, Hg, Cd, Cr y Pb)	mg/L	Dicta la condición reglamentada por el Acuerdo Gubernativo 236-2006, los límites máximos permisibles de metales pesados para la disposición de lodos.
2	Potencial de hidrógeno	pH	Dicta la condición de la acidez o alcalinidad de una muestra.
3	Porcentaje de humedad	%H	Cuantificación de la cantidad de agua presente en la muestra.
4	Relación de carbono y nitrógeno (C/N)	adimensional	Determina la proporción de carbono respecto del nitrógeno.
5	Microorganismos	adimensional	Determina la presencia de microorganismos patógenos.

Fuente: elaboración propia.

2.4. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos, lodos estabilizados, ninfas y lombricompost

Los análisis de metales pesados, pH, humedad absoluta, C/N y microbiológico, obtenidos de los lodos, ninfa triturada, se realizarán en la empresa de Ecosistemas, S.A.; y los análisis de lombricompost se realizarán en los laboratorios de Anacafe.

2.5. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Gino Vittorio Aresti Alvarado
- Asesor: Ing. Marco Vinicio Carballo

2.6. Cristalería y equipo

Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos de la prueba, como material se utilizó lo detallado a continuación.

Tabla IV. **Materia a tratar**

Materia prima	Lodos residuales
Reactivos	Óxido de calcio (CaO)
	Ninfas

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Cristalería y equipo**

Equipo	Refrigeradora
	6 bandejas de plástico
	1 potenciómetro
	pHmetro Inolab 720 marca WTW
	Horno de secado Lab-Line 3511
	Balanza analítica precisa LX220A
	Espectrofotómetro de absorción atómica solar M5 termoelemento
	Horno microondas CEM Mars 2301/60
	Papel pH
Cristalería	Termómetro de alcohol
	6 Vasos de precipitados 500 mL

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Recursos generales**

Artículos de limpieza	Jabón antibacterial
	Jabón en gel para limpieza de cristalería
	Papel mayordomo
	Recipiente de poliestireno
	Bolsas plásticas
	Bolsas de papel manila
	Guantes de látex
Otros	Energía eléctrica

Fuente: elaboración propia.

2.7. Técnica cuantitativa o cualitativa

Para la comprobación de las hipótesis, se fundamentará con base a un estudio estadístico descriptivo. De modo a partir de los datos obtenidos de los análisis fisicoquímicos de los parámetros: pH, porcentaje de humedad, cantidad de los metales pesados (arsénico, plomo, cromo, mercurio y cadmio), y la relación carbono nitrógeno, comparados con respecto a los valores críticos dictados por el Acuerdo Gubernativo 236-2006, con la finalidad de refutar o aceptar las hipótesis propuestas y definir la disposición de los mismos.

2.8. Recolección y ordenamiento de la información

Se analizarán tres (3) muestras de lodos residuales y tres (3) muestras de ninfa producto del tratamiento terciario, de modo que, se caracterizara la presencia los metales pesados (arsénico, plomo, cromo, cadmio y mercurio), microorganismos patógenos, potencial de hidrógeno y porcentaje de humedad.

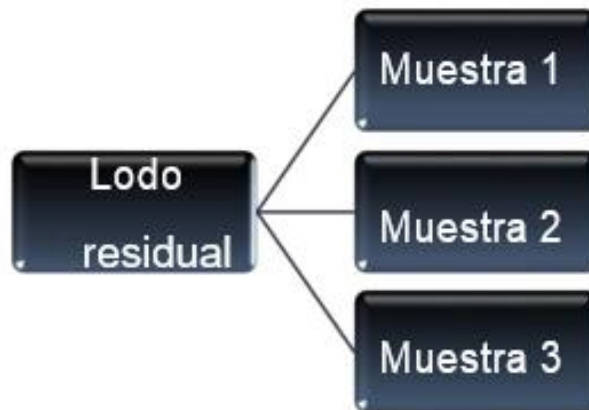
Además, se analizarán tres (3) de lodos estabilizados y secados con óxido de calcio, con una dosificación de un sexto respecto del lodo residual, el parámetro: microbiológico, el potencial de hidrógeno y el porcentaje de humedad.

Por último, se analizarán microbiológicamente, tres (3) muestras del lombricompost, de modo que se determine, la presencia de microorganismos patógenos y de los metales pesados (arsénico, plomo, cromo, cadmio y mercurio).

2.9. Técnica de muestreo

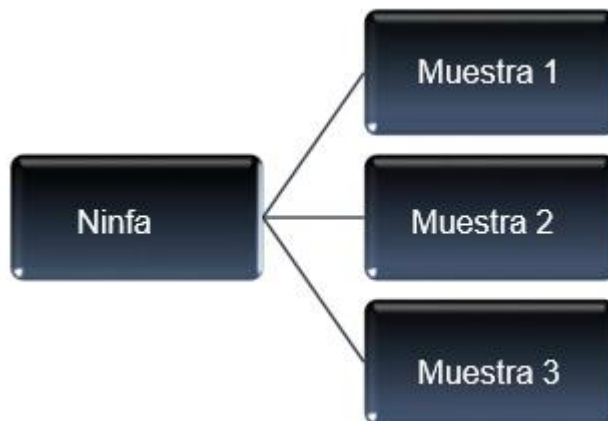
A continuación, se presenta en la figura 1 la técnica de muestreo utilizada.

Figura 1. **Recolección y ordenamiento de la información para la caracterización del lodo residual de la planta de aguas residuales de Santa Catarina Palopó, Sololá, Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Recolección y ordenamiento de la información para la caracterización de la ninfa desechada del tratamiento terciario de la planta de aguas residuales de Santa Catarina Palopó, Sololá, Guatemala**



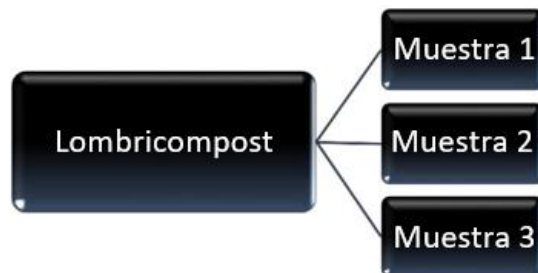
Fuente: elaboración propia.

Figura 3. **Recolección y ordenamiento de la información para la caracterización del lodo estabilizado y secado**



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Recolección y ordenamiento de la información para la elaboración de lombricompost de los lodos de la planta de aguas residuales de Santa Catarina Palopó, Sololá, Guatemala**



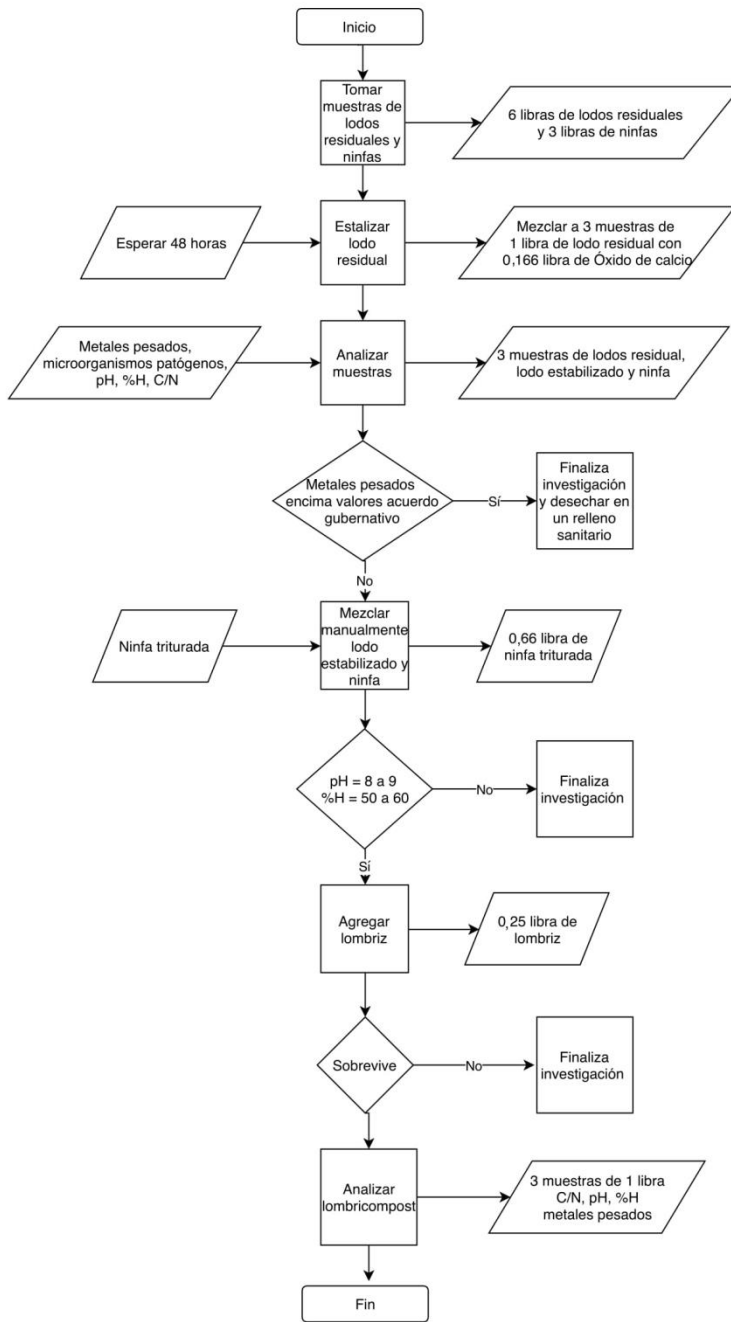
Fuente: elaboración propia.

2.10. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los datos que se obtendrán en el estudio son los siguientes:

- Cantidad de arsénico contenida en los lodos y ninfas
- Cantidad de cadmio contenida en los lodos y ninfas
- Cantidad de plomo contenida en los lodos y ninfas
- Cantidad de mercurio contenida en los lodos y ninfas
- Cantidad de hierro contenida en los lodos y ninfas
- Potencial de hidrógeno
- Humedad absoluta
- Carbono
- Nitrógeno
- Presencia de salmonella
- Presencia de helmintos

Figura 5. **Elaboración de lombricompost**



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2010.

2.11. Análisis estadístico

A continuación, se muestran los cálculos utilizados para el análisis estadístico.

2.11.1. Cálculo de promedio por corrida

$$\bar{x} = \frac{\sum xi}{n} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

- \bar{x} = promedio
- $\sum xi$ = sumatoria de las corridas
- n = número de datos sumados

2.11.2. Cálculo de desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (xi - \bar{x})^2}{n}} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde:

- σ = desviación estándar
- \bar{x} = promedio
- xi = corrida
- n = número de datos sumados

2.11.3. Balance de masa por componente

Estado estacionario>

$$\text{Entrada} = \text{salida}$$

Por componente A>

$$\text{Entrada (A)} = \text{salida (A)}$$

Ejemplos>

Carbono, nitrógeno y humedad relativa mezcla lombricompost:

$$\text{Ninfa (Cn)} + \text{Lodos estabilizado (Cle)} = \text{Lombricompost (Cl)}$$

$$\text{Cl} = \frac{\text{Ninfa (Cn)} + \text{lodos estabilizado (Cle)}}{\text{Lombricompost}}$$

$$\text{Cl} = \frac{1\text{lb (1,993)} + 1\text{ lb (30,10)}}{2\text{ lb}} = 16,04 \% \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde:

- Cn = carbono, ninfa
- Cle = carbono, lodo estabilizado
- Cl = carbono, lombricompost

3. RESULTADOS

Tabla VII. **Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos residuales**

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desviación Estandar
Potencial de Hidrógeno pH	7.00	7.01	7.00	7.00	0.006
Humedad (%)	96.4	96.7	96.4	96.50	0.173
Carbono C (%)	5.550	5.550	5.560	5.55	0.006
Nitrógeno N (%)	2.050	2.040	2.040	2.04	0.006
C/N	2.707	2.721	2.725	2.72	0.009
Arsénico As (mg/kg)	4.17	4.18	4.15	4.17	N/A
Cadmio Cd (mg/kg)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N/A
Mercurio Hg (mg/kg)	N.D.	N.D.		N.D.	N/A
Plomo Pb (mg/kg)	24	22	24	23.33	N/A
Cromo Cr (mg/kg)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N/A
Coliformes Fecales (NMP/100 g)	5.4×10^4	5.4×10^4	5.4×10^4	5.4×10^4	0.000
Escherichia Coli (NMP/100 g)	5.4×10^4	5.4×10^4	5.4×10^4	5.4×10^4	0.000
Salmonella/25 g	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	N/A
Helminthos observados	Larvas de Strongyloides stercoralis	Larvas de Strongyloides stercoralis	Larvas de Strongyloides stercoralis	Larvas de Strongyloides stercoralis	N/A

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos estabilizados con óxido de calcio

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desviación Estandar
Potencial de Hidrógeno pH	13	13	13	13	0.000
Humedad (%)	64.4	64.1	64.7	64.4	0.300
Carbono C (%)	1.990	2.010	1.980	1.993	0.015
Nitrógeno N (%)	0.315	0.315	0.315	0.315	0.000
C/N	6.317	6.381	6.286	6.328	0.048
Arsénico As (mg/kg)	N.D.	N.D.	N.D.	N/A	N/A
Cadmio Cd (mg/kg)	N.D.	N.D.	N.D.	N/A	N/A
Mercurio Hg (mg/kg)	N.D.	N.D.	N.D.	N/A	N/A
Plomo Pb (mg/kg)	N.D.	N.D.	N.D.	N/A	N/A
Cromo Cr (mg/kg)	N.D.	N.D.	N.D.	N/A	N/A
Coliformes Fecales (NMP/100 g)	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	0.000
Escherichia Coli (NMP/100 g)	< 1.8	< 1.8	< 1.8	< 1.8	0.000
Salmonella/25 g	Ausencia	Ausencia	Ausencia	N/A	N/A
Helmintos observados	NSO	NSO	NSO	N/A	N/A

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de las ninfas

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desviación Estandar
Potencial de Hidrógeno pH	6.00	6.00	6.00	6.00	0.000
Humedad (%)	95.6	95.3	95.5	95.47	0.153
Carbono C (%)	30.100	30.095	30.100	30.10	0.003
Nitrógeno N (%)	3.528	3.527	3.527	3.53	0.001
C/N	8.532	8.533	8.534	8.53	0.001
Arsénico As (mg/kg)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N/A
Cadmio Cd (mg/kg)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N/A
Mercurio Hg (mg/kg)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N/A
Plomo Pb (mg/kg)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N/A
Cromo Cr (mg/kg)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N/A
Coliformes Fecales (NMP/100 g)	5.4×10^6	5.4×10^6	5.4×10^6	5.4×10^6	0.000
Escherichia Coli (NMP/100 g)	3.5×10^6	3.5×10^6	3.5×10^6	3.5×10^6	0.000
Salmonella/25 g	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	N/A
Helmintos observados	NSO	NSO	NSO	NSO	N/A

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Análisis fisicoquímicos y microbiológicos de la mezcla de lodos estabilizados con óxido de calcio, ninfas y lombrices**

	Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Desviación Estandar
Empírico	Potencial de Hidrógeno pH	12.00	12.00	12.00	12.00	0.000
Teórico	Humedad (%)	79.93				0.000
	Carbono C (%)	16.04				0.000
	Nitrógeno N (%)	1.92				0.000
	C/N	8.35				0.000

Fuente: elaboración propia.

4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El proyecto constó de la evaluación de la posibilidad de elaborar un lombricompost a partir de lodos estabilizados con óxido de calcio, realizando una mezcla con ninfas provenientes de la propia planta de tratamiento, con el propósito de reducir la cantidad de descarga de sólidos ausentes de tratamiento, siendo un foco de contaminación para el lago de Atitlán.

Para lo cual se realizarán los análisis fisicoquímicos y microbiológicos ejecutados por la empresa Ecosistemas, a tres muestras de lodos residuales, ninfas y lodos estabilizados con óxido de calcio, con el propósito de verificar presencia de metales pesados, permitiendo el cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006 con respecto a la disposición de lombricompost, además de contar con la ausencia de microorganismos patógenos.

En la tabla VI, muestra el resultado de los análisis fisicoquímicos, microbiológicos y la determinación de la presencia de metales pesados de los lodos residuales, fundamentado en los límites que establece el acuerdo gubernativo para poder disponer adecuadamente de los mismos; se caracterizó la presencia de arsénico y plomo, los cuales no exceden limita la concentración de cincuenta (50) mg/kg y quinientos (500) mg/kg respectivamente.

Por otra parte, se determinó la presencia de los microorganismos patógenos, específicamente larvas de *Strongyloides Stercoralis*; es necesario disponer de los lodos residuales mediante eliminación sin previa estabilización con óxido de calcio, en un vertedero, a causa de su alta riesgo de contaminación al medio que lo rodea.

En la tabla VIII se denota la caracterización de los análisis fisicoquímicos, microbiológicos y la determinación de la presencia de metales pesados de las ninfas provenientes de planta de tratamiento de agua residual, de modo que se evidenció la presencia de salmonella; sin embargo, no fue hallado ninguno de los metales pesados restringidos por el acuerdo gubernativo (arsénico, plomo, cadmio, mercurio y cromo), esto debido se removieron las raíces de las ninfas debido a que en estas se ejecuta el remoción de metales pesados en el agua, por lo tanto, permanecen en las mismas; de modo que fue posible su implementación para la generación de un lombricompost.

En la tabla VII se determinó que las muestras de lodos estabilizados con óxido de calcio, en cual se evidenció que la ausencia de larvas de *Strongyloides Stercolaris* en la muestra debido a que el potencial de hidrógeno sobrepasó las condiciones de sobrevivencia; por otra parte, a pesar de presentar la presencia de metales pesados previo a la adición del óxido de calcio ubicado en la tabla VI, no se evidenció la presencia de arsénico y plomo posteriormente, esto debido a varios factores.

El análisis para la determinación de metales pesados requiere una digestión con ácido nítrico y en caso de ser necesaria con ácido clorhídrico, esto con la finalidad de disociar los metales para ser perceptibles para el método espectrofotométrico; sin embargo, debido a que los lodos estabilizados presentaron una alta alcalinidad adicionada por la reacción del óxido de calcio con la humedad de los lodos, es posible que la muestra requiriera un volumen mayor de ácido clorhídrico para lograr alcanzar un potencial de hidrógeno que permitiera la digestión de los metales presentes, lo cual dificultó la cuantificación para este método de determinación.

Además, la alta concentración de aniones hidroxilo provocó la precipitación del plomo presente y la floculación del arsénico. A la muestra se le adicionó óxido de calcio de alto grado de pureza superior al 88 %, abastecido por la empresa Horcalsa.

Sin embargo, al efectuar la mezcla entre la ninfa previamente triturada la cual presenta un potencial de hidrogeno de seis unidades, y el lodo estabilizado con óxido de calcio el cual posee un potencial de hidrogeno de trece unidades, la concentración de los iones hidronio no se redujo significativamente; de modo que, el espécimen *Eisenia Foetida* (lombriz coqueta roja) no sobrevivió debido a que es sensible anatómicamente al potencial de hidrógeno superior a nueve unidades; por lo tanto, no desarrolló la mezcla necesario para elaborar lombricompost.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Santa Catarina Palopó, Sololá, Guatemala

El proyecto se llevó a cabo en el municipio de Santa Catarina Palopó, Sololá; de modo que a continuación se describirá brevemente la ubicación y una reseña de la planta de tratamiento de efluentes.

5.1.1. Descripción del municipio de Santa Catarina Palopó

El municipio de Santa Catarina Palopó se encuentra situado en la parte este del departamento de Sololá, en la región VI o región suroccidental. Se localiza en la latitud 14° 32' 22" y en la longitud 91° 08' 06". Limita al norte con San Andrés Semetabaj; al sur con San Antonio Palopó y el lago de Atitlán; al este con San Antonio Palopó; y al Oeste con Panajachel. Cuenta con una extensión territorial de 8 kilómetros CUADRADOS y se encuentra a una altura de 1 585 metros sobre el nivel del mar. La distancia a la cabecera departamental de Sololá es de 13 kilómetros.⁸

5.1.2. Planta de tratamiento en el municipio de Santa Catarina Palopó

En 2012 se inauguró la planta de tratamiento de aguas residuales en el municipio de Santa Catarina Palopó, con la colaboración del comité de esta localidad.

La acción fue fundamental debido a que trata el 60 % de los 100 mil galones diarios de agua contaminada que genera y descarga esta población en el lago. La inversión fue de 100 mil dólares. El costo de operación mensual aproximado es de 10 mil quetzales.⁹

⁸ QUECHE SETENA, Gabriel. *Página de inicio, Santa Catarina Palopó*. <http://www.santacatarina.palopo.info/index.html>. Consulta: 25 de mayo de 2017.

⁹ Asociación Amigos del Lago Atitlán. *Saneamiento, aguas residuales*. <https://www.amigosatitlan.org/es/saneamiento-ambiental>. Consulta: 25 de mayo de 2017.

5.2. Procesos de tratamiento de aguas residuales

“En una planta de tratamiento típica, el agua residual se dirige a lo largo de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos en los que cada uno posee una función para reducir una carga contaminante específica. Estas funciones son típicamente:

- Pretratamiento
- Tratamiento primario
- Tratamiento (secundario / biológico)
- Tratamiento terciario: físico y/o químico y/o biológico”¹⁰

Nota: de modo que la planta de efluentes utiliza un tratamiento biológico, a continuación, se presenta, una amplia descripción del tratamiento biológico secundario de lodos activados y el terciario de Fitorremediación. De las figuras II a la VII, se muestra la planta de tratamiento de efluentes, a trabajar.

Figura 6. **Trampa de grasa del pretratamiento en la planta de efluentes de la asociación Amigos del Lago**



Fuente: elaboración propia.

¹⁰ MÉNDEZ CONTRERAS, Juan Manuel. Anfacal. *Efecto del amoniaco en la estabilización alcalina de lodos residuales*. <http://anfacal.org/pages/usos-y-aplicaciones-de-la-cal/usos-ecologicos/tratamientos-de-lodos.php>. Consulta: 30 de junio de 2016.

Figura 7. Reactor de aireación del primer tratamiento en la planta de efluentes de la Asociación Amigos del Lago



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Tratamiento secundario en la planta de efluentes de la Asociación Amigos del Lago



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Tanques fitorremediadores del tratamiento terciario en la planta de efluentes de la Asociación Amigos del Lago**



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Patio de secado del tratamiento primario de los lodos residuales, en la planta de efluentes de la Asociación Amigos del Lago**



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Segundo patio de secado del tratamiento primario de los lodos residuales, en la planta de efluentes de la Asociación Amigos del Lago**



Fuente: elaboración propia.

5.3. Tratamientos biológicos en medio suspendido

Por tratamiento biológico en medio suspendido, entendemos todos los tratamientos biológicos en los cuales el medio activo, es decir la biomasa, se encuentra suspendido en el sustrato o agua residual. Existe pues una mezcla íntima entre las bacterias estabilizadoras y el alimento o sustrato que conforma lo que se llama el licor mixto.

Los lodos activados, componen el sistema más sofisticado de tratamiento en medio suspendido, pues en él la biomasa o medio activo se encuentra altamente concentrado con relación al sustrato, razón por la cual es necesario controlar el medio ambiental de manera muy estricta para no provocar condiciones que desequilibren el proceso.¹¹

¹¹ METCALF & EDDY Inc. *Ingeniería de aguas residuales*. p. 263.

5.3.1. Pretratamiento de lodos activados

“El agua residual se somete a la sedimentación primaria donde se remueven los sólidos asentables, de igual manera, se remueven de grasa a partir de una trampa de grasa, la cual está conformada por un canal donde, las partículas, se separan por gravedad, retirándolo por medio de un barrido”¹².

5.3.2. Tratamiento primario

“El agua residual al haber sido sometida al pretratamiento, se descarga en reactores de tratamiento de aireación, donde se les suministra aire por medio de difusores, la cual es vital para la alimentación y reproducción de los microorganismos degradadores de la materia orgánica”¹³.

5.3.2.1. Aireación con difusores

“Consiste en la aplicación de aire con burbujas suministradas a alta o baja presión en tanques de aireación, donde la burbuja se libera a 2 o 3 metros de profundidad; la solubilidad se ve afectada por la presión parcial que varía en la burbuja, en su viaje a la superficie”¹⁴.

5.3.3. Tratamiento secundario

“Conformado por el reactor biológico y el separado o sedimentador secundario, con el sistema de retorno para concentrar los lodos. Normalmente

¹² METCALF & EDDY Inc. *Ingeniería de aguas residuales*. p. 263.

¹³ *Ibíd.*

¹⁴ *Ibíd.*

se incluye la cloración, con un tanque de contacto, en el tratamiento secundario”¹⁵.

5.3.3.1. Método aireación convencional

Es el método más ampliamente utilizado, y consiste en un reactor longitudinal, con flujo pistón, un separador secundario y una línea de retorno de lodos. El suministro de oxígeno es constante a lo largo del tanque, y normalmente por medio de aireación difundida a través de burbujas. El efluente se compone del agua residual y el retorno, mezclando según sea necesario. Uno de los factores importantes de analizar es el hecho de que el suministro de oxígeno no está de acuerdo con la demanda, que es mucho mayor al principio, pues existe mayor concentración de DBO.

Al final del tanque, por otra parte, prácticamente no existe sustrato para remover, por lo que el suministro de oxígeno se pierde en gran parte. Las condiciones ambientales varían a lo largo del tanque, mientras la adsorción, floculación y oxidación de la materia orgánica tienen lugar. Los lodos se asientan en un sedimentador secundario y se retoma con un flujo del 25 % al 50 % del caudal influente.¹⁶

5.3.4. Tratamiento terciario / fitodepuración

Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente.

Los humedales eliminan contaminantes mediante varios procesos que incluyen sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización. Reemplazan así el tratamiento secundario e inclusive, bajo ciertas condiciones, al terciario y primario de las aguas residuales.

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los vegetales durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de servir como material filtrante.¹⁷

¹⁵ TCHOBANOGLOUS, George. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. p. 315.

¹⁶ METCALF & EDDY Inc. *Ingeniería de aguas residuales*. p. 263.

¹⁷ DELGADILLO, Oscar. *Depuración de aguas por medio de humedales*. infoandina.org. http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf. Consulta: 28 de noviembre de 2016.

5.3.4.1. Definición de fitodepuración

Se refiere a la depuración de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrófitas) en los humedales o sistemas acuáticos, ya sean estos naturales o artificiales. El término macrófitas, dado su uso en el lenguaje científico, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos. Constituyen los fitosistemas, porque emplean la energía solar a través de la fotosíntesis. Básicamente, se trata de captar la luz solar y transformarla en energía química, que es usada en su metabolismo para realizar funciones vitales. Al realizar la planta sus funciones vitales, colabora en el tratamiento de las aguas.¹⁸

5.3.4.2. Sistema de tratamiento basado en macrófitas de hojas flotantes

“Principalmente angiospermas sobre suelos anegados. Los órganos reproductores son flotantes o aéreos. El jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua. Son las especies más utilizadas para este sistema”¹⁹.

5.3.4.3. Descripción de la macrófita *Eichhornia crassipes*

- Nombre científico: *Eichhornia crassipes*.
- Familia: Pontedericeas.
- Nombres comunes: lirio de agua, Jacinto de agua, camalote, camalote de antena, lechuguilla, flor de agua, violeta de agua.

Especie acuática flotante, de raíces sumergidas, de libre flotación, cuya altura puede llegar a 50cm e incluso 1 metro, en condiciones tropicales muy favorables. *E. crassipes* origina un rizoma ramificado que puede llegar a 30cm de longitud con varios entrenudos cortos. Cada entrenudo produce una hoja y una raíz. Los brotes axilares, que también pueden formar estolones, crecen en un ángulo de

¹⁸ DELGADILLO, Oscar. *Depuración de aguas por medio de humedales*. infoandina.org. http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf. Consulta: 28 de noviembre de 2016.

¹⁹ Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Investigación de la caracterización del Jacinto de agua *Eichhornia crassipes* del humedal Cerró Grande, para determinar su aprovechamiento como materia prima en la elaboración de productos, agorindustriales, industriales o artesanales*. [http:// www.fiaes.org.sv/library/1920905875_20150216014513.pdf](http://www.fiaes.org.sv/library/1920905875_20150216014513.pdf). Consulta: 30 de noviembre de 2016.

60° desde el rizoma y permanecen en este ángulo o se inclinan hasta colocarse horizontalmente.

De los brotes axilares se desarrollan las hojas, que son gruesas, brillantes y con aspecto ceroso, sobresaliendo por encima de la superficie del agua. Tiene forma ovoidea, oval o elíptica, miden de 2 a 15 cm de longitud y de 2 a 10 cm de ancho, con los bordes ligeramente curvados y con numerosas venas finas y longitudinales. Se disponen espiralmente, dando un aspecto de roseta. Los pecíolos son gruesos y esponjosos, pueden llegar a 5 cm de diámetro y de 40 cm de longitud.²⁰

5.3.4.4. Procedencia de la macrófita *Eichhornia crassipes*

Se ha extendido hasta convertirse en una mala hierba extremadamente grave, con grandes infestaciones en el sur de Estados Unidos, Centroamérica, África, el sudeste asiático y Australia. El crecimiento está altamente influido por los niveles de nutrientes en el agua, especialmente los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio. El incremento de estos elementos es causado a menudo por alcanzar parte de los fertilizantes agrícolas, las corrientes de agua y por los efluentes urbanos e industriales.

Además de los principales nutrientes, el lirio de agua también toma calcio, magnesio, azufre, hierro, manganeso, aluminio, boro, cobre, molibdeno y zinc.²¹

5.3.4.5. Características de la macrófita *Eichhornia crassipes*

El lirio de agua puede crecer en hábitats acuáticos muy diferentes: lagos, charcas, ríos, pantanos, humedales, etc. Crece prolíficamente en aguas con altos contenidos de nutrientes. No tolera agua salobre y la salinidad puede limitar o modificar su distribución. Requiere iluminación intensa, temperaturas entre 20 a 30 °C y resiste mal los fríos del invierno. El lirio de agua se ha utilizado para la fabricación de papel de baja calidad, tratamientos de efluentes, generación de biogás, compost agrícola y producción de artesanías.²²

²⁰ Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Investigación de la caracterización del jacinto de agua *Eichhornia crassipes* del humedal Cerró Grande, para determinar su aprovechamiento como materia prima en la elaboración de productos, agorindustriales, industriales o artesanales.* http://www.fiaes.org.sv/library/1920905875_20150216014513.pdf. Consulta: 30 de noviembre de 2016.

²¹ CANO, Manuel. *Preparación de sustrato para pie de cría *Eisena Foetida* L.* p. 32.

²² Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Investigación de la caracterización del Jacinto de agua *Eichhornia crassipes* del humedal Cerró Grande, para determinar su aprovechamiento como materia prima en la elaboración de productos, agorindustriales,*

5.4. Tratamiento primario de lodos residuales

El tratamiento primario puede ser ejecutado mediante varios sistemas de acondicionamiento los cuales se mencionan a continuación:

5.4.1. Acondicionamiento

Es el tratamiento químico o término del lodo para mejorar la eficiencia del espesado y la deshidratación. Lo más frecuente es el acondicionamiento químico utilizando productos químicos inorgánicos o poli electrolitos orgánicos.

Su desventaja es que, por cada kilogramo de producto inorgánico añadido, se produce un kilo extra de lodos. Las masas de la dosis de productos inorgánicos van de 100 a 200 kilogramos por tonelada de lodos. Los polielectrolitos orgánicos o polímeros, se usan en todos tipos de lodos y tienen la ventaja de producir incrementos menos significativos de volumen de lodos. La cantidad de polímero añadido está en la franja de 2 a 100 kilogramos por tonelada de lodos.²³

5.4.2. Espesado

Es el preprocesado de los lodos antes de la deshidratación. Tradicionalmente el lodo se revolvería suavemente en un recipiente cilíndrico tratado de que el agua subiera a la superficie y se recogiera como un sobrenadante. El lodo extraído por el fondo sería típicamente la mitad del volumen de lodos antes del espesado.

5.4.3. Deshidratación

“Es el preprocesado de los lodos antes de la deshidratación. Tradicionalmente el lodo se revolvería suavemente en un recipiente cilíndrico tratado de que el agua subiera a la superficie y se recogiera como un

industriales o artesanales. [http:// www.fiaes.org/sv/library/1920905875_20150216014513.pdf](http://www.fiaes.org/sv/library/1920905875_20150216014513.pdf).
Consulta: 30 de noviembre de 2016.

²³ METCALF & EDDY Inc. *Ingeniería de aguas residuales.* p. 365.

sobrenadante. El lodo extraído por el fondo sería típicamente la mitad del volumen de lodos antes del espesado”²⁴.

5.4.4. Secado térmico

“El calentamiento de lodos a temperaturas por encima de 200 °C y a presión es una técnica que ahora está recibiendo mucha atención. Esta técnica no sólo sirve como método de estabilización sino también como acondicionadora, espesadora y deshidratante a diferentes temperaturas y presiones”²⁵.

5.4.5. Estabilización con cal

“En el proceso de estabilización con cal, se añade suficiente cal a los lodos para elevar su pH por encima de 12. Este valor elevado del pH crea un entorno que no favorece la supervivencia de los microorganismos. Para la estabilización se puede emplear tanto cal hidratada como cal viva. Agregándose 200 libras de cal a 1 tonelada de lodo”²⁶.

5.4.5.1. Pretratamiento con cal

El pretratamiento de los lodos líquidos con cal precisa mayor cantidad de cal por peso unitario de lodo tratado, que la requerida para la deshidratación. Esta mayor dosis de cal es necesaria para conseguir el elevado valor de pH. Además, para conseguir un elevado nivel de mortalidad de patógenos, es necesario disponer de suficiente tiempo de contacto de la deshidratación.

La destrucción de patógenos, consiste en mantener el pH por encima de 12 durante 2 horas, y proporcionar suficiente alcalinidad residual para que el pH no se sitúe por debajo de 11 durante algunos días.

²⁴ METCALF & EDDY Inc. *Ingeniería de aguas residuales*. p. 365.

²⁵ *Ibíd.*

²⁶ *Ibíd.*

La dosis de cal necesaria varía en función del tipo de lodo y de la concentración de sólidos. El exceso de cal a dosificar puede ser de hasta 1,5 veces la cantidad necesaria para mantener el pH por encima de 12.²⁷

5.4.5.2. Postratamiento con cal

A pesar de que el uso de cal para la estabilización de la materia orgánica no es un concepto innovador, es una práctica relativamente reciente. En este proceso, la cal hidratada o viva se mezcla con el fango deshidratado en un mezclador de paleta, o en un transportador de tornillo, para elevar el pH de la mezcla. En esta aplicación es preferible el uso de cal viva, ya que la reacción con el agua es exotérmica y permite elevar la temperatura de la mezcla por encima de los 50 °C, temperatura suficientemente elevada como para inactiva los huevos de gusanos.

Normalmente una instalación de post-estabilización con cal consiste en un sistema de alimentación de cal por vía seca, en una cinta transportadora de la torta de fango, y un dispositivo para la mezcla del fango y la cal. El mezclado adecuado es especialmente importante para asegurar el contacto entre la cal y las partículas pequeñas de fango.²⁸

5.5. Óxido de calcio (cal viva)

Como parte fundamental del tratamiento de estabilización de lodos con cal, se definirá a continuación su obtención como materia prima, preparación y usos en la industria.

5.5.1. Obtención de la piedra caliza

Comprende todos los procesos que se realizan en la cantera a partir de los cuales se obtiene la piedra caliza, materia prima de este proceso. Dichos procesos consisten en:

- Estudios geológicos mineros, en los que se obtiene la información geológica y geoquímica de las áreas a explotar.
- Extracción de la piedra caliza, que consiste en extraer la materia prima de las canteras.

²⁷ *Standard methods for the examination of water and wastewater.* mwa.co.th. http://www.mwa.co.th/download/file_upload/SMWW_1000-3000.pdf. Consulta: 30 de noviembre de 2016.

²⁸ *Ibíd.*

- Durante esta etapa se pone especial atención en controlar la composición química, granulometría y humedad de la materia prima, que es la piedra caliza.

Las piedras calizas están compuestas básicamente por carbonato de calcio, aunque puede tener varias impurezas. El carbonato de calcio es el compuesto de calcio más abundante en la naturaleza. La piedra caliza se compone de carbonato cálcico e impurezas como arcillas, carbonato de magnesio, sílice, etc. Para que la cal sea de buena calidad y mantenga sus propiedades ligantes estas impurezas no deben de llegar al 5 %.²⁹

5.5.1.1. Preparación de la piedra caliza

“Consiste en las trituraciones y tamizajes primarios y secundarios de la piedra caliza. Mediante dicho proceso, se logra dar a las piedras el diámetro requerido para el horno de calcinación”³⁰.

5.5.1.2. Calcinación de la piedra caliza

“La calcinación consiste en la aplicación de calor para la descomposición (reacción térmica) de la caliza. En este proceso se pierde cerca de la mitad de peso, por la descarbonatación o pérdida del dióxido de carbono de la caliza original. La calcinación es un proceso que requiere mucha energía para que la descarbonatación pueda ocurrir y es en este paso cuando la piedra caliza (CaCO₃), se convierte en cal viva (CaO)”³¹.

5.5.1.3. Principales usos del óxido de calcio

- Industria
 - Siderurgia: ee utiliza como fundente y escorificante.

²⁹ HORCALSA. *Proceso de elaboración de cal*. [www.horcalsa.com](http://horcalsa.com). <http://horcalsa.com/proceso-de-elaboracion-de-cal/>. Consulta: 28 de noviembre de 2016.

³⁰ *Ibíd.*

³¹ *Ibíd.*

- Metalurgia: se utiliza en los procesos de flotación; en la fundición de cobre, plomo y zinc; en la producción de magnesio (se pueden utilizar dos tipos de procesos de fabricación: proceso electrolítico o proceso de reducción térmica, en este último se utiliza cal viva); en la producción de aluminio; y como escorificante de la sílice evitando la formación de compuestos de aluminio y sílice.
- Química: se emplea en la producción de jabón, en la fabricación del caucho y de carburo cálcico, en la industria petrolífera, en la industria del papel y en cosmética.
- Alimentaria: se utiliza en la industria azucarera (en concreto en la elaboración del azúcar de remolacha); ostricultura; piscicultura; industria cervecera, industria láctea; en la fabricación de colas y gelatinas, en el tratamiento del trigo y del maíz; en la industria vinícola y para la conservación de alimentos en contenedores de alimentos.
- Vidrio: su utilización proporciona vidrios más brillantes y con mejor color. La fusión es más rápida, lo cual supone un ahorro económico durante el proceso de fabricación del vidrio.
- Curtidos: es una de sus aplicaciones más antiguas. Los baños de lechada de cal permiten la extracción de pelos e hinchamiento de las pieles antes del curtido.
- Construcción
 - Infraestructuras: en estabilización de suelos: para secar suelos húmedos, descongelar los helados y mejorar las propiedades de los suelos arcillosos.
 - Edificación: en la fabricación de prefabricados de cal: Hormigón celular o aireado, ladrillos silicocalcáreos y bloques de tierra comprimida.
- Protección al medio ambiente
 - Tratamiento de aguas de consumo (potabilización): se emplea para ablandar, purificar, eliminar turbiedad, neutralizar la acidez y eliminar la sílice y otras impurezas con el fin de mejorar la calidad del agua que consumen las personas.
 - Tratamiento de aguas residuales y de lodos: se utiliza, de manera muy habitual, en los tratamientos convencionales químicos de aguas residuales industriales, básicamente, de carácter inorgánico. También se utiliza ampliamente en el tratamiento o línea de lodos en las plantas de depuración de aguas residuales urbanas o en aguas industriales de carácter orgánico.
 - Remineralización de agua desalinizada: la adición de cal permite realizar un acondicionamiento del agua desalinizada que puede ir

desde un ajuste de pH y reducción de la agresividad, hasta la remineralización de las aguas por el aporte de calcio. La cal es imprescindible para el tratamiento final de las aguas procedentes de la desalinización del agua del mar puesto que aporta uno de los compuestos nutricionales básicos, el calcio, la cual es necesaria para el mantenimiento del equilibrio cal-carbónico, con el fin de evitar incrustaciones o corrosiones.

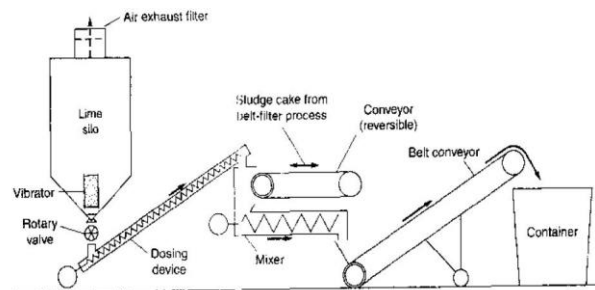
- Depuración de gases: la cal, dependiendo del proceso, es el desulfurante más rentable y natural que elimina el anhídrido sulfuroso y otros gases ácidos (HCl, HF y NOx) de los humos industriales de incineradoras de residuos sólidos urbanos, de centrales térmicas y de la industria en general.
- Tratamiento de residuos: la cal se emplea, además de como integrante de diversos tratamientos químicos, como agente para prevenir los malos olores y la contaminación de las aguas por la lixiviación.

- Agricultura

- Enmienda: la cal se utiliza como enmienda para mejorar las características de los suelos agrícolas: acidez, porosidad y actividad biológica del suelo.
- Fertilizante: aporta el calcio que es un nutriente para las plantas.
- Compost: se emplea en la obtención de compost a partir de residuos agrarios, agroindustriales y urbanos.
- Tratamientos fitosanitarios: se utiliza en la preparación de los caldos que llevan cobre para los tratamientos que reciben las plantas con el objetivo de defenderlas de los ataques de hongos.
- Biocida: se puede utilizar como biocida cuyo fin es destruir, contrarrestar, neutralizar, impedir la acción o ejercer el control de otro tipo, sobre cualquier organismo nocivo por medios químicos o biológicos.
- Alimentación animal: la cal se utiliza como reactivo, por su alta velocidad de reacción, para la elaboración de jabones cálcicos destinados a la fabricación de aditivos y derivados de pienso animal. Además, la cal se utiliza en suelos ácidos (subiendo su pH y aportando calcio como nutriente), modificando la composición de las praderas, permitiendo que se desarrollen especies leguminosas que presentan mejor digestibilidad para el ganado y mayor contenido proteico. Esta operación en suelos ácidos permitirá que en su composición florística aparezcan una serie de especies, entre ellas las alfalfas,

reconocida por la mayor parte de los ganaderos como la reina de las forrajeras.³²

Figura 12. **Diagrama de un equipo mecanizado del mezclado de cal a lodos**



Fuente: METCALF & EDDY Inc. *Ingeniería de aguas residuales*. p. 451.

5.6. Tratamiento secundario de lodos residuales

A continuación, se detalla varios métodos de tratamiento y acondicionamiento de los lodos con la finalidad de disponer de una forma de bajo impacto ambiental o reúso de la materia.

5.6.1. Digestión aerobia

Es en un cierto modo análoga al proceso de lodos activados. El lodo se alimenta a una cuba donde se mezcla en condiciones aerobias. El principal objetivo del proceso es el de reducir el contenido de sólidos para su evacuación final. Los sólidos volátiles se reducen como en la digestión anaerobia, y así se produce un humus estabilizado y muy fertilizante.

La operación de digestión aerobia está gobernada por los principios de los lodos activados y más concretamente de la aireación prolongada. Las ventajas del proceso son, el producto final humus estabilizado, bajo coste de inversión, fácil operación, pocos olores, producción de gases no explosivos (CO₂ y NH₃); algunas

³² ANCADE. *Aplicaciones por producto*. http://www.ancade.com/Aplicaciones-por-producto_es_2_141_0_8.html. Consulta: 28 de noviembre de 2016.

de las desventajas son, los altos costes de operación en potencia y oxígeno, rendimiento reducido en clima frío, no produce metano y la producción de lodo es difícil de deshidratar.³³

5.6.2. Digestión anaerobia

Se optimiza el gas y se usa como parte del balance de energía de la planta depuradora. La materia prima principal en depuradoras urbanas son los lodos primarios ya que contienen gran cantidad de materia orgánica. Sin embargo, también pueden digerirse los lodos activados en exceso solos, si bien se suelen mezclar con lodos primarios. Los atractivos de la digestión anaerobia de los son, la producción de metano, la reducción del 30 % en volúmenes de lodos, producto final libre de olores y lodos libres de patógenos.³⁴

5.6.3. Secado térmico

El pretratamiento incluye espesado, digestión anaerobia, acondicionamiento del lodo y deshidratación a 25 %. El biogás del digestor anaerobio se usa como aporte de calor al secador. El secado de lodo es una operación unitaria que implica reducir el contenido de agua del lodo por evaporación. El resultado es un producto de 90 % sólidos menos y libre de patógenos, típicamente en forma granular. El secado térmico se usa transmisión de calor por conducción, convección y/o radiación.³⁵

5.6.4. Incineración

El lodo de depuradoras se deshidrata en primer lugar y se puede quemar con un combustible de apoyo al 20 % de sólidos. Con valores de torta seca del 30 % por sólidos, el lodo se puede quemar sin necesidad de apoyo. La incineración de lodos es la combustión a alta temperatura de los elementos combustibles del lodo-carbono, hidrogeno y azufre además de los de las grasas, hidratos de carbono y proteínas. Los productos finales de la combustión del lodo con aire en exceso con dióxido de carbono, dióxido de azufre y vapor de agua. También se producen cenizas. El volumen se reduce hasta alrededor de un 15 % del valor original. La alta potencia calorífica del lodo varía de (12-18) MJ/Kg de sólidos secos.³⁶

³³ METCALF & EDDY Inc. *Ingeniería de aguas residuales*. p. 451.

³⁴ *Ibíd.*

³⁵ *Ibíd.*

³⁶ *Ibíd.*

5.6.5. Compostaje

Es un proceso de tratamiento de residuos de lodos utilizados a distintos niveles de sofisticación. Tradicionalmente, tendía a ser un proceso de bajo coste con la mayoría de sus aplicaciones en proyectos singulares y de bajo desarrollo. El compostaje es un proceso seco, mientras que la digestión aerobia y anaerobia es un proceso húmedo.

El proceso requiere de aproximadamente 30 días para la degradación completa. Si se alcanza la degradación completa, el proceso es irreversible y el producto final de compost está estabilizado. Los nutrientes inorgánicos esenciales son nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, magnesio, calcio y sodio.³⁷

5.6.5.1. Hileras volteadas tradicionales

Después de que se separan las fracciones no biodegradables o/y de biodegradabilidad lenta, los lodos se agrupan en filas o hileras casi triangulares sobre superficies duras. La altura de la pila va desde 1 a 2 metros y la anchura de la base es de unos 3 a 4 metros. Las hileras aventadas se pueden desarrollar tanto en el exterior como en locales cubiertos. Es necesario remover continuamente la pila para oxigenar todo el material. El desarrollo total se suele lograr en más de tres meses, después de los cuales se deja al compost curándose durante 12 meses.³⁸

5.6.5.2. Pila estática aireada

Se agrupan en pilas de 1 a 2 metros de altura, de 3 a 4 metros de anchura y de 20 metros de longitud y se ponen sobre suelos con sistemas de ventilación por tubos. Para reducir los olores se cubre el compost con un estabilizador. El sistema de ventilación se activa mediante sondas de temperatura. La descomposición tiene lugar después de 4 a 6 semanas frente a las 12 semanas del sistema anterior.³⁹

5.6.5.3. Lombricomposteo

Las lombrices de tierra son de una gran importancia económica, porque con su actividad cavadora de tierra, en su estado natural, participan en la fertilización, aireación y formación del suelo, por su efecto marcado sobre la estructuración del

³⁷ METCALF & EDDY Inc. *Ingeniería de aguas residuales*. p. 451.

³⁸ KIELY, Gerard. *Ingeniería ambiental, fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. p. 158.

³⁹ *Ibíd.*

mismo, debido a la mezcla permanente y el reciclaje de bases totales, como el calcio, el cual sustraen de las capas más profundas del suelo hacia la superficie.

Las lombrices ingieren diariamente una cantidad de comida equivalente a su propio peso y expelen el 60 % transformado en humus de lombriz o vermicompost, que es un abono orgánico prácticamente insuperable, puede incrementar hasta un 300% la producción la producción de hortalizas y otros productos vegetales. Una lombriz produce diariamente unos 0.3 g de humus, con lo que en pequeñas superficies se pueden obtener grandes cantidades de humus.

Tiene un aspecto similar a la tierra, suave, ligero e inodoro, tiene altos contenidos de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y micro elementos en cantidades al menos cinco veces superiores a las de un buen terreno fértil.⁴⁰

5.6.5.4. Definición del lombricomposteo

El lombricomposteo es un proceso de biooxidación, degradación y estabilización de la materia orgánica a partir de la acción combinada de lombrices y microorganismos, mediante el cual se obtiene un producto final estabilizado, homogéneo y de granulometría fina denominado vermicompost, lombricompost, compost de lombriz o humus de lombriz. Su utilización aporta los beneficios:

- eliminación de residuos orgánicos nocivos, insalubres, molestos y de difícil gestión.
- Generación de un producto final útil, de gran valor como enmienda orgánica del suelo de alta calidad, con función como abono orgánico.
- Producción de una gran biomasa de lombriz, de alto contenido proteico y de alta calidad para la alimentación animal.⁴¹

5.6.5.5. Organismos implicados en el lombricompost

De más de 4 400 especies de lombrices terrestres identificadas, solamente seis, pueden ser utilizadas en la degradación de residuos orgánicos. Estas lombrices pertenecientes taxonómicamente al orden *Haplotaxida* y familia *Lumbricidae*, se agrupan en la categoría ecológica de epigeas, que poseen una estrategia reproductiva, lo cual permite que sucesivas generaciones se vayan sustituyendo de manera continua, manteniendo por ello unas altas tasas de consumo del sustrato orgánico, lo cual acelera su degradación. En zonas tropicales y subtropicales, las especies más efectivas son *Eudrilus eugeniae* y *Perionyx*

⁴⁰ DIAZ, Eduardo. biblioteca.org.ar. <http://www.biblioteca.org.ar/LIBROS/88761.pdf>. Consulta: 30 de noviembre de 2016.

⁴¹ Ibíd.

excavatus, mientras que en climas templados las más utilizadas son *Eisenia Foetida*, *Eisenia andrei* y en menor medida *Dendrobaena veneta* y *Lumbricus rubellus*.⁴²

5.6.5.6. Factores que afectan el proceso de lombricomposteo

La posibilidad de utilizar lombrices en la biodegradación de los residuos orgánicos, así como en la obtención de lombricompost, depende de una serie de factores que hay que tener en cuenta para el correcto desarrollo del proceso de vermicompostaje: la naturaleza, características y acondicionamiento de los residuos orgánicos o materiales de partida y a necesidad de mantener una serie de variables ambientales dentro de unos límites adecuados para el adecuado crecimiento y reproducción de las lombrices y el correcto control del proceso).⁴³

5.6.5.7. Naturaleza y acondicionamiento de los residuos orgánicos o materiales de partida

Existe un gran número de residuos orgánicos generados por las actividades agrícolas, urbanas e industriales de nuestra sociedad que han sido ensayados y utilizados óptimamente en los procesos de lombricomposteo. Estos residuos se clasifican en:

- Convencionales o residuos naturales: estiércol vacuno, bovino, caballar, avícola, entre otros.
- No convencionales o residuos no naturales: purines de cerdo, lodos de tratamiento de aguas residuales, lodos de industrias de celulosa y papel, lodos de industrias lácteas y residuos oleícolas.

En algunos casos es necesario acondicionar previamente esos residuos orgánicos para permitir la supervivencia de las lombrices inoculadas. Ello es exigible en los siguientes casos:

- Estructura física inadecuada de los residuos: como es el caso de los lodos de aguas residuales, por lo que hay que mezclarlos con materiales estructurantes para obtener un sustrato lo suficientemente aireado y poroso que permita no solo el desplazamiento de las lombrices, sino también el paso del aire y el drenaje excesivo de agua.
- Elevada salinidad de los residuos: se ha comprobado una estrecha relación entre la salinidad del sustrato y la composición iónica de los

⁴² DIAZ, Eduardo. biblioteca.org.ar. <http://www.biblioteca.org.ar/LIBROS/88761.pdf>. Consulta: 30 de noviembre de 2016.

⁴³ *Ibíd.*

fluidos internos de las lombrices. Por ello, concentraciones elevadas de sales en los residuos pueden tener efectos inhibitorios en la reproducción y desarrollo de las lombrices e incluso puede llevar a la muerte de los individuos.

- Elevada concentración de amonio: niveles de amonio por encima de 0.5mg/g de sustrato, son tóxicos para las poblaciones de *E. foetida* y *E. andrei*. Por tal motivo, algunos lodos de depuradora tienen que ser aireados durante varios días facilitar la volatilización de amonio antes de ser utilizados como alimento de las lombrices.
- pH inadecuado: aunque, *E. foetida* y *E. andrei*, toleran valores comprendidos entre 5 y 9, prefieren un valor neutro.
- Relación de carbono/nitrógeno (C/N): aunque *E. foetida* y *E. andrei*, pueden degradar residuos con relaciones elevadas o bajas, se aconseja utilizar materiales orgánicos con C/N entre 20 a 30, por lo que la mezcla de varios residuos puede constituir el método más apropiado de acondicionamiento.
- Concentración elevada de metales pesados y contaminantes orgánicos: Pueden provocar alteraciones en el metabolismo de las lombrices, afectando al crecimiento, desarrollo sexual, producción de cápsulas e incluso a la supervivencia de éstas.⁴⁴

5.6.5.8. Humedad

Es un factor de mucha importancia que influye en la reproducción. Debe estar entre el (70 a 80) %. Una humedad superior al 85 % hace que las lombrices entre un periodo de latencia y se afecta la producción de lombricompost y la reproducción. Debajo de 70 % de humedad es una condición desfavorable y los niveles inferiores del 55 % son mortales para las lombrices. La prueba para medir el porcentaje de humedad en el sustrato se conoce con el puño de una mano, posteriormente se aplica fuerza, lo normal de un brazo, y si salen 8 a 10 gotas es que la humedad está en un 80 % aproximadamente.⁴⁵

5.6.5.9. Temperatura

“Es otro factor que influyen en la reproducción, producción y fecundidad de las capsulas. Una temperatura entre (18 a 25) °C es considerada óptima, ya que conlleva el máximo rendimiento de las lombrices. Se controla con

⁴⁴ DIAZ, Eduardo. biblioteca.org.ar. <http://www.biblioteca.org.ar/LIBROS/88761.pdf>. Consulta: 30 de noviembre de 2016.

⁴⁵ Ibíd.

medidores que emiten una alarma si la temperatura no está dentro del rango requerido”⁴⁶.

5.6.5.10. Aireación

El sustrato orgánico debe tener unas condiciones de aireación óptimas para el desarrollo de las lombrices y para el buen funcionamiento del proceso de lombricomposteo. Este parámetro depende de las condiciones físicas del propio medio, aunque las lombrices con su propio desplazamiento a través de galerías y actividad contribuyen a la aireación. La cantidad de oxígeno necesaria, entre 55 % y 65 %, pueden verse reducida por un exceso de agua o por la compactación de la materia debido a una estructura demasiado densa o por un exceso de peso.⁴⁷

5.6.5.11. Densidad de población

“La densidad de población puede afectar al desarrollo adecuado del proceso de lombricomposteo, ya que, una elevada densidad traería consigo una competencia entre los individuos que ralentizaría el proceso. En condiciones naturales, la colonización está controlada directamente por la temperatura, humedad y disponibilidad de alimento dando como resultado una producción baja de biomasa”⁴⁸.

Tabla XI. **Tiempo de procesado de una pila de 7 toneladas**

Población inicial de lombrices	Tiempo de procesado
1,000 lombrices = 1 kilogramo de lombrices	245 días
10,000 lombrices = 10 kilogramos de lombrices	156 días
100,000 lombrices = 100 kilogramos de lombrices	75 días
1,000,000lombrices=1,000 kilogramos de lombrices	7 días

Fuente: DIAZ, Eduardo. biblioteca.org.ar. <http://www.biblioteca.org.ar/LIBROS/88761.pdf>.

Consulta: 30 de noviembre de 2016.

⁴⁶ DIAZ, Eduardo. biblioteca.org.ar. <http://www.biblioteca.org.ar/LIBROS/88761.pdf>. Consulta: 30 de noviembre de 2016.

⁴⁷ Ibíd.

⁴⁸ Ibíd.

5.6.5.12. Lombricomposteo y microorganismos patógenos

El lombricomposteo, conlleva a una importante reducción de las poblaciones de microorganismos patógenos; en algunos casos se ha observado que después de 60 días de lombricomposteo, la cantidad de coliformes fecales en lodos de aguas residuales y en purinas de cerdo cayo de 39000NMP (número más probable hasta 0 NPM, ocurriendo de manera similar para el caso de la Salmonella spp y huevos de helmintos.⁴⁹

5.7. Legislación ambiental respecto la disposición de los lodos

Fundamentándose en el Acuerdo Gubernativo 236-2006, denominado: *Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y la disposición de lodos*, el cual tiene por objetivo el velar por el mantenimiento del equilibrio ecológico y la calidad del medio ambiente para mejorar la calidad de vida de los habitantes de Guatemala.

De modo que para el presente proyecto se basará en los artículos del 41 al 48, poniendo mayor importancia los artículos siguientes:

- Artículo 41. Disposición final

Se permite efectuar la disposición final de los lodos, por cualquiera de las siguientes formas:

- Aplicación al suelo: acondicionador, abono o compost
- Disposición en rellenos sanitarios
- Confinamiento o aislamiento
- Combinación de las antes mencionadas

- Artículo 42. Parámetros y límites máximos permisibles para lodos.

Para efectuar disposición final de lodos de acuerdo a las formas descritas en el artículo 41 del presente Reglamento, los valores de sus propiedades fisicoquímicas no deben exceder los límites máximos permisibles descritos en el siguiente cuadro:⁵⁰

⁴⁹ DIAZ, Eduardo. *biblioteca.org.ar*. <http://www.biblioteca.org.ar/LIBROS/88761.pdf>. Consulta: 30 de noviembre de 2016.

⁵⁰ Gobierno de Guatemala. *Acuerdo Gubernativo 236-2006*. [www.20.gob.gt/images/legislacion/Legislación%20sobre%20Diversidad%20Biológica%20y%20Ambiente/Acuerdo_Gubernativo_2362006_de_disposici_n_de_aguas_residuales_1.pdf](http://www.chmguatemala.gov.gt/images/legislacion/Legislación%20sobre%20Diversidad%20Biológica%20y%20Ambiente/Acuerdo_Gubernativo_2362006_de_disposici_n_de_aguas_residuales_1.pdf). Consulta: 30 de junio de 2016.

Tabla XII. **Artículo 42, límites máximos permisibles de lodos**

Disposición final	Dimensionales	Aplicación al suelo	Disposición en rellenos sanitarios	Confinamiento o aislamiento
Arsénico	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	50	100	> 100
Cadmio	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	50	100	> 100
Cromo	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	1500	3000	> 3000
Mercurio	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	25	50	> 50
Plomo	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	500	1000	> 1000

Fuente: Gobierno de Guatemala. *Acuerdo gubernativo 236-2006*. chmguatemala.

www.20.gob.gt/images/legislacion/Legislación%20sobre%20Diversidad%20Biológica%20y%20Ambiente/Acuerdo_Gubernativo_2362006_de_disposici_n_de_aguas_residuales_1.pdf.

Consulta: 30 de junio de 2016.

Los expresados en el cuadro anterior son los límites máximos permisibles para suelos con potencial de hidrógeno menor que siete unidades. En los suelos que posean potencial de hidrógeno mayor o igual que siete unidades se podrán disponer lodos hasta cincuenta por ciento más de los valores presentados como límites máximos permisibles.

- Artículo 43. Aplicación al suelo

Los lodos que presenten metales pesados y que se ajusten a los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 42, podrán disponerse como acondicionador del suelo, en cuyo caso se permitirá disponer hasta doscientos mil kilogramos por hectárea por año. En caso de que la aplicación sea como abono se permitirá disponer hasta cien mil kilogramos por hectárea por año.⁵¹

⁵¹ Gobierno de Guatemala. *Acuerdo Gubernativo 236-2006*. chmguatemala. www.20.gob.gt/images/legislacion/Legislación%20sobre%20Diversidad%20Biológica%20y%20Ambiente/Acuerdo_Gubernativo_2362006_de_disposici_n_de_aguas_residuales_1.pdf. Consulta: 30 de junio de 2016.

5.8. Métodos para el análisis de los parámetros físicos y químicos de los lodos, ninfas, lodos estabilizados y lombricompost

Con la finalidad de disponer de magnitudes con alta precisión y exactitud, a continuación, se detalla cada metodología de análisis de los diversos parámetros fisicoquímicos de interés.

5.8.1. Potencial de hidrógeno: (Método potenciométrico (Willard & Bates))

El método potenciométrico o electroquímico para medir pH de un suelo es el más utilizado. Con este método se mide el potencial de un electrodo sensitivo a los iones H⁺ (electrodo de vidrio) presentes en una solución problema; se usa como referencia un electrodo cuya solución problema no se modifica cuando cambia la concentración de los iones por medir, que es generalmente un electrodo de calomelano o de Ag/AgCl. El electrodo, a través de sus paredes, desarrolla un potencial eléctrico. 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.⁵²

5.8.2. Porcentaje de humedad: (método gravimétrico a 104 °C)

Los métodos gravimétricos se caracterizan porque lo que se mide en ellos es la masa. Como esta magnitud carece de toda selectividad, se hace necesario el aislamiento de la sustancia que se va pesar de cualquier otra especie, incluido el disolvente. Así pues, todo método gravimétrico precisa una preparación concreta de la muestra, con objeto de obtener una sustancia rigurosamente pura con una composición estequiométrica perfectamente conocida.

Las condiciones anteriores se consiguen fundamentalmente en las siguientes etapas: a) Separación, cuya finalidad es aislar el componente de interés de la mayor parte de las especies que lo acompañan. b) Deseccación o calcinación, etapa destinada a eliminar el agua y los componentes volátiles, y transformar, en algunos casos, el componente aislado en uno de fórmula conocida. Teniendo en cuenta que la fase más importante y problemática es la separación, los métodos gravimétricos

⁵² CARREIRA, Daniel. *agroindustria.gob.ar*. [http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/<areas/proinsa/informes/_archivos//002010_Ronda%202010/000003_Ing.%20Agr.%20Daniel%20Carreira%20\(Carbono%20oxidable%20y%20Nitr%C3%B3geno\)/000008_Carbono%20oxidable%20M%C3%A9todo%20de%20Walkley&Black-%20y%20en%20Nit](http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/<areas/proinsa/informes/_archivos//002010_Ronda%202010/000003_Ing.%20Agr.%20Daniel%20Carreira%20(Carbono%20oxidable%20y%20Nitr%C3%B3geno)/000008_Carbono%20oxidable%20M%C3%A9todo%20de%20Walkley&Black-%20y%20en%20Nit). Consulta: 30 de noviembre de 2016.

se suelen clasificar según el procedimiento empleado para llevar a cabo esa etapa.⁵³

5.8.3. Porcentaje de carbono: (M.O - Walkley Black)

“Basado en la valoración con dicromato (VI) en medio ácido es uno de los más utilizados para establecer el CO. El análisis del carbono orgánico se realiza oxidando el carbono del sedimento con un volumen conocido de dicromato de potasio, en ácido sulfúrico concentrado y en presencia de sulfato de plata”⁵⁴.

5.8.4. Porcentaje de nitrógeno: (Micro-Kjeldahl)

“En el método de Kjeldahl la reacción ocurre en medio ácido (sulfúrico concentrado) a temperaturas elevadas (400 °C), donde el nitrógeno orgánico es transformado a ion amonio, el cual es cuantificado a través de una destilación alcalina y su posterior titulación. En el método de Kjeldahl se cuantifican las formas orgánica y amónica, y con ciertas modificaciones se pueden incluir los nitratos”⁵⁵.

5.8.5. Metales pesados: (EPA 3051 A)

Este método de extracción por microondas está diseñado para imitar la extracción utilizando calentamiento convencional con ácido nítrico (HNO₃), o alternativamente, ácido nítrico y ácido clorhídrico (HCl), de acuerdo con el Método 200.2 de la EPA y el Método 3050. Dado que este método no está destinado a realizar la descomposición total de la muestra, las concentraciones de analito extraído, puede no reflejar el contenido total de la muestra. Este método es aplicable al ácido asistido por microondas Extracción / disolución de sedimentos, lodos, suelos y aceites.

⁵³ CARREIRA, Daniel. *agroindustria.gob.ar*. [http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/<areas/proinsa/informes/_archivos/002010_Ronda%202010/000003_Ing.%20Agr.%20Daniel%20Carreira%20\(Carbono%20oxidable%20y%20Nitr%C3%B3geno\)/000008_Carbono%20oxidable%20M%C3%A9todo%20de%20Walkley&Black-%20y%20en%20Nit](http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/<areas/proinsa/informes/_archivos/002010_Ronda%202010/000003_Ing.%20Agr.%20Daniel%20Carreira%20(Carbono%20oxidable%20y%20Nitr%C3%B3geno)/000008_Carbono%20oxidable%20M%C3%A9todo%20de%20Walkley&Black-%20y%20en%20Nit). Consulta: 30 de noviembre de 2016.

⁵⁴ *Ibíd.*

⁵⁵ *Ibíd.*

Los digestos producidos por el método son adecuados para el análisis por absorción atómica de llama Espectrofotometría (FLAA), espectrofotometría de absorción atómica del horno de grafito (GFAA), Espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) y acoplada inductivamente plasma de espectrometría de masas (ICP-MS). Sin embargo, la adición de HCl puede limitar la cuantificación métodos, o aumentar las dificultades de cuantificación con algunas técnicas.⁵⁶

5.8.6. Salmonella: (SMWW 9260 B)

Este procedimiento describe un método para estimar la densidad de Salmonella en muestras de agua. Otros métodos han sido descritos en la literatura y se recomienda un estudio comparativo Seleccione el mejor método cuantitativo para cualquier aplicación. El siguiente procedimiento debe ser Modificado para su uso con muestras sólidas o semisólidas. Debido a la alta proporción de bacterias coliformes a patógenos, las muestras grandes (1 L o más) son necesario. Puede utilizarse cualquier método de concentración, pero preferiblemente concentrado La muestra mediante la técnica del filtro de membrana.

Después de mezclar la membrana Con 100 ml de agua de peptona estéril al 0,1 % (p / v), utilice un procedimiento de MPN cuantitativo Proporcionando el homogeneizado en un procedimiento de tubo múltiple de tres tubos y tres diluciones utilizando Selenita cistina, selenita-F, o tetrionato como medio selectivo de enriquecimiento. Incubar durante 24 horas según se especifique o requiera para el medio de enriquecimiento utilizado y raya de cada tubo a placas de verde brillante y xilosa lisina desoxicolato agares. Incubar Durante 24 ha 35 ° C.

Seleccionar de cada placa al menos una, y preferiblemente dos a tres, colonias Sospechosos de ser Salmonella, inocular una inclinación cada uno de hierro de azúcar triple (TSI) y hierro de lisina (LIA), e incubar durante 24 h a 35 ° C. Los cultivos de prueba dan una reacción positiva Salmonella mediante técnicas serológicas. De la combinación de Salmonella negativos y positivos, calcular la MPN / 1,0 L de la muestra original.⁵⁷

5.8.7. Helmintos: (Formalin-Ethyl Acetate Sedimentation Concentration. Lynne S. Garcia & David. A. Bruckne)

Las técnicas de sedimentación utilizan soluciones de gravedad específica inferior a las de los organismos parasitarios, concentrando de este modo el último en el sedimento. Se aprovecha la alta gravedad específica de los quistes de protozoos

⁵⁶ CARREIRA, Daniel. *agroindustria.gob.ar*. [http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/<areas/proinsa/informes/_archivos/002010_Ronda%202010/000003_Ing.%20Agr.%20Daniel%20Carreira%20\(Carbono%20oxidable%20y%20Nitr%C3%B3geno\)/000008_Carbono%20oxidable%20M%C3%A9todo%20de%20Walkley&Black-%20y%20en%20Nit](http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/<areas/proinsa/informes/_archivos/002010_Ronda%202010/000003_Ing.%20Agr.%20Daniel%20Carreira%20(Carbono%20oxidable%20y%20Nitr%C3%B3geno)/000008_Carbono%20oxidable%20M%C3%A9todo%20de%20Walkley&Black-%20y%20en%20Nit). Consulta: 30 de noviembre de 2016.

⁵⁷ *Ibíd.*

y los huevos de helmintos en comparación con el agua. Su tendencia natural a asentarse en soluciones acuosas puede acelerarse por centrifugación ligera. La formalina fija los huevos, las larvas, los ooquistes y las esporas, de modo que ya no son infecciosas, así como conserva su morfología. Los residuos fecales se extraen en la fase de acetato de etilo de la solución.⁵⁸

⁵⁸ CARREIRA, Daniel. *agroindustria.gob.ar*. [http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/<areas/proinsa/informes/_archivos//002010_Ronda%202010/000003_Ing.%20Agr.%20Daniel%20Carreira%20\(Carbono%20oxidable%20y%20Nitr%C3%B3geno\)/000008_Carbono%20oxidable%20M%C3%A9todo%20de%20Walkley&Black-%20y%20en%20Nit](http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/<areas/proinsa/informes/_archivos//002010_Ronda%202010/000003_Ing.%20Agr.%20Daniel%20Carreira%20(Carbono%20oxidable%20y%20Nitr%C3%B3geno)/000008_Carbono%20oxidable%20M%C3%A9todo%20de%20Walkley&Black-%20y%20en%20Nit). Consulta: 30 de noviembre de 2016.

CONCLUSIONES

1. No es viable la elaboración lombricompost a partir de la mezcla de lodo estabilizado con óxido de calcio, ninfas y la adición del espécimen *Eisenia Foetida* debido al elevado potencial de hidrógeno, que provoca su muerte.
2. Se determinó que en los lodos residuales, no se detectó la presencia de los metales pesados cromo, cadmio y mercurio, únicamente los metales pesados, arsénico y plomo; presenta una concentración de 4.17 mg/kg y 23,33 mg/kg, respectivamente; en el caso de las ninfas no se detectó ninguno de los metales pesados, de igual manera para los lodos estabilizados con óxido de calcio, esto debido a la capacidad floculación y coagulación del óxido de calcio, siendo imperceptible a partir el método de espectrofotometría utilizado.
3. Debido a que la concentración de arsénico en los lodos residuales fue de 4,17 mg/kg y 23,33 mg/kg, no se excedió la concentración de 50 mg/kg respecto al arsénico y 500 mg/kg en función del plomo, de modo que es factible su disposición para el lombricompost, de igual manera en las ninfas y lodos estabilizados con óxido de calcio a causa de la ausencia de los metales pesados mediante las técnicas de cuantificación utilizadas.
4. Se caracterizó la presencia del microorganismo patógeno *Strongyloides Stercoralis*, en los lodos residuales; en el caso de las ninfas se determinó la presencia de *Salmonella*; sin embargo, no se determinó la presencia

de ninguno de los dos especímenes en los lodos estabilizados con óxido de calcio.

5. Se cuantificó el potencial de hidrógeno de los lodos residuales, lodos estabilizados con óxido de calcio, de las ninfas y de la mezcla de lodo estabilizado con óxido de calcio y ninfas, siendo en promedio de 7, 13, 6 y 12, respectivamente; de modo que no es factible la elaboración del lombricompost a partir de la relación másica de un medio de la ninfa triturada con respecto la masa de los lodos estabilizados, debido a que no permanece por debajo de la magnitud de nueve unidades de potencial de hidrógeno.
6. La caracterización de la humedad de los lodos residuales, lodos estabilizados con óxido de calcio y las ninfas tiene una magnitud de 96,5, 64,5 y 95,47, respectivamente; de modo que la capacidad de reducir contenido de humedad del óxido de calcio a los lodos residuales, permite acelerar el proceso de secado de los mismos. Se determinó el porcentaje de humedad de la mezcla entre las ninfas y los lodos estabilizados con óxido de calcio teóricamente dando una magnitud de 79,93.
7. Se caracterizó que la relación de carbono y nitrógeno de los lodos residuales y las ninfas, presentaron una magnitud de 2,72 y 8,53, respectivamente; en el caso de la mezcla de lodo estabilizado con óxido de calcio, ninfas y lombrices se determinó teóricamente dando una magnitud de 8,35.
8. No es factible la elaboración de un lombricompost a partir de la mezcla de lodos residuales estabilizados con óxido de calcio y ninfas a una proporción másica de un medio debido a que las condiciones

fisicoquímicas del medio no permitían la sobrevivencia del espécimen *Eisenia Foetida*, de modo que murió posteriormente a su adicción, requiriendo un medio con un potencial de hidrógeno inferior a 9, habiendo sido de 12.

RECOMENDACIONES

1. Realizar una caracterización empírica para la estimación de la relación másica de la ninfa triturada siendo definida a veinte (20) veces la masa de los lodos residuales estabilizados con óxido de calcio; logra disminuir el potencial de hidrógeno entre ocho (8) a nueve (9) unidades, con finalidad de crear un entorno sostenible para el desarrollo de los especímenes *Eisenia Foetida* (lombriz coqueta roja).
2. Reducir sustancialmente a un menor tamaño las ninfas trituradas con el propósito de promover una correcta homogenización de la mezcla y permitir la captura y alimentación del espécimen *Eisenia Foetida* (lombriz coqueta roja).
3. Realizar una caracterización de la cantidad adecuada para la generación de un lombricompost en función de la cantidad del espécimen *Eisenia Foetida* (lombriz coqueta roja) agregado.
4. Contar con óxido de calcio de alto contenido de calcio por sobre un ochenta y ocho por ciento (88 %), cuente con un porcentaje igual o superior al 88 %, el cual para fines de la investigación se dispuso de la aplicación de la cal Horcalsa de la empresa Cementos Progreso.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALDANA CASASOLA, Elvira Victoria. *Cuantificación de nutrientes (calcio, cobre, fósforo, hierro, magnesio, manganeso, nitrógeno, potasio, sulfato, zinc) y determinación de contaminantes (arsénico, mercurio, plomo, cadmio) en el Jacinto de agua (eichhornia crassipes) del lago de Amatitlán para uso en abono orgánico*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 148 p.
2. ALVARADO CUADRA, Lydiester. *Utilización de Eichhornia Crassipes (jacintos acuáticos) para la remoción de nitratos y fosfatos de un efluente tratado biológicamente*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, 1992. 135 p.
3. ANCADE. *Aplicaciones por producto*. [En línea]. <http://www.ancade.com/Aplicaciones-por-producto_es_2_141_0_8.html>. [Consulta: 28 de noviembre de 2016].
4. Asociación Amigos del Lago de Atitlán. *Saneamiento, aguas residuales*. [En línea]. <<https://www.amigosatitlan.org/es/saneamiento-ambiental>>. [Consulta: 25 de mayo de 2017].
5. BURNHAM, Jeffrey C. Anfacal. *Advanced alkaline stabilization of sewage sludge*. [En línea]. <[http://anfacal.org/pages/usos-y-](http://anfacal.org/pages/usos-y)

aplicaciones-de-la-cal/usos-ecologicos/tratamientos-de-lodos.php>. [Consulta: 30 de junio de 2016.]

6. CANO, Manuel. *Preparación de sustrato para pie de cría Eisena Foetida L.* Guatemala: Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), 2017. 124 p.
7. CARREIRA, Daniel. *agroindustria.gob.ar.* [En línea]. <[http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/proinsa/informes/_archivos//002010_Ronda%202010/000003_Ing.%20Agr.%20Daniel%20Carreira%20\(Carbono%20oxidable%20y%20Nitr%C3%B3geno\)/000008_Carbono%20oxidable%20M%C3%A9todo%20de%20Walkley&Black-%20%20y%20en%20Nit](http://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/proinsa/informes/_archivos//002010_Ronda%202010/000003_Ing.%20Agr.%20Daniel%20Carreira%20(Carbono%20oxidable%20y%20Nitr%C3%B3geno)/000008_Carbono%20oxidable%20M%C3%A9todo%20de%20Walkley&Black-%20%20y%20en%20Nit)>. [Consulta: 30 de noviembre de 2016].
8. DELGADILLO, Oscar. *Depuración de aguas por medio de humedales.* infoandina.org. [En línea]. <http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf>. [Consulta: 28 de noviembre de 2016].
9. DIAZ, Eduardo. *biblioteca.org.ar.* [En línea]. <<http://www.biblioteca.org.ar/LIBROS/88761.pdf>>. [Consulta: 30 de noviembre de 2016].
10. Gobierno de Guatemala. *Acuerdo Gubernativo 236-2006.* chmguatemala. [En línea]. <www.gob.gt/images/legislacion/Legislación%20sobre%20Diversidad%20Biológica%20y%20Ambie>

nte/Acuerdo_Gubernativo_2362006_de_disposici_n_de_aguas_re
siduales_1.pdf>. [Consulta: 30 de junio de 2016].

11. HORCALSA. *Proceso de elaboración de cal*. [En línea]. <<http://horcalsa.com/proceso-de-elaboracion-de-cal/>>. [Consulta: 28 de noviembre de 2016].
12. JOHNSON, Richard A. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. México: Pearson, 2012. 314 p.
13. KIELY, Gerard. *Ingeniería ambiental, fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Madrid, España: McGraw-Hill, 1999. 218 p.
14. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Investigación de la caracterización del Jacinto de agua *Eichornia crassipes* del humedal Cerró Grande, para determinar su aprovechamiento como materia prima en la elaboración de productos, agorindustriales, industriales o artesanales*. [En línea]. <http://www.fiaes.org.sv/library/1920905875_20150216014513.pdf>. [Consulta: 30 de noviembre de 2016].
15. MÉNDEZ CONTRERAS, Juan Manuel. *Anfacal. Efecto del amoniaco en la estabilización alcalina de lodos residuales*. [En línea]. <<http://anfacal.org/pages/usos-y-aplicaciones-de-la-cal/usos-ecologicos/tratamientos-de-lodos.php>>. [Consulta: 30 de junio de 2016].

16. MENDOZA, Francisco José Colomer. *Tratamiento y gestión de residuos sólidos*. México: LIMUSA, 2007. 446 p.
17. METCALF & EDDY Inc. *Ingeniería de aguas residuales*. México: McGraw-Hill, 1996. 841 p.
18. OROZCO JARAMILLO, Álvaro. *Bioingeniería de aguas residuales*. Colombia: Acodal, 2014. 126 p.
19. PÉREZ RIOS, Roger Berliér. *Diseño de investigación para la evaluación de dos alternativas en la generación de compost con ninfa acuática (eicchornia crassipes)*. [En línea]. <http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1370_Q.pdf>. [Consulta: 3 de noviembre de 2016.]
20. QUECHE SETENA, Gabriel. *Página de inicio, Santa Catarina Palopó*. [En línea]. <<http://www.santacatarina.palopo.info/index.html>>. [Consulta: 25 de mayo de 2017].
21. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. mwa.co.th. [En línea]. <http://www.mwa.co.th/download/file_upload/SMWW_1000-3000.pdf>. [Consulta: 30 de noviembre de 2016].
22. TCHOBANOGLIOUS, George. *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, 2000. 641 p.

23. TREJOS VÉLEZ, Mariana. & AGUDELO CARDONA, Natalia. *Propuesta para el aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa Comestible La Rosa como alternativa para la generación de biosólidos*. scielo. [En línea]. <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000300011>. [Consulta: 22 de noviembre de 2016].

ANEXOS

Anexo 1. Artículos del 40 al 45 del Acuerdo Gubernativo 236-2006

Artículo 40. TECNOLOGÍA Y SISTEMAS PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS. Se permite el tratamiento de los lodos por medio de la tecnología o los sistemas que el ente generador considere más adecuados a sus condiciones particulares, incluyendo la incineración a temperaturas mayores de mil quinientos grados Celsius.

Artículo 41. DISPOSICIÓN FINAL. Se permite efectuar la disposición final de lodos, por cualesquiera de las siguientes formas:

- a) Aplicación al suelo: acondicionador, abono o compost;
- b) Disposición en rellenos sanitarios;
- c) Confinamiento o aislamiento; y,
- d) Combinación de las antes mencionadas.

Artículo 42. PARÁMETROS Y LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LODOS. Para poder efectuar la disposición final de lodos de acuerdo a las formas descritas en el artículo 41 del presente Reglamento, los valores de sus propiedades fisicoquímicas no deben exceder los límites máximos permisibles descritos en el siguiente cuadro:

Disposición Final	Dimensionales	Aplicación al suelo	Disposición en rellenos sanitarios	Confinamiento o aislamiento
Arsénico	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	50	100	> 100
Cadmio	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	50	100	> 100
Cromo	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	1500	3000	> 3000
Mercurio	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	25	50	> 50
Plomo	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	500	1000	> 1000

Los expresados en el cuadro anterior son los límites máximos permisibles para suelos con potencial de hidrógeno menor que siete unidades. En los suelos que posean potencial de hidrógeno mayor o igual que siete unidades se podrán disponer lodos hasta un cincuenta por ciento más de los valores presentados como límites máximos permisibles.

Artículo 43. APLICACIÓN AL SUELO. Los lodos que presenten metales pesados y que se ajusten a los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 42, podrán disponerse como acondicionador del suelo, en cuyo caso se permitirá disponer hasta doscientos mil kilogramos por hectárea por año. En caso de que la aplicación sea como abono se permitirá disponer hasta cien mil kilogramos por hectárea por año.

Artículo 44. DISPOSICIÓN HACIA RELLENOS SANITARIOS. Se permitirá la disposición en un relleno sanitario de los lodos que no sean bioinfecciosos, que no requieran confinamiento y que cumplan con los límites máximos permisibles del artículo 42 del presente Reglamento.

Los rellenos sanitarios deberán contar con autorización del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y con aval del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social.

Artículo 45. CONFINAMIENTO O AISLAMIENTO. Los lodos que en su estructura posean compuestos que requieran confinamiento o aislamiento para evitar el impacto adverso del manto freático, las fuentes de suministro de agua superficiales y subterráneas, el suelo, subsuelo y el aire, deben disponerse en recintos que posean autorización del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y el aval de los Ministerios de Salud Pública y Asistencia Social y de Energía y Minas.

Fuente: Gobierno de Guatemala. *Acuerdo gubernativo 236-2006.*

www.20.gob.gt/images/legislacion/Legislación%20sobre%20Diversidad%20Biológica%20y%20Ambiente/Acuerdo_Gubernativo_2362006_de_disposici_n_de_aguas_residuales_1.pdf

Consulta: 30 de junio de 2016.

Anexo 2. Artículos del 46 al 48 del Acuerdo Gubernativo 236-2006

Artículo 46. COMERCIALIZACIÓN. La comercialización de los lodos producidos es libre, siempre que los mismos se caractericen y se cumpla con los tratados y convenios internacionales que rijan en la materia ratificados por Guatemala y con lo siguiente:

- a) No debe permitirse el contacto humano directo con los lodos.
- b) Los lodos deben cumplir las especificaciones descritas en el artículo 42.
- c) El transporte de lodos debe realizarse en recipientes y vehículos acondicionados para evitar fugas y derrames.
- d) Los recintos para su almacenamiento transitorio deben ser autorizados para el efecto por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
- e) Las empresas que presten los servicios de extracción, manejo o disposición final deben contar con la autorización del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, y si es aplicable del Ministerio de Energía y Minas.

Artículo 47. CONTRATACIÓN DE SERVICIOS. Las empresas que presten los servicios de extracción, manejo o disposición final de lodos deberán cumplir lo dispuesto en los artículos 41, 42, 43, 44, 45 y 46 del presente Reglamento. En el caso de la contratación de cualquiera de los servicios establecidos en este artículo, el ente generador queda exento de responsabilidad.

Artículo 48. VIGILANCIA DE CUMPLIMIENTO. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales coordinará a través de sus dependencias la realización, a su costa, de muestreos aleatorios de los lotes de lodos que sean dispuestos, a efecto de verificar el cumplimiento de los parámetros del artículo 42 del presente Reglamento, cuando sea aplicable.

Fuente: Gobierno de Guatemala. *Acuerdo gubernativo 236-2006.*

www.20.gob.gt/images/legislacion/Legislación%20sobre%20Diversidad%20Biológica%20y%20Ambiente/Acuerdo_Gubernativo_2362006_de_disposici_n_de_aguas_residuales_1.pdf.

Consulta: 30 de junio de 2016.

Anexo 3. Ficha técnica de la materia prima óxido de calcio cal viva Horcalsa

HORCALSA

Óxido de Calcio

Hoja técnica



Óxido de calcio (CaO), conocido comúnmente como cal quemada, cal o cal viva, es un compuesto químico utilizado ampliamente. Es un blanco, y alcalino cáustico sólido cristalino a temperatura ambiente. Como un producto comercial, a menudo también contiene pequeñas cantidades de óxido de magnesio, óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro.

Óxido de calcio es generalmente hecha por la descomposición térmica de los materiales como la piedra caliza, que contienen carbonato de calcio (CaCO₃; nombre minerales: calcita) en un horno de cal. Esto se logra calentando el material por encima de 900°C, un proceso llamado calcinación, para liberar a una molécula de dióxido de carbono (CO₂), dejando de CaO. Este proceso es reversible, ya que una vez que el producto se haya enfriado la cal viva, de inmediato comienza a absorber el dióxido de carbono desde el aire, hasta que después de un tiempo, se convierten de nuevo por completo a carbonato de calcio.

IDENTIFICACIÓN

Nombre Químico:	Óxido de Calcio
Nombre Comercial:	Óxido de Calcio, Cal viva
Número de Registro CAS:	1305-78-8
Composición:	CaO
Peso Molecular:	56.08

Fuente: CARBALLO GARCÍA, Marco Vinicio. *Horcalsa*. p. 1.

Anexo 4. **Ficha técnica de la materia prima óxido de calcio cal viva**
Horcalsa

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Estado físico:	Sólido
Color:	Blanco
Olor:	Inodoro
pH:	12,5 en solución saturada de agua 20°C Concentración 1.65 g/l
Punto de fusión:	2,57°C (4661.6°F)
Punto de Ebullición	2,850 °C (5162 °F)
Gravedad Específica:	3.33 (Agua 1)
Ionicidad (en agua):	No aplica
Presión de Vapor:	No aplica
Solubilidad:	No soluble en agua. Soluble en ácidos gliceroles y soluciones de sucrosa.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Óxido de Calcio		
Composición Porcentual	Porcentaje (peso/peso) %	Desviación Estándar
Óxido de Silicio (SiO ₂)	1.46	0.14
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	0.19	0.02
Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	0.27	0.10
Óxido de Calcio (CaO)	90.03	0.97
Óxido de Calcio disponible (CaO)	88.62	0.17
Óxido de Magnesio (MgO)	3.60	0.29
Óxido de Potasio (K ₂ O)	0.05	0.01
Óxido de Sodio (Na ₂ O)	0.02	0.00
Pérdida de Fuego (LOI 950°C)	4.11	0.67

HORCALSA

www.horcalsa.com
 Diagonal 6 10-01 Zona 10, Edificio Las Margaritas.
 Guatemala, Guatemala.
 Tel. (502) 2368 8700 / (502) 1-801-CEMENTO (502-1-801-236 8686)

Fuente: CARBALLO GARCÍA, Marco Vinicio. *Horcalsa*. p. 2.