



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

**PROPUESTA DE PLAN DE APROVECHAMIENTO SANITARIAMENTE VIABLE DE LOS
Lodos GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL
MUNICIPIO DE SAN MARCOS LA LAGUNA, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ**

Karla Rocío Cap López

Asesorada por el Ing. Jaime Domingo Carranza González

Guatemala, febrero de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE PLAN DE APROVECHAMIENTO SANITARIAMENTE VIABLE DE LOS
Lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales del
Municipio de San Marcos La Laguna, Departamento de Sololá**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

KARLA ROCÍO CAP LÓPEZ

ASESORADA POR EL ING. JAIME DOMINGO CARRANZA GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA AMBIENTAL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
EXAMINADOR	Ing. Manuel Alfredo Arrivillaga Ochaeta
EXAMINADORA	Inga. Márilyn Caribel Rojas Maldonado
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

**PROPUESTA DE PLAN DE APROVECHAMIENTO SANITARIAMENTE VIABLE DE LOS
LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL
MUNICIPIO DE SAN MARCOS LA LAGUNA, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 13 de abril de 2021.



Karla Rocío Cap López

Guatemala, 13 de febrero de 2023

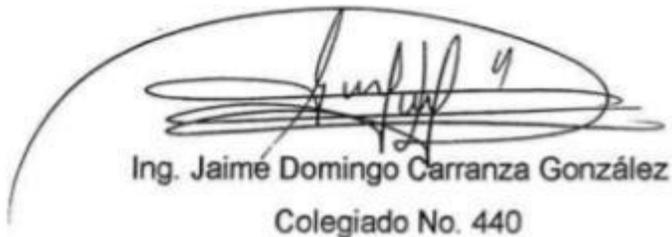
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Williams:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final, en modalidad EPS (6 meses) con seminario de investigación, del trabajo de graduación titulado: PROPUESTA DE PLAN DE APROVECHAMIENTO SANITARIAMENTE VIABLE DE LOS LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE SAN MARCOS LA LAGUNA, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ, elaborado por la estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, Karla Rocío Cap López, quien se identifica con el registro académico 2016-03048 y con el CUI 3110 61869 04 07.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. Jaime Domingo Carranza González
Colegiado No. 440

Jaime Domingo Carranza González
ASESOR
Ingeniero Químico
Colegio activo No. 440



Nombre del estudiante: KARLA ROCIO CAP LÓPEZ

Registro universitario (Carné): 2016 03048

CUI: 3110648690407

Carrera: Ingeniería Ambiental

Por este medio se le informa que el día 30 de octubre de 2022 se clausura de forma oficial el programa de EPS, iniciado el 15 de febrero de 2021 y que realizó en la Municipalidad de San Marcos La Laguna, Sololá en conjunto con la Autoridad de Manejo Sostenible de la Cuenca del Lago de Atitlan y sus entornos (AMSCLAE), indicando que doy por aprobado el trabajo el cual está totalmente satisfactorio.

Se le recuerda, que de acuerdo al Normativo vigente:

- a. Artículo 26o. literal a, se fija como tiempo máximo para la entrega del informe final de EPS sesenta (60) días calendario a partir de la fecha de clausura oficial del proyecto.
- b. Artículo 38º. Se establece como tiempo máximo para obtener las cartas de aprobación del informe final de EPS, un año calendario, a partir de la fecha de clausura oficial del programa de EPS, de lo contrario se procederá a invalidar a dicho programa y tendrá que buscar otra alternativa de graduación y/o someterse a un nuevo programa de EPS.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Asesor-supervisor de EPS

Original: Control Académico
Copia1: estudiante
Copia 2: Asesor(a)-supervisor(a)

Universidad de San Carlos de
Guatemala



Facultad de Ingeniería
Unidad de EPS

Guatemala, 22 de agosto de 2023.
Ref.EPS.D.256.08.2023.

Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Álvarez Mejía:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"PROPUESTA DE PLAN DE APROVECHAMIENTO SANITARIAMENTE VIABLE DE LOS LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE SAN MARCOS LA LAGUNA, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ"** que fue desarrollado por la estudiante universitaria **Karla Rocío Cap López**, quien fue debidamente asesorada por el Ing. Jaime Domingo Carranza González y supervisada por el Ingeniero **Manuel Alfredo Arrivillaga Ochaeta**.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor y del Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Oscar Argueta Hernández
Director

OAH/ra



Guatemala, 08 de noviembre de 2023.
Ref. EIQ.TG-IF.031.2023.

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **063-2020**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Karla Rocío Cap López**.
Identificado con número de carné: **3110618690407**.
Identificado con registro académico: **201603048**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Ambiental**.
En la modalidad: **EJERCICIO PROFESIONAL SUPERVISADO (Informe Final EPS (6 meses), Seminario de Investigación)**.

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:

PROPUESTA DE PLAN DE APROVECHAMIENTO SANITARIAMENTE VIABLE DE LOS LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE SAN MARCOS LA LAGUNA, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Jaime Domingo Carranza González, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido 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"



Carlos Salvador Wong Davi
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
COLEGIADO. NO. 561





SIST.LNG.DIRECTOR.1.EIQ.2024

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE PLAN DE APROVECHAMIENTO SANITARIAMENTE VIABLE DE LOS LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE SAN MARCOS LA LAGUNA, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ**, presentado por: **Karla Rocío Cap López**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

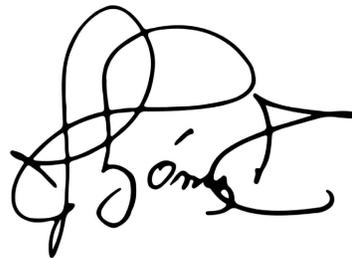
“Id y Enseñad a Todos”

Ingeniero Williams Guillermo Alvarez Mejia
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, febrero de 2024

El Decano 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: **PROPUESTA DE PLAN DE APROVECHAMIENTO SANITARIAMENTE VIABLE DE LOS LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE SAN MARCOS LA LAGUNA, DEPARTAMENTO DE SOLOLÁ**, presentado por: **Karla Rocío Cap López** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Firmado electrónicamente por: José Francisco Gómez Rivera
Motivo: Orden de impresión
Fecha: 04/02/2024 12:18:29
Lugar: Facultad de Ingeniería, USAC.

Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, febrero de 2024

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres	Olga López y Marvin Cap. Por su amor y apoyo incondicional.
Mis hermanos	Olga y Andrés Cap. Por ser tan ocurrentes y alegrar mis días.
Mis abuelas/os	Por luchar por sus ideales, permitirme estar donde estoy y ser mi fuente de inspiración para seguir adelante.
Mi familia	Por compartirme sus experiencias y darme ánimos.
Amigos de la facultad	Celeste Godínez, Fernanda Morataya, Ana Pinot, Rodrigo Ramírez, Gerardo Leche, Juan Manuel Barrios, Karla Heer, Alejandra García y todos con quienes tuve el gusto de compartir. Por su compañerismo y amistad. Serán grandes profesionales.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por permitirme continuar mis estudios superiores guiados por grandes profesionales.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme la formación académica necesaria para desenvolverme en el ámbito profesional de la Ingeniería Ambiental.
Mi asesor	Por el acompañamiento y la asesoría en la realización del presente trabajo de graduación.
AMSCLAE	Por brindarme su valioso apoyo y permitirme realizar mi Ejercicio Profesional Supervisado en dicha institución en compañía de grandes profesionales y amigos.
ICTA	Por el gran apoyo para la realización de una parte importante de los análisis de laboratorio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Determinación del problema.....	3
1.3.1. Definición.....	3
1.3.2. Delimitación.....	4
1.4. Fundamento legal.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. San Marcos La Laguna.....	9
2.1.1. Demografía.....	9
2.1.2. Actividades socioeconómicas.....	9
2.1.3. Fuente principal de agua para consumo humano....	10
2.1.4. Aguas residuales.....	10
2.2. Plantas de tratamiento de aguas residuales.....	10
2.2.1. Tratamiento primario.....	11
2.2.2. Tratamiento secundario.....	11
2.2.3. Tratamiento terciario.....	12

2.3.	Planta de tratamiento de aguas residuales de San Marcos La Laguna, Barrio 2.....	12
2.4.	Composición y características de los lodos no estabilizados ...	13
2.5.	Tratamiento de lodos.....	14
2.5.1.	Métodos de estabilización de lodos	15
2.5.1.1.	Digestión anaerobia.....	15
2.5.1.2.	Digestión aerobia.....	16
2.6.	Aprovechamiento de lodos en el suelo	17
2.6.1.	Características físicas	18
2.6.1.1.	Textura	18
2.6.1.2.	Porosidad	18
2.6.2.	Características químicas	19
2.6.2.1.	Materia orgánica	19
2.6.2.2.	Potencial de hidrógeno	20
2.6.2.3.	Conductividad eléctrica.....	20
2.6.2.4.	Macroelementos nutritivos	21
2.6.2.4.1.	Nitrógeno	21
2.6.2.4.2.	Fósforo	22
2.6.2.4.3.	Potasio.....	22
2.6.2.4.4.	Sodio	22
2.6.2.4.5.	Calcio	23
2.6.2.4.6.	Magnesio	23
2.6.2.5.	Metales pesados.....	23
2.6.2.5.1.	Plomo	23
2.6.2.5.2.	Mercurio.....	24
2.6.2.5.3.	Cadmio	24
2.6.2.5.4.	Arsénico.....	24
2.6.2.5.5.	Cromo hexavalente.....	24
2.6.3.	Características microbiológicas	25

3.	METODOLOGÍA	27
3.1.	Variables	27
3.1.1.	Características físicas	27
3.1.1.1.	Textura.....	27
3.1.1.2.	Porosidad.....	28
3.1.2.	Características químicas.....	28
3.1.2.1.	Conductividad eléctrica	29
3.1.2.2.	Potencial de hidrógeno.....	29
3.1.2.3.	Metales pesados	29
3.1.2.4.	Macronutrientes	30
3.1.2.4.1.	Nitrógeno total (N)	30
3.1.2.4.2.	Fósforo total (P)	31
3.1.2.5.	Materia orgánica	31
3.1.3.	Características microbiológicas.....	31
3.1.3.1.	Coliformes fecales.....	32
3.1.3.2.	Huevos de helmintos.....	32
3.2.	Delimitación de campo de estudio	33
3.3.	Recursos humanos disponibles	33
3.4.	Recursos institucionales	33
3.5.	Técnicas cuantitativas	33
3.5.1.	Metales pesados	34
3.5.2.	Nitrógeno total.....	34
3.5.3.	Fósforo total	35
3.5.4.	Materia orgánica	35
3.5.5.	Coliformes fecales	35
3.5.6.	Huevos de helmintos.....	36
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	36
4.	RESULTADOS.....	39

4.1.	Descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales	39
4.2.	Caracterización física de los lodos	42
4.3.	Características químicas de los lodos	43
4.4.	Características microbiológicas de los lodos	45
4.5.	Prueba de estabilización alcalina de los lodos	46
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	49
6.	LOGROS OBTENIDOS	53
	CONCLUSIONES	55
	RECOMENDACIONES	57
	REFERENCIAS.....	59
	APÉNDICES	67
	ANEXOS	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Ubicación de los barrios de San Marcos La Laguna	5
Figura 2.	Plano de localización y ubicación de la PTAR.....	6
Figura 3.	Huevos de helmintos observados en los lodos	47
Figura 4.	pH en pruebas de estabilización alcalina en lodos	48
Figura 5.	Nutrientes en lodos y fertilizantes sintéticos más comunes en Guatemala	51

TABLAS

Tabla 1.	Caracterización y composición de lodos.....	13
Tabla 2.	Interpretación de la porosidad de un suelo	28
Tabla 3.	Parámetros y límites máximos permisibles para lodos	30
Tabla 4.	Métodos para el análisis de metales pesados en lodos	34
Tabla 5.	Plan de muestreo de lodos	37
Tabla 6.	Descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales	39
Tabla 7.	Caracterización física de los lodos	42
Tabla 8.	Conductividad eléctrica y potencial de hidrógeno de lodos.....	43
Tabla 9.	Macronutrientes y materia orgánica de los lodos.....	43
Tabla 10.	Metales pesados en muestra de lodos residuales	44
Tabla 11.	Características microbiológicas en los lodos	45

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Gramo
H/g ST	Helminetos por gramo de sólidos totales
h	Hora
Kcal	Kilocaloría
μS/cm	Micro Siemens por centímetro
mg/kg	Miligramo por kilogramo
mg/L	Miligramo por litro
mL	Mililitros
NMP	Número más probable
ppm	Partes por millón
UFC/kg	Unidades formadoras de colonias por kilogramo

GLOSARIO

Aerobio	Que necesita oxígeno para subsistir.
Afluente	De la planta de tratamiento. Agua captada por una planta de tratamiento de aguas residuales.
AMSCLAE	Autoridad para el Manejo Sustentable para la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno.
Anaerobio	Que puede vivir sin oxígeno.
Barbecho	Tierra, que es de cultivo, que no se siembra durante uno o más años.
Base húmeda	Proporción calculada con base en la masa húmeda de una sustancia.
Base seca	Proporción calculada con base en la masa anhidra, o sin agua, de una sustancia.
Biosólidos	Lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que, por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento.

DICA	Departamento de Investigación y Calidad Ambiental de la AMSCLAE.
DSA	Departamento de Saneamiento Ambiental de la AMSCLAE.
Efluente	De la planta de tratamiento. Flujo de salida del agua residual tratada.
FAUSAC	Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
Helminto	Gusano, en especial el que es parásito del hombre y de los animales.
ICTA	Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola
Inactivación	De huevos de helmintos. Proceso mediante el cual los huevos de helmintos pierden su viabilidad, es decir, su capacidad de desarrollarse e infectar.
Intercambiable	Cationes o aniones intercambiables. Son aquellos elementos o compuestos presentes en el suelo con carga positiva o negativa que se disocian o disuelven en el agua y que forman la solución del suelo.
Lixiviados	Líquido proveniente de los lodos y biosólidos que se forma por reacción o percolación y que contiene contaminantes disueltos o en suspensión.

LMP	Límite máximo permisible
Macroelemento	Son aquellos elementos nutritivos absorbidos por las plantas en mayores cantidades. En este grupo se incluye el nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio y magnesio.
Meteorización	Descomposición de minerales y rocas que ocurre sobre o cerca de la superficie terrestre cuando estos entran en contacto con la atmósfera, hidrosfera y la biósfera. Desempeña un papel importante en la creación de suelos.
Mineralización	Proceso bioquímico mediante el cual los microorganismos del suelo obtienen la energía necesaria para realizar sus procesos metabólicos a partir de las macromoléculas orgánicas.
pH	Potencial de hidrógeno.
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales.
SBR	<i>Sequencing batch reactor</i> , por sus siglas en inglés, o reactores secuenciales discontinuos.

RESUMEN

El municipio de San Marcos La Laguna, departamento de Sololá, cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que opera mediante la tecnología de Reactores Secuenciales Discontinuos (*Sequencing Batch Reactor*, SBR), sin embargo, los lodos generados se disponen en lugares inadecuados, donde se acumulan y representan un riesgo al ambiente y a la salud pública. Por lo anterior, es necesario un plan de gestión para la disposición final adecuada de los lodos.

Debido a los altos contenidos de materia orgánica y nutrientes, los lodos tienen potencial para ser aprovechados en el acondicionamiento de los suelos, sin embargo, el contenido de metales pesados y de microorganismos patógenos es un factor que debe tomarse en cuenta y analizarse para que no represente una fuente de contaminación al suelo, subsuelo, agua subterránea y alimentos, y, por consiguiente, un riesgo a la salud.

Este proyecto plantea generar una propuesta de plan de aprovechamiento sanitariamente viable de los lodos residuales dirigida a la Municipalidad de San Marcos La Laguna, para lo cual se realizó una caracterización de estos para determinar si pueden disponerse en el suelo, tomando como referencia los parámetros establecidos en la legislación nacional vigente y otras normas internacionales.

OBJETIVOS

General

Proponer un plan de aprovechamiento sanitariamente viable de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de San Marcos La Laguna, departamento de Sololá.

Específicos

1. Describir la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de San Marcos La Laguna.
2. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de San Marcos La Laguna.
3. Determinar la capacidad de aprovechamiento sanitariamente viable de los lodos en el suelo.
4. Elaborar un plan para el manejo adecuado de los lodos, dirigido a los operadores de la planta.

INTRODUCCIÓN

Una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) es un conjunto de estructuras cuya función es remover sólidos, restaurar el contenido de oxígeno y reducir la materia orgánica y los contaminantes presentes en el agua que ha sido aprovechada para diversos fines, domésticos o industriales. Como resultado de este proceso se obtienen subproductos, como los lodos.

Los lodos son sólidos con cierto contenido de humedad compuestos por los contaminantes removidos de las aguas residuales y los agentes utilizados para su remoción. Según sus características, pueden contribuir a mejorar las propiedades químicas, físicas y microbiológicas de los suelos una vez hayan sido estabilizados.

No obstante, debe considerarse la presencia de metales pesados y microorganismos patógenos en los lodos, ya que estos representan un riesgo a la salud pública y los ecosistemas.

En este trabajo se presentan los procesos relacionados a la estabilización de lodos, las características fisicoquímicas y microbiológicas de lodos óptimos para su aprovechamiento en el suelo, así como el desarrollo de una metodología para la propuesta de un plan de aprovechamiento sanitariamente viable de los lodos de la PTAR de San Marcos La Laguna, Sololá.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

Hasta la fecha, en Guatemala no existen proyectos de aprovechamiento de los lodos estabilizados generados en plantas de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, sí hay investigaciones sobre el potencial uso de estos como acondicionadores del suelo.

Ramírez (2007) evaluó la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales sanitarias industriales de una industria farmacéutica de Guatemala. Con base en las características del agua tratada y de los lodos generados, determinó que estos pueden ser utilizados como fertirriego y fertilizantes, respectivamente, debido a que los nutrientes que poseen son propicios para la recuperación y mejoramiento del suelo, así como para el crecimiento de las plantas.

Por otro lado, Flores (2018) realizó un análisis de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Rafael Landívar con la finalidad de conocer el potencial de estos para su aprovechamiento como abono orgánico. En dicho estudio, determinó que tales lodos cumplen con los parámetros de contenido de metales pesados que dicta el Acuerdo Gubernativo 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, sin embargo, no cumplen con los límites máximos permisibles de contenido microbiológico, por lo que Flores recomendó realizar un período más largo de estabilización de los lodos, o bien modificar la metodología de tratamiento de lodos.

Posteriormente, Castro *et. al.* (2020) evaluaron la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales Los Cebollales en Panajachel, Sololá y caracterizaron los lodos residuales generados. Determinaron la concentración de los parámetros de metales pesados, como arsénico, cadmio, cromo, plomo y mercurio, y concluyeron que los lodos residuales generados cumplen con los parámetros establecidos en el artículo 42 del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, para su aplicación al suelo.

1.2. Justificación

El Barrio 2 de San Marcos La Laguna cuenta con una PTAR que opera mediante la tecnología de Reactores Secuenciales Discontinuos (SBR). Los lodos residuales generados son estabilizados en un digestor aerobio y luego dispuestos en un patio de secado de lodos.

Sin embargo, en esta PTAR existe una serie de factores que contribuyen a que este subproducto represente un problema ambiental y de salud pública: prácticas inadecuadas en el proceso de deshidratación de los lodos, desconocimiento de sus características fisicoquímicas y microbiológicas y, por consiguiente, desconocimiento de formas adecuadas para su disposición final.

Esta problemática no sólo está presente en la PTAR de San Marcos La Laguna, sino también afecta a las plantas de tratamiento de los municipios aledaños, no obstante, al conocer las características de los lodos residuales es posible proponer un plan de gestión y aprovechamiento de estos, tal que otras municipalidades puedan tomar dicha propuesta como guía para crear planes de manejo de lodos e implementarlos en su jurisdicción.

1.3. Determinación del problema

A continuación, se define el problema que representa la gestión inadecuada de los lodos residuales, así como la delimitación espacial de este.

1.3.1. Definición

La planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de San Marcos La Laguna, según el último monitoreo realizado por la AMSCLAE, cumple con los parámetros de la legislación vigente para descargas de aguas residuales en la cuenca del Lago de Atitlán, sin embargo, en el informe hay algunas recomendaciones en cuanto al manejo de los lodos que deben ser tomadas en cuenta para evitar riesgos al ambiente y a la salud (AMSCLAE, 2019).

Los lodos generados en la PTAR se encuentran estabilizados por digestión aerobia y posteriormente son dispuestos en el patio de secados, sin embargo, debido a que no se cuenta con una disposición final adecuada o algún tipo de aprovechamiento de estos, los lodos secos son constantemente mezclados con aquellos que se van generando. De esta manera, se acumulan grandes volúmenes de lodos y se retrasa el período de secado, el cual llega a tardar hasta 4 meses.

Su disposición a cielo abierto puede tener como resultado la contaminación del suelo, agua subterránea o atracción de vectores, que además representa problemas a la salud pública (Oropeza, 2006).

En los apéndices 1, 2 y 3 se presentan los análisis de la problemática por medio de la metodología de árbol de problemas, la identificación de los objetivos y el diagrama de flujo de la metodología para cumplirlos.

1.3.2. Delimitación

El municipio de San Marcos la Laguna del Departamento de Sololá, se localiza a 140 kilómetros al occidente de la ciudad de Guatemala, con la que se comunica por medio de la carretera CA-1 Ruta Interamericana. Se encuentra situado en la parte central del departamento de Sololá, en la Región VI o Región Suroccidental, colinda al norte con Santa Lucía Utatlán, al Oeste con San Pablo la Laguna, al Sur con el Lago de Atitlán y al Este con Santa Cruz La Laguna.

La cabecera municipal está asentada en la parte baja a una altitud de 1,640 msnm y su punto más alto está a 2,960 msnm, que es el Cerro San Marcos. Tiene una Latitud de 14° 43' 32" N y una Longitud de 91° 15' 26" O, lo componen tres barrios (ver Figura 1), en los cuales están asentados aproximadamente 3,398 habitantes, siendo en su mayoría de etnia Maya (Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento de España, 2015).

Figura 1.

Ubicación de los barrios de San Marcos La Laguna

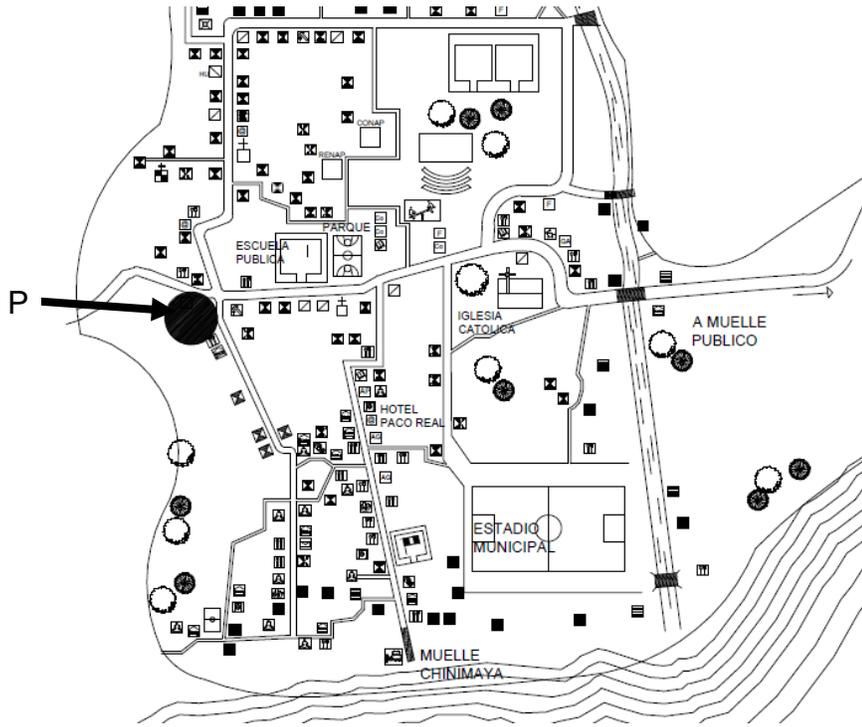


Nota. Imagen satelital del municipio de San Marcos La Laguna y la ubicación de los barrios que lo componen. Obtenido de Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento de España (2015). *Diseño, construcción y explotación de la planta de tratamiento de aguas residuales del barrio 2 de San Marcos La Laguna, Sololá, Guatemala, utilizando la tecnología de reactores secuenciales.* (http://www.guatecompras.gt/concursos/files/880/4396669%40TDRs%20PTAR%20Manclalaguna_nov2015.pdf), consultado el 10 de noviembre de 2020. De dominio público.

La planta de tratamiento de aguas residuales se encuentra ubicada en el Barrio 2, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2.

Plano de localización y ubicación de la PTAR



Nota. Plano de la ubicación y localización de la PTAR en San Marcos La Laguna. Obtenido de Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento de España (2015). *Diseño, construcción y explotación de la planta de tratamiento de aguas residuales del barrio 2 de San Marcos La Laguna, Sololá, Guatemala, utilizando la tecnología de reactores secuenciales.* (http://www.guatecompras.gt/concursos/files/880/4396669%40TDRs%20PTAR%20Manclalaguna_nov2015.pdf), consultado el 10 de noviembre de 2020. De dominio público.

1.4. Fundamento legal

En el Acuerdo Gubernativo No. 12-2011 Reglamento de Descargas de Aguas Residuales en la Cuenca del Lago de Atitlán no se regula el reúso de lodos generados en las PTAR, sin embargo, en su artículo 20 se menciona que lo no dispuesto expresamente en el presente reglamento se aplicará el Acuerdo

Gubernativo número 236-2006, Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos; el Acuerdo Gubernativo número 431-2007, Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental.

Por lo anterior, se utilizó el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos (ver Anexo 2) para determinar, con base en los parámetros allí establecidos de metales pesados y contenido de coliformes, si los lodos estabilizados generados en la PTAR de San Marcos La Laguna pueden ser aprovechados como acondicionadores del suelo. En función de ello, se realizó un plan para el aprovechamiento de los lodos en el suelo.

Aunque el acuerdo gubernativo antes mencionado no reglamenta el contenido de huevos de helmintos, debido al alto impacto de estos microorganismos en la salud pública, se tomó como referencia la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 para determinar si los lodos son aptos para aprovecharlos mediante su aplicación al suelo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. San Marcos La Laguna

Algunos de los aspectos relevantes para la comprensión de la problemática antes descrita, son la demografía, las actividades socioeconómicas, la fuente principal de abastecimiento de agua para consumo humano y la gestión de las aguas residuales, en el municipio de San Marcos La Laguna.

2.1.1. Demografía

San Marcos La Laguna tiene una población de 2,617 habitantes de los cuales 1,253 son hombres y 1,364 mujeres. Aproximadamente el 97 % de la población, es decir 2,548 habitantes, pertenece al pueblo maya (Instituto Nacional de Estadística Guatemala, 2019).

2.1.2. Actividades socioeconómicas

El comercio es de bajo impacto en la economía de San Marcos La Laguna. Por la ubicación del municipio, se considera como lugar turístico, ya que lo visitan 600 turistas mensuales promedio. Existen 13 hoteles y 14 restaurantes (Galdámez, 2008).

Las actividades productivas del municipio de San Marcos La Laguna, se enfocan principalmente en la agricultura. Además, existe la actividad pecuaria, artesanal, turística y de servicios (Galdámez, 2008).

2.1.3. Fuente principal de agua para consumo humano

En el municipio hay 545 hogares, de los cuales 220 se abastecen de agua potable que llega en tubería hasta las viviendas, 322 cuentan con tubería fuera de la vivienda y 2 se abastecen de chorros públicos (Instituto Nacional de Estadística Guatemala, 2019).

2.1.4. Aguas residuales

Para el año 2013, San Marcos La Laguna vertía al Lago de Atitlán un caudal de 9 L/s de aguas residuales sin tratar (Romero, 2013, como se citó en Ferráns *et. al.*, 2018).

Posteriormente, en 2018 fue puesta en marcha una planta de tratamiento de aguas residuales en el Barrio 2. De acuerdo con Castro (2020), el caudal del afluente de dicha planta es de 2.46 L/s, mientras que el de descarga, que ocurre en el subsuelo a través de un pozo de absorción, es de 1.50 L/s.

2.2. Plantas de tratamiento de aguas residuales

Una planta de tratamiento de aguas residuales es un conjunto de estructuras cuya función es remover sólidos, restaurar el contenido de oxígeno y reducir la materia orgánica y los contaminantes presentes en el agua que ha sido aprovechada para diversos fines, domésticos o industriales. El proceso para tratar las aguas residuales se divide en las siguientes operaciones unitarias, que se caracterizan por el tipo de contaminante removido.

2.2.1. Tratamiento primario

Por medio de métodos mecánicos, y en ocasiones químicos, se realiza la remoción de aceites, grasas, sólidos de tamaño considerable y partículas sedimentables que ingresan a los sedimentadores primarios de la planta de tratamiento. Como subproducto de esta etapa se generan los lodos primarios. Se estima que estos lodos contienen entre un 30 y 50 % de la DBO del afluente en forma de DBO insoluble (Ramalho, 1996).

Su degradación es mínima, su apariencia, grisácea y grasienta, y en su mayoría producen olores molestos.

2.2.2. Tratamiento secundario

En esta etapa se remueve la materia orgánica por medio de microorganismos en condiciones aeróbicas o anaeróbicas. Si las aguas residuales se tratan por digestión aeróbica, se utilizan tanques de aireación que proporcionan grandes cantidades de oxígeno a la mezcla para favorecer el crecimiento de microorganismos que digieran la materia orgánica. Como subproducto, se generan los lodos secundarios, que son los sólidos suspendidos formados mediante la digestión de los sólidos disueltos de las aguas residuales. Si el proceso de digestión es aeróbico, a estos también se les conoce como lodos activados. Una vez formados en los reactores biológicos, estos pasan a los sedimentadores secundarios donde forman cúmulos y se asientan, de manera que pueden ser retirados del agua tratada a través de las tolvas de dichos sedimentadores. Se componen de microorganismos y la materia inerte que estos hayan digerido (Belzona Inc., 2010).

2.2.3. Tratamiento terciario

Consiste en la remoción de contaminantes específicos como nutrientes, minerales, virus, patógenos, entre otros.

Como resultado, se obtienen los lodos terciarios formados por compuestos específicos removidos de las aguas residuales, por lo que su composición depende del grado de depuración de estas. Pueden contener fósforo, nitrógeno, minerales, metales pesados, patógenos, las sustancias químicas utilizadas para la separación de estos compuestos, entre otros.

2.3. Planta de tratamiento de aguas residuales de San Marcos La Laguna, Barrio 2

La planta de tratamiento de aguas residuales del Barrio 2 de San Marcos La Laguna lleva a cabo un proceso aeróbico de lodos activados por lotes, que es una tecnología denominada reactores secuenciales discontinuos o SBR por sus siglas en inglés (*sequencing batch reactor*).

La planta está compuesta por tratamiento primario, para lo que cuenta con rejillas, trampa de grasas y tanque de homogenización; tratamiento secundario, que consta de dos reactores tipo secuenciales con difusores de burbuja fina, en los que ocurren los procesos de mezcla anóxica, aireación y sedimentación; filtración y desinfección del efluente con hipoclorito de sodio; tratamiento aerobio de los lodos, una unidad espesadora de lodos y finalmente un patio de lecho filtrante para la deshidratación de estos (Castro, 2020).

En el Anexo 4 se muestra un diagrama de flujo de la planta de tratamiento.

2.4. Composición y características de los lodos no estabilizados

Los lodos pueden ser domésticos o industriales dependiendo del tipo de aguas residuales de las cuales se originan. También, el volumen de lodos generados depende del tipo de tratamiento al que son sometidas las aguas residuales, por ejemplo, en una planta de tratamiento de procesos aerobios se generan de cinco a seis veces más lodos que en una de procesos anaerobios (Arvizu, 1996).

Así mismo, las características de los lodos dependen de la etapa del tratamiento en la que fueron generados. En la Tabla 1 se muestra la composición típica de los lodos generados en las distintas fases del tratamiento de aguas residuales domésticas.

Tabla 1.

Caracterización y composición de lodos

Parámetros	Lodos		
	Lodos primarios	Lodos secundarios (mezcla)	Lodos digeridos
pH	5.5 - 6.5	6.5 - 7.5	6.8 - 7.6
Contenido de agua (%)	92 - 96	97.5 - 98	94 - 97
ssv (% ss)	70 - 80	80 - 90	55 - 65
Grasas (% ss)	12 - 14	3 - 5	4 - 12
Proteínas (% ss)	4 - 14	20 - 30	10 - 20
Carbohidratos (% ss)	8 - 10	6 - 8	5 - 8
Nitrógeno (% ss)	2 - 5	1 - 6	3 - 7
Fósforo (% ss)	0.5 - 1.5	1.5 - 2.5	0.5 - 1.5
Bacterias patógenas (NMP/100ml)	10 ³ - 10 ⁵	100 - 1000	10 - 100

Continuación de la tabla 1.

Parámetros	Lodos primarios	Lodos	
		secundarios	Lodos digeridos
		(mezcla)	
Metales pesados (% ss) (Zn, Cu, Pb)	0.2 - 2	0.2 - 2	0.2 - 2

ssv: sólidos suspendidos volátiles; ss: sólidos suspendidos.

Nota. Composiciones típicas de lodos residuales de aguas domésticas. Obtenido de N. Oropeza (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*. 1. (http://dci.ugroo.mx/RevistaCaos/2006_Vol_1/Num_1/NO_Vol_I_21-30_2006.pdf), consultado el 12 de noviembre de 2020. De dominio público.

Es importante determinar las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad y biológico-infecciosas de los lodos resultantes para determinar el tipo de tratamiento necesario para su estabilización y adecuada disposición final (Oropeza, 2006).

2.5. Tratamiento de lodos

En general, el tratamiento de lodos residuales tiene, entre otros, dos objetivos principales:

- Reducción de volumen: se pretende reducir el porcentaje de humedad o, en otras palabras, aumentar el contenido de sólidos. Esto se puede lograr con procesos como espesamiento, deshidratación por drenaje natural, escurrido mecánico, secado término, incineración, entre otros.
- Reducción del poder de fermentación o estabilización: una vez reducido el volumen de los lodos, se busca reducir la actividad biológica y el contenido de microorganismos patógenos, a la vez que se disminuyen los olores y la

putrefacción. Se puede lograr mediante métodos como: digestión anaerobia o aerobia, estabilización química, comúnmente con cal, pasteurización, cocción, compostaje, entre otros.

2.5.1. Métodos de estabilización de lodos

Las características físicas, químicas y biológicas de los lodos estabilizados dependen del método empleado para su estabilización, entre ellos se encuentran la digestión anaerobia, proceso que ocurre posterior a la PTAR, y el proceso aerobio, que ocurre dentro de la PTAR.

2.5.1.1. Digestión anaerobia

Toma lugar en depósitos cerrados llamados digestores anaerobios. La estabilización ocurre mediante la degradación biológica de la materia orgánica de los lodos por medio de microorganismos que la fermentan. Lo anterior ocurre en dos fases, en la primera se forman ácidos volátiles y en la segunda, las bacterias anaerobias producen gas metano a partir de dichos ácidos (Oropeza, 2006).

De esta fermentación se obtienen compuestos como sulfuro de hidrógeno, amoníaco, agua y gases en cantidades importantes como metano y dióxido de carbono (Belzona Inc., 2010).

Puesto que se produce metano, se tiene la posibilidad de aprovechar su valor calorífico, aproximadamente de 9000 Kcal/m³, para suministrar energía a la planta de tratamiento.

El volumen de lodo estabilizado es menor que el obtenido en la digestión aerobia, entre 30 a 50 % de reducción de volumen de lodos, pero el proceso es más lento. Este método requiere una inversión inicial mayor, aunque los costos

de operación son menores que la digestión aerobia, puesto que no es necesario suministrar aire al proceso. Por lo anterior, es muy utilizado en plantas de tratamiento grandes.

2.5.1.2. Digestión aerobia

Este método es una continuación del proceso de lodos activados. Cuando las fuentes de alimento se agotan, los microorganismos consumen su propio protoplasma y de esta manera disminuye la población microbiana. El tejido celular es oxidado entre un 75 y 80 % a dióxido de carbono, agua y amoníaco, mientras el resto de las cargas contaminantes es oxidado a compuestos orgánicos y compuestos inertes no biodegradables (Metcalf y Eddy, 1977, como se citó en Gutiérrez, 1986).

A diferencia de la digestión anaerobia, con este método no se emiten olores.

Los lodos se estabilizan en presencia de oxígeno, por lo que son aireados en tanques abiertos durante un tiempo entre 10 y 20 días, según la temperatura (Belzona Inc., 2010).

Este es un método muy utilizado en pequeñas plantas de tratamiento, y la PTAR de San Marcos La Laguna, Sololá es un ejemplo.

Algunos de los factores que controlan el proceso de digestión aeróbica son: concentración de sólidos volátiles biodegradables, temperatura, mezclado, características de los sólidos, concentración de microorganismos, requerimiento de oxígeno, concentración de nutrientes, tipo de microorganismos presentes, condiciones fisiológicas de los microorganismos y tiempo de retención (Gutiérrez, 1986).

Aunque este método representa gastos menores de inversión, los costos de operación aumentan en comparación con la digestión anaerobia, ya que se requiere suministro de aire y esto implica mayores consumos de energía eléctrica.

Una vez estabilizados, deben monitorearse las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de los lodos para analizar posibles formas de aprovechamiento, por ejemplo, como fertilizante o acondicionador de suelos.

2.6. Aprovechamiento de lodos en el suelo

Se tienen varios antecedentes del reúso de lodos de PTAR secos y compostados como abono, pues mejoran la calidad del suelo y favorecen la producción agrícola (Francisco, Ramos y Aguirre, 2011).

Debido al alto valor nutritivo para las plantas. Según sus características, los lodos pueden contribuir a mejorar las propiedades químicas, físicas y microbiológicas de los suelos (Utria *et. al.*, 2006).

El reciclaje de los lodos como acondicionadores del suelo, mejora ciertas características de estos tales como textura, capacidad de absorción de agua, provee nutrientes para el crecimiento vegetal como nitrógeno y fósforo, además de otros micronutrientes como níquel, zinc y cobre. Una de las ventajas de los lodos sobre los fertilizantes inorgánicos es que las formas orgánicas de nutrientes que estos proveen al suelo son menos solubles en el agua, lo que significa que es menos probable que se generen lixiviados que contaminen el agua subterránea o el agua superficial por escorrentía (Limón, 2013).

No obstante, también debe considerarse la presencia de metales pesados, compuestos orgánicos persistentes, microorganismos patógenos y otras

sustancias que puedan representar un riesgo a la salud pública y los ecosistemas.

Por lo anterior, para su uso en suelos, deben considerarse las características físicas, químicas y microbiológicas de los lodos.

2.6.1. Características físicas

Debe conocerse la textura y el espesor de los lodos, pues tienen efectos sobre algunos parámetros hidráulicos de los suelos (Esteller, 2002, como se citó en García, 2011).

2.6.1.1. Textura

Hace referencia al porcentaje de partículas de diferente tamaño como arena, limo y arcilla presentes en los lodos. La constitución de los lodos debe favorecer la fijación de las raíces de las plantas, su nutrición y la disponibilidad de agua (Rucks *et. al.*, 2004, como se citó en García, 2011).

2.6.1.2. Porosidad

Es el porcentaje del volumen de vacíos en el volumen total de los lodos. La porosidad total aumenta a menor tamaño de partículas, por lo que un lodo arcilloso posee mayor porosidad total que uno arenoso (Rucks *et. al.*, 2004, como se citó en García, 2011).

La falta de poros suficientemente grandes para ser fácilmente penetrados por las raíces de las plantas es la causa más frecuente de las restricciones del desarrollo radical, sin embargo, existen métodos por medios biológicos o mecánicos para superar dicha restricción.

Los métodos biológicos, como el barbecho vegetativo, son generalmente menos costosos y sus beneficios son de mayor duración, pero requieren mayor tiempo para la regeneración natural de la porosidad del suelo, entre dos o tres años, período durante el cual el suelo no puede ser cultivado.

Los métodos mecánicos buscan romper la capa densa que restringe el crecimiento de las raíces con el fin de crear poros mayores por los cuales estas puedan penetrar. Cuando se trata de capas superficiales que restringen el crecimiento radical, la forma más simple de romperlas es con abridores tirados por bueyes o con arados de cincel tirados por tractores (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2005).

2.6.2. Características químicas

Las características químicas de los lodos a considerar para su aprovechamiento agrícola son:

2.6.2.1. Materia orgánica

Proporciona una reserva estable de nutrientes para las plantas (Salcedo-Pérez *et. al.*, 2007, como se citó en García, 2011).

La materia orgánica, que representa aproximadamente el 50 % de los lodos, contiene elementos orgánicos como proteínas, azúcares simples, ácidos orgánicos y otros de fácil digestión por los microorganismos presentes en el suelo, quedando a disponibilidad del aprovechamiento de las plantas (Utria *et. al.*, 2007, como se citó en García, 2011).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los lodos, es la capacidad que estos tienen para retener e intercambiar minerales como el potasio, calcio,

magnesio y sodio. Esta aumenta con la presencia de materia orgánica y partículas finas, y se considera como la base de la fertilidad del suelo (INE, 2006, como se citó en García, 2011).

2.6.2.2. Potencial de hidrógeno

El pH influye en la absorción de los metales por las plantas. El aumento del pH reduce la asimilación y absorción del aluminio, cobre, hierro, cobalto, zinc y manganeso. Además, las concentraciones de cadmio y plomo pueden incrementar con la disminución del pH de los lodos (de la Fuente *et. al.*, 2006, como se citó en García, 2011).

En general, el pH óptimo de los suelos agrícolas debe variar entre 6.5 y 7.0 para obtener los mejores rendimientos y la mayor productividad (Prasad & Power, 1997, como se citó en Ibarra *et. al.*, 2009).

2.6.2.3. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es una medida indirecta de la cantidad de sales que contiene un suelo, su resultado se da en $\mu\text{mho/cm}$ o $\mu\text{S/cm}$, que son equivalentes.

La conductividad eléctrica de los lodos se encuentra entre 2.96 a 7.11 mS/cm , por lo que van de poco salinos, donde los rendimientos de los cultivos muy sensibles se ven afectados, hasta moderadamente salinos, donde se reduce el rendimiento en diferentes vegetales (Cardoso *et. al.*, 2002, como se citó en García, 2011).

Según el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (s.f.) de España, cada cultivo es capaz de sobrevivir en rangos diferentes de conductividad

dependiendo del tipo de sales que tiene el suelo, sin embargo, el desarrollo de los cultivos, en función de la conductividad eléctrica, en general se comporta de la siguiente manera:

- < 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ buen desarrollo
- 500-1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aparecen problemas en algunos cultivos
- >1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dificultades en muchos cultivos.

2.6.2.4. Macroelementos nutritivos

El valor de los lodos como fertilizantes se basa, entre otros, en el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, lo que contribuye a disminuir el consumo de fertilizantes químicos sintéticos (Salcedo-Pérez *et. al.*, 2007, como se citó en García, 2011).

2.6.2.4.1. Nitrógeno

Es uno de los elementos más abundantes en la Tierra, específicamente en la atmósfera, pero en muchos suelos es escasa. Llega al suelo por aportes de materia orgánica y fijación bacteriana a partir del aire.

El nitrógeno en los lodos queda disponible a las plantas sólo en pequeñas concentraciones dado que el nitrógeno de los lodos es principalmente orgánico y las plantas asimilan el nitrógeno mineral, como amoníaco, nitritos y nitratos, sin embargo, su disponibilidad aumenta con el tiempo, es decir, varios ciclos agrícolas después de su aplicación, ya que el nitrógeno orgánico se mineraliza (Miragaya & Benarroch, 1986).

Las plantas obtienen bajo la forma de nitrato, la mayor parte del nitrógeno que necesitan (Navarro y Navarro, 2013).

2.6.2.4.2. Fósforo

Es un macroelemento esencial para las plantas. Puede ser un elemento limitante, pues es un componente de los ácidos nucleídos y fosfolípidos (Esteller, 2002, como se citó en García, 2011).

Los niveles de fósforo en los lodos son inferiores a los contenidos en los fertilizantes sintéticos, pero pueden estar presentes como ion fosfato y ortofosfato en forma mineralizada, que es como las plantas lo aprovechan (Corte-Cadiz, 2003, como se citó en García, 2011).

2.6.2.4.3. Potasio

Tanto el potasio intercambiable es asimilado por las plantas como el potasio no intercambiable es absorbido, principalmente en lapsos más grandes.

Las plantas obtienen el potasio de la meteorización de los minerales, de la mineralización de los residuos orgánicos o del que proviene en los fertilizantes (Elvira, 2006, como se citó en García, 2011).

2.6.2.4.4. Sodio

Se encuentra en la mayoría de las aguas naturales. La relación de sodio con el total de cationes es de interés en la agricultura y patología humana. La permeabilidad del lodo puede ser perjudicada por una relación elevada de sodio (Franson, 1992, como se citó en García, 2011).

2.6.2.4.5. Calcio

Contribuye a la dureza total del agua. Los lodos son un aporte importante de calcio a los suelos (Stoffella, 2005, como se citó en García, 2011).

2.6.2.4.6. Magnesio

Es un componente común de las aguas naturales. Los lodos contienen cantidades significativas de magnesio (Cardoso *et. al.*, 2002, como se citó en García, 2011).

2.6.2.5. Metales pesados

Comúnmente se ha utilizado este término para referirse a los metales que son tóxicos.

Algunos metales son necesarios para los seres vivos, pero por encima de ciertas concentraciones pueden llegar a ser tóxicos. Por esto, deben considerarse los riesgos que los lodos representan para los suelos, los cultivos y los consumidores si contienen altas concentraciones de metales pesados.

Se debe considerar la presencia de metales pesados en los lodos, tales como:

2.6.2.5.1. Plomo

Es tóxico y se acumula en el organismo afectando los diversos sistemas que lo componen. Su origen en el agua puede ser industrial, minero, entre otros (Franson, 1992, como se citó en García, 2011).

El plomo se encuentra en altas concentraciones en los lodos de PTAR industriales.

2.6.2.5.2. Mercurio

Es un metal líquido a temperatura ambiente de color blanco plateado, brillante y denso. Junto con el plomo, es un metal que no es absorbido por los cultivos, por lo que los riesgos son mínimos (Medina, 2003).

2.6.2.5.3. Cadmio

Es el metal de mayor riesgo, pues se acumula en las plantas hasta alcanzar niveles dañinos para el hombre y los animales sin ser tóxicos para las plantas. Su concentración aumenta con aplicaciones repetidas de plomo y pueden acumularse durante mucho tiempo (Medina, 2003).

2.6.2.5.4. Arsénico

Es un elemento semimetálico sólido, de color gris metálico, que forma compuestos venenosos; se usa principalmente en la fabricación de vidrio para eliminar el color verde causado por las impurezas y en la fabricación de gases venenosos (Castro, 2020).

2.6.2.5.5. Cromo hexavalente

Es un metal que se halla espontáneamente en el agua, el suelo y las rocas. También se le encuentra en los cultivos y como elemento remanente en los suelos agrícolas. Este puede estar presente en el ambiente en niveles de concentración altos debido a diversas actividades industriales. Se sabe que el cromo hexavalente es cancerígeno por inhalación y sus riesgos potenciales en la actividad industrial han sido ampliamente documentados. Muchos estudios han

revelado altas tasas de cáncer de pulmón en operarios expuestos a la inhalación del cromo +6, así como un incremento de la tasa de cáncer de tracto gastrointestinal (Castro, 2020).

2.6.3. Características microbiológicas

Los parásitos, las bacterias y los virus son los microorganismos contenidos en los lodos que representan una amenaza para la salud pública. Dentro de las bacterias más abundantes está la *Salmonellae*, que se inactiva por medio de incineración. No puede eliminarse por medio de procesos de digestión aerobia o anaerobia, pero sí reducirse considerablemente el riesgo de alguna infección. Los parásitos presentes en los lodos son los huevos de cisticercos, nematodos y especies de áscaris. Un solo embrión de estas especies es suficiente para causar una infección. La digestión de los lodos no los elimina, pero sí reduce el número. Finalmente, en los lodos se pueden encontrar virus como los causantes de la polio y la hepatitis, y rotavirus, causante de gastroenteritis. Se pueden inactivar con la misma ruta de inactivación de las bacterias (Morales, 2005).

3. METODOLOGÍA

Para proponer un plan de trabajo para la disposición final de los lodos de la PTAR en San Marcos La Laguna, primero deben analizarse las características físicas, químicas y microbiológicas de los lodos generados para determinar si estos pueden ser aprovechados mediante su aplicación en el suelo. Por lo anterior, el tipo de investigación que se realizó es de naturaleza no experimental descriptiva, puesto que no se manipuló ninguna variable.

3.1. Variables

Las variables, o parámetros, que se midieron en las muestras de lodos residuales se clasifican en: físicas, químicas y microbiológicas.

3.1.1. Características físicas

Se determinó la textura y la porosidad de la muestra No. 1 de lodo residual (ver Tabla 5), por medio de métodos que tienen relación con la densidad del lodo.

3.1.1.1. Textura

Para determinar la textura del lodo se empleó el método de Bouyoucos, que se basa en la Ley de Stokes y consiste en calcular la cantidad de sólido en suspensión a determinados intervalos de tiempo; la densidad se mide con un densímetro conocido como hidrómetro de Bouyoucos (Valverde, 2007).

3.1.1.2. Porosidad

Se determinó la porosidad del lodo residual de forma indirecta a partir de su densidad aparente y se clasificó según el porcentaje de porosidad como suelo con porosidad muy baja, baja, media, alta o muy alta, de acuerdo con los criterios que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.

Interpretación de la porosidad de un suelo

Porosidad total (%)	Interpretación
< 30	Muy baja
30 - 40	Baja
40 - 50	Media
50 - 60	Alta
> 60	Muy alta

Nota. Rangos de porcentajes de porosidad del suelo y su interpretación respectiva. Obtenido de L. Flores y J. Alcalá (2010). *Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelos.* (<https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>), consultado el 12 de noviembre de 2020. De dominio público.

3.1.2. Características químicas

Se midió la conductividad eléctrica, el potencial de hidrógeno, los macronutrientes y la materia orgánica en las muestras No. 1, 2, y 3 (ver Tabla 5), mientras que la concentración de metales pesados se midió únicamente en la muestra No. 1.

3.1.2.1. Conductividad eléctrica

Generalmente se presenta un buen desarrollo de los cultivos en suelos con una conductividad eléctrica menor a 500 μ /cm. Se determinó la conductividad eléctrica de los lodos residuales para lo cual se utilizó un medidor multiparamétrico marca HACH modelo HQ40d.

3.1.2.2. Potencial de hidrógeno

Se determinó el pH de los lodos residuales esperando que este se encontrara en el rango de 6.5 y 7.0, puesto que dentro de estos valores se obtienen los mejores rendimientos y la mayor productividad en los cultivos. Para esto, se utilizó un potenciómetro marca OAKTON modelo PC700

3.1.2.3. Metales pesados

Se determinó la presencia y concentración de metales pesados en los lodos residuales y los valores obtenidos se compararon con los parámetros para reúso de lodos indicados en el artículo 42 del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos (ver Tabla 3). A partir de esto, se determinó si los lodos podrían ser aplicados al suelo sin requerir una post-estabilización.

Según el artículo 42 del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, en el caso de que los lodos sean aplicados a suelos con un 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.

Tabla 3.

Parámetros y límites máximos permisibles para lodos

Parámetro	Dimensionales	Aplicación al suelo	Disposición en rellenos sanitarios	Confinamiento o aislamiento
Arsénico	mg/Kg de materia seca a 104 °C	50	100	> 100
Cadmio	mg/Kg de materia seca a 104 °C	50	100	> 100
Cromo	mg/Kg de materia seca a 104 °C	1500	3000	> 3000
Mercurio	mg/Kg de materia seca a 104 °C	25	50	> 50
Plomo	mg/Kg de materia seca a 104 °C	500	1000	> 1000

Nota. Límites máximos permisibles según la disposición final de los lodos residuales. Obtenido de Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Acuerdo Gubernativo No. 236-2006. (05 de mayo de 2006). Presidencia de la República de Guatemala. Diario de Centroamérica No. 26 tomo CCLXXIX. Guatemala. <https://legal.dca.gob.gt/>.

3.1.2.4. Macronutrientes

Por su importancia para determinar el potencial que tiene un lodo residual como acondicionador del suelo o fertilizante, se determinó la concentración de nitrógeno y fósforo total en las muestras No. 1, 2 y 3 (ver Tabla 5).

3.1.2.4.1. Nitrógeno total (N)

Se determinó el contenido de nitrógeno total en los lodos residuales y posteriormente se hizo una comparación de uno de los resultados con los fertilizantes más utilizados en Guatemala para visualizar su potencial como

acondicionador del suelo o fertilizante. El nitrógeno total consiste en las formas orgánicas e inorgánicas del nitrógeno. Las formas inorgánicas son nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), amoníaco ionizado (NH_4^+) y gas nitrógeno (N_2), mientras que las formas orgánicas se encuentran como aminoácidos, aminas, polipéptidos, proteínas y otras.

3.1.2.4.2. Fósforo total (P)

Se determinó el fósforo total contenido en los lodos y se expresó en términos de fósforo total. Posteriormente se realizó una comparación de uno de los resultados con los fertilizantes más utilizados en Guatemala para visualizar su potencial como acondicionador del suelo o fertilizante. Dicha comparación se realizó en términos de P_2O_5 , puesto que es el utilizado convencionalmente para expresar los nutrientes de los fertilizantes. La conversión de fósforo total a P_2O_5 se hizo multiplicando el fósforo total por 2.2914, que resulta de relaciones estequiométricas (Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes, 2002).

3.1.2.5. Materia orgánica

Se determinó el porcentaje de materia orgánica presente en los lodos residuales, puesto que está relacionada con la capacidad de intercambio catiónico, la cual es considerada como la base de la fertilidad del suelo.

3.1.3. Características microbiológicas

Las características microbiológicas que se analizaron en las muestras de lodos residuales fueron las coliformes fecales y los huevos de helmintos.

3.1.3.1. Coliformes fecales

Se determinó el contenido de coliformes fecales en los lodos residuales. Según el artículo 59 del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, este no debe exceder las dos mil unidades formadoras de colonia (UFC) por kilogramo de coliformes fecales, para poder disponer los lodos como abono para cultivos comestibles.

3.1.3.2. Huevos de helmintos

Aunque este parámetro no se encuentra regulado en el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, se sabe que son de gran importancia en salud pública, debido a su mínima dosis infectiva y a su alta resistencia a diversas condiciones ambientales (Campos *et. al.*, 2018).

Por lo anterior, esta fue una variable para cuantificar en la muestra de lodos.

La norma de la de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, establece límites en el contenido de huevos de helmintos en biosólidos utilizados en la agricultura. Considera admisible, como límite máximo, un huevo por cada 4 g de sólidos totales (como se citó en Campos *et. al.*, 2018).

Por otro lado, la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 considera que los lodos de clase C, para usos forestales, agrícolas y de mejoramientos de suelos, deben tener menos de 35 huevos de helmintos por gramo en base seca.

3.2. Delimitación de campo de estudio

Los análisis físico, químico y microbiológico se realizaron a los lodos del digestor de lodos y del patio de secado de la planta de tratamiento de aguas residuales del Barrio II de San Marcos La Laguna.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Br. Karla Rocío Cap López, epesista,
- M. Sc. Ing. Rodolfo Castro, consultor de la AMSCLAE,
- Licda. Flor Barreno Ortiz, encargada del Laboratorio de Calidad Ambiental de la AMSCLAE, e
- Inga. Virginia Piril, encargada del Laboratorio del ICTA.

3.4. Recursos institucionales

- Departamento de Saneamiento Ambiental (DSA) de la AMSCLAE,
- Departamento de Investigación y Calidad Ambiental (DICA) de la AMSCLAE,
- Laboratorio Ingeniería Sanitaria y Ambiental, e
- Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA).

3.5. Técnicas cuantitativas

A continuación, se presentan las metodologías empleadas para la medición de algunas de las variables mencionadas en el apartado 3.1.

3.5.1. Metales pesados

Se determinó la presencia y concentración de los metales pesados establecidos en el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, en los lodos residuales mediante la técnica de voltamperometría. Los métodos que se utilizaron se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.

Métodos para el análisis de metales pesados en lodos

Parámetro	Dimensional	Método	Límite de detección
Arsénico	mg/L As	T2O AN503 adaptado SMWW 3130 A	0.005 a 0.5
Cadmio	mg/L Cd	T2O AN501 SMWW 3130 B	0.005 a 0.5
Cromo	mg/L Cr ⁺⁶	T2O AN507 adaptado SMWW 3130 A	0.05 a 0.5
Mercurio	mg/L Hg	T2O AN502 adaptado SMWW 3130 A	0.005 a 0.5
Plomo	mg/L Pb	T2O AN501 SMWW 3130 B	0.005 a 0.5

Nota. Métodos utilizados para el análisis de metales pesados en la muestra de lodos residuales. Obtenido de Laboratorio Ingeniería Sanitaria y Ambiental (2021). *Resultados de análisis de laboratorio.* (p.12).

3.5.2. Nitrógeno total

Se utilizó un kit de Nitrógeno total de Spectroquant®. El método consiste en transformar los compuestos orgánicos e inorgánicos de nitrógeno en nitratos por el método Koroleff por tratamiento con un oxidante en un termorreactor. Tales nitratos, en ácido sulfúrico concentrado, forman con un derivado del ácido benzoico un nitrocompuesto rojo cuya concentración se determina fotométricamente.

3.5.3. Fósforo total

Se determinó el contenido de fósforo total con base en la metodología descrita en el Manual de Procedimientos Operacionales Estándares de la AMSCLAE, cuyo límite de detección son 2 µg/L. Dicha metodología es análoga a la I-4600-85:00665 del Servicio Geológico de los Estados Unidos, o USGS por sus siglas en inglés (AMSCLAE, 2019).

En este método, la materia orgánica presente en los lodos es oxidada utilizando persulfato de potasio acidificado, por lo que se obtiene fósforo en forma de ortofosfato. Este ortofosfato se convierte en un complejo de fosfomolibdato al combinarse con molibdato en un medio acidificado, para esto se tomó como referencia el método normalizado 4500-PE Método del ácido ascórbico. El complejo formado es de color azul intenso, que puede determinarse espectrofotométricamente a las longitudes de onda de 675 u 880 nm (AMSCLAE, 2019).

3.5.4. Materia orgánica

Los sólidos volátiles estiman la cantidad de materia orgánica que queda en un lodo o biosólido. Por lo anterior, se determinó el contenido de sólidos volátiles en los lodos residuales con el método normalizado 2540 G Sólidos totales, fijos y volátiles en muestras sólidas y semisólidas.

3.5.5. Coliformes fecales

Se identificaron bacterias coliformes totales y *Escherichia coli* por medio del método de filtración por membrana descrito en el Manual de Procedimientos Operacionales Estándares de la AMSCLAE. El rango de detección de esta metodología está entre el intervalo de 1-150 UFC por 100 ml de muestra.

Para la cuantificación de las colonias bacterianas pertenecientes al grupo coliformes, se tomó como base el documento 3M Placas Petrifilm™ para el recuento de *E. coli* y coliformes totales, guía de interpretación”, puesto que se utilizaron dichas Placas Petrifilm™.

3.5.6. Huevos de helmintos

El procedimiento inicia con la separación de los huevos del resto de sedimentos que componen el lodo residual, para una cantidad de lodo conocida. Para ello se utilizaron las técnicas de flotación y sedimentación descritas en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Una vez separados, los huevos de helmintos fueron observados y cuantificados al microscopio.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Inicialmente se realizaron dos visitas a planta de tratamiento de aguas residuales durante las cuales se observó el funcionamiento general de esta, se midieron y consultaron los tiempos de retención del agua residual y de los lodos en cada fase de tratamiento, se cuantificó la capacidad del digester de lodos, se evaluó el estado del patio de secado de lodos y su ubicación, así como las condiciones del traslado de los lodos a dicho lugar.

Para la caracterización de los lodos se realizaron tres muestreos en temporalidades diferentes, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5.

Plan de muestreo de lodos

No.	Observaciones	Análisis realizados
M1	Lodo del patio de secado de lodos	Físico, químico y microbiológico
M2	Lodo del digestor de lodos	Químico (excepto metales pesados) y microbiológico
M3	Lodo del patio de secado de lodos	Químico (excepto metales pesados) y microbiológico

Nota. Plan de muestreo de lodos y tipos de análisis de laboratorio realizados por muestra. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

- Muestra 1 (M1): la muestra se tomó en el patio de secado de los lodos de acuerdo con el método de muestreo descrito en el Acuerdo Ministerial 105-2008 Manual General del Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos (ver guía en Anexo 3).
- Muestra 2 (M2): la muestra se tomó inmediatamente a la salida del digestor de lodos.
- Muestra 3 (M3): la muestra se tomó en el patio de secado de lodos utilizando la misma metodología que para la muestra 1.

Los puntos de muestreo se encuentran señalados en el diagrama de flujo de la planta de tratamiento en el Anexo 4.

4. RESULTADOS

Este capítulo se comprende de cinco secciones de resultados: descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales, caracterización física, química y microbiológica de los lodos residuales, y pruebas de estabilización alcalina de los lodos.

4.1. Descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales

La descripción de la planta de tratamiento se presenta en la Tabla 6. La información se recabó mediante visitas a la planta.

La producción de lodos se estimó mediante consulta directa con los operadores de la planta.

Tabla 6.

Descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales

Unidades que conforman la planta de tratamiento de aguas residuales (VER ANEXO 4)
Pretratamiento
<ul style="list-style-type: none">• Canal de rejas, para eliminación de sólidos no biodegradables• Desarenador• Trampa de grasas• Tanque de homogenización
Tratamiento primario y secundario
<ul style="list-style-type: none">• Dos reactores de lodos activados de tipo secuencial, con difusores de burbuja fina (107.65 m³ cada uno)

Continuación de la tabla 6.

Tratamiento terciario

- Sistema de desinfección con cloro

Tratamiento de lodos

- Digestor aerobio de lodos, con difusores de burbuja fina
- Unidad espesadora de lodos
- Cajetín para colocación de los sacos que retienen el lodo durante su llenado y escurrimiento de agua en exceso
- Patio de secado de lodos con lecho filtrante

Tiempos de retención (Tr)					
Aguas residuales			Lodos residuales		
Etapa	Unidad	Tr	Etapa	Unidad	Tr
Pretratamiento	Desarenador	3 minutos	Aireación	Reactor de tipo secuencial	1 o 2 semanas ¹
Pretratamiento	Trampa de grasas	3 minutos	Aireación	Digestor de lodos	1 o 2 semanas ¹
Pretratamiento	Tanque de homogenización	12 horas	Secado previo	Jardín de PTAR	1 o 2 semanas ²
Llenado y mezcla anóxica ³	Reactor de tipo secuencial	1 hora	Secado	Patio de secado	3 meses o más ²
Aireación ³	Reactor de tipo secuencial	5 horas			
Sedimentación ³	Reactor de tipo secuencial	3 horas			
Evacuación ³	Reactor de tipo secuencial	3 horas			
Desinfección ³	Sistema de cloración	12 horas			

Continuación de la tabla 6.

Condiciones estructurales superficiales	
<ul style="list-style-type: none"> • Las unidades se encuentran en condiciones adecuadas de repello e impermeabilización. • Los reactores secuenciales carecen de barandas de seguridad, representando riesgo de caída. • El techo de lámina galvanizada del patio de secado de lodos dificulta el ingreso de luz solar. 	
Observaciones generales	
<ul style="list-style-type: none"> • La mayor parte del año está en funcionamiento únicamente un reactor secuencial. El segundo reactor es activado cuando ingresa mayor volumen de aguas residuales a la planta debido a una mayor afluencia de turistas. • Se realizan descargas de aguas residuales a los pozos de absorción cada 12 horas. • El EPP con que cuentan los operadores incluye: Botas de hule y lentes de protección. • Los sólidos retenidos en el desarenador y las grasas extraídas de la trampa de grasas son mezclados con los lodos residuales. • El digestor de lodos tiene una capacidad de 21.3 m³. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se estima una producción mensual de lodos con 96 % de humedad de: 25,400 kg⁴ (aproximadamente 400 costales) • El espesador de lodos no es utilizado por los operadores de la planta ya que argumentan que su funcionamiento es muy lento y por lo tanto, no se adecúa a los volúmenes de lodo generados. • Los lodos extraídos del digestor de lodos son encostados y dispuestos en el jardín de la PTAR para una deshidratación previa a su traslado al patio de secado. El área es de 52 m². • El patio de secado de lodos no se encuentra ubicado en las instalaciones de la PTAR, sino en el centro de acopio de desechos sólidos.
Notas aclaratorias	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Temporalidad varía según la producción de lodo. 2. Temporalidad varía según condiciones climáticas. 	

Continuación de la tabla 6.

Notas aclaratorias
4. La producción corresponde al volumen de un reactor en funcionamiento con 100,000 L de agua residual y 65 % de sólidos sedimentables. Se purga aproximadamente el 25 % de los lodos, puesto que el 40 % restante es indispensable para el buen desempeño del proceso de lodos activados en el reactor.

Nota. Descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales del barrio 2 de San Marcos La Laguna. Elaboración propia, realizado con Word.

4.2. Caracterización física de los lodos

Como se muestra en la Tabla 7, se determinaron la porosidad y la textura de la muestra No. 1, obtenida del patio de secado de lodos, con un contenido de humedad de 80.8 %. Por la alta porosidad y la textura del lodo, su aplicación al suelo favorecería el desarrollo de raíces y la infiltración de agua en el suelo.

Tabla 7.

Caracterización física de los lodos

Características físicas					
Parámetro	Dimensional	Resultado			Conclusión
Porosidad	%	67.7			Muy alta
Textura	%	Arena	Limo	Arcilla	Arena
		89.5	7.1	3.4	

Nota. Resultados de la caracterización física de la muestra No. 1 de lodos residuales en el Laboratorio de suelo-planta-agua Salvador Castillo Orellana de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, y su interpretación. Elaboración propia, realizado con Word.

4.3. Características químicas de los lodos

Se determinaron la conductividad eléctrica y el potencial de hidrógeno, como se muestra en la Tabla 8, así como el contenido de micronutrientes y de materia orgánica, como se muestra en la Tabla 9, de las muestras de lodos No. 1, 2 y 3, con contenidos de humedad de 80.8, 96.4 y 90.9 %, respectivamente.

Tabla 8.

Conductividad eléctrica y potencial de hidrógeno de los lodos

Características químicas					
Parámetro	Dimensional	Resultado			Conclusión
		M1	M2	M3	
Conductividad eléctrica	μS/cm	228	114	12.5	De buen desarrollo
Potencial de hidrógeno	pH	7.14	7.32	6.42	Neutro

Nota. Resultados de los análisis de laboratorio de las muestras de lodos residuales realizados en el Laboratorio del Departamento de Investigación y Calidad Ambiental de la AMSCLAE, y su interpretación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Tabla 9.

Macronutrientes y materia orgánica de los lodos

Macronutrientes y materia orgánica					
Parámetro	Dimensional	Resultado			
		M1	M2	M3	
Nitrógeno	%	8.1	6.7	0.3	
Fósforo	%	2.4	2.0	0.4	
Potasio	%	0.30	0.40	0.20	
Magnesio	%	0.28	0.19	0.20	
Calcio	%	0.60	0.70	0.70	

Continuación de la tabla 9.

Macronutrientes y materia orgánica				
Parámetro	Dimensional	Resultado		
		M1	M2	M3
Hierro	ppm	148	64.3	72.6
Cobre	ppm	28.7	36.0	32.0
Manganeso	ppm	0.01	0.01	0.01
Zinc	ppm	454	495	499
Materia orgánica	%	57.2	73.4	73.0

Nota. Resultados de los análisis de macronutrientes y materia orgánica de las muestras de lodos residuales realizados en el Laboratorio de Suelo y Planta del ICTA. Elaboración propia, realizado con Word.

Por otro lado, se determinó la concentración de metales pesados en la muestra de lodos No. 1 y se comparó con los límites máximos permisibles (LMP) que establece el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos, para determinar si los lodos son aptos, en este sentido, para ser usados como acondicionadores del suelo.

Tabla 10.

Metales pesados en muestra de lodos residuales

Metales pesados				
Parámetro	Dimensional	LMP	Resultado	Conclusión
Arsénico	mg/kg As	50	11.4	Cumple
Cadmio	mg/kg Cd	50	3.42	Cumple
Cromo	mg/kg Cr ⁺⁶	1500	8.95	Cumple

Continuación de la tabla 10.

Metales pesados				
Parámetro	Dimensional	LMP	Resultado	Conclusión
Mercurio	mg/kg Hg	25	<0.5	Cumple
Plomo	mg/kg Pb	500	10.7	Cumple

Nota. Resultados de la caracterización de metales pesados a la muestra No. 1 de lodos residuales y su estado de cumplimiento. Obtenido de Laboratorio Ingeniería Sanitaria y Ambiental (2021). *Resultados de análisis de laboratorio.* (p. 10).

4.4. Características microbiológicas de los lodos

Se realizó la cuantificación de coliformes fecales y huevos de helmintos en los lodos residuales y se compararon los resultados con los límites máximos permisibles que se establecen en el artículo 59 del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos para coliformes fecales y en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 para huevos de helmintos (ver Tabla 11).

Tabla 11.

Características microbiológicas en los lodos

Características microbiológicas						
Parámetro	Dimensional	LMP	Resultado			Conclusión
			M1	M2	M3	
Coliformes fecales	UFC/kg	2000	500 000	1×10^6	950 000	No cumple

Continuación de la tabla 11.

Características microbiológicas						
Parámetro	Dimensional	LMP	Resultado			Conclusión
			M1	M2	M3	
Huevos de helmintos	H/g ST	< 35	21	22	61	Cumple parcialmente

Nota. Resultados de los análisis de laboratorio de las muestras de lodos residuales realizados en el Laboratorio del Departamento de Investigación y Calidad Ambiental de la AMSCLAE, y su interpretación. Elaboración propia, realizado con Word.

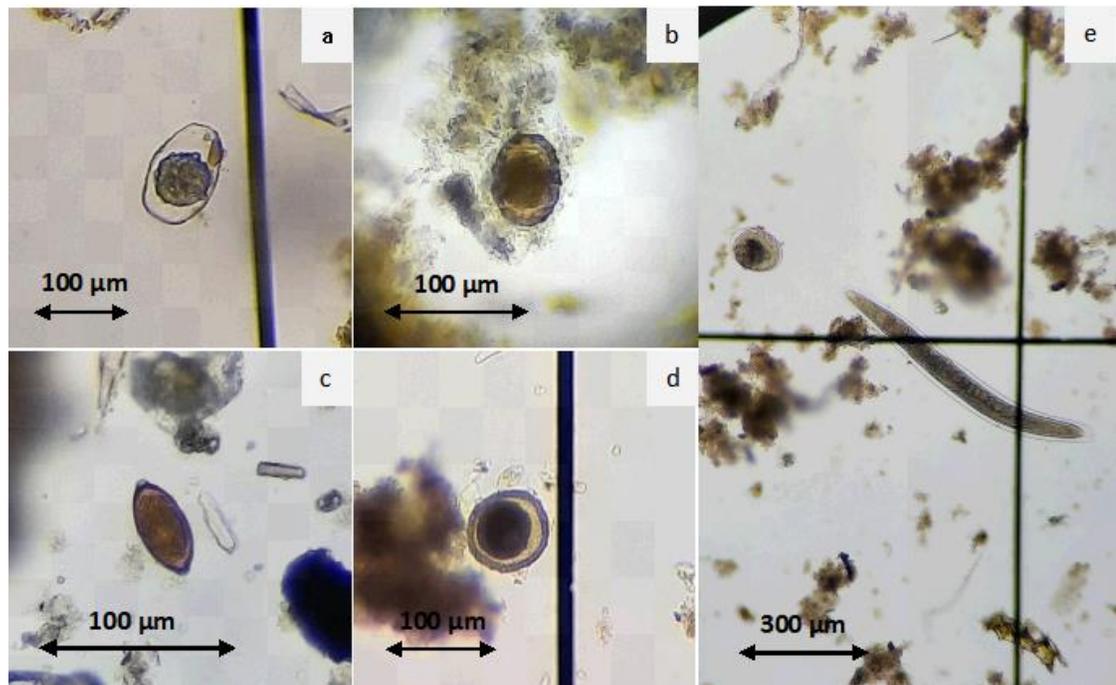
En la Figura 3 se muestran las especies de huevos de helmintos observados en los lodos residuales analizados.

4.5. Prueba de estabilización alcalina de los lodos

Con el objetivo de reducir el contenido de microorganismos patógenos en los lodos, se realizaron pruebas de estabilización alcalina a una muestra de lodos con 77.0 % de contenido de humedad. Para ello, se mezclaron los lodos con diferentes dosis de cal hidratada: 2, 5, 7 y 11 % en base húmeda y se observó el comportamiento del potencial de hidrógeno de dichas mezclas durante un período de 5 días para identificar la dosis que elevará el pH a valores mayores a 12 unidades por un período de al menos 72 h (3 días), lo que permite la reducción significativa de microorganismos patógenos, como lo indica la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

Figura 3.

Huevos de helmintos observados en los lodos



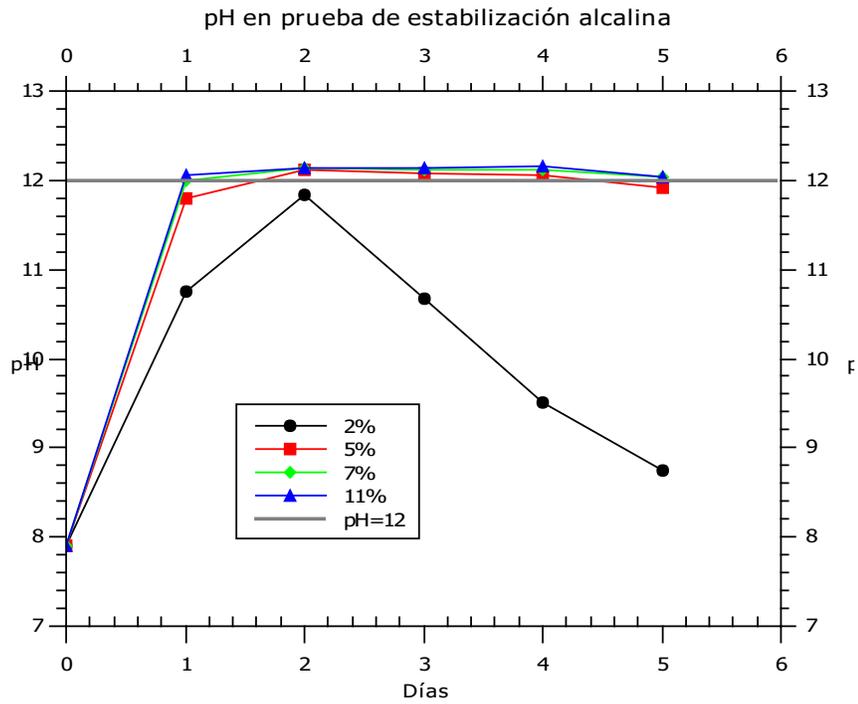
Nota. Especies de huevos de helmintos observados al microscopio en las muestras de lodos residuales analizadas en el Laboratorio del Departamento de Investigación y Calidad Ambiental de la AMSCLAE: a) *Ancylostoma duodenale*, b) *Ascaris lumbricoide*, c) *Trichuris trichiura* y d) *Toxocara canis*. La imagen del inciso e) es un *helminto*. Elaboración propia.

En la Figura 4 se presenta el comportamiento del potencial de hidrógeno de las mezclas de lodo con diferentes dosis de cal hidratada.

Posterior a la estabilización alcalina, se analizó el contenido de coliformes fecales en los lodos tratados y se determinó que a partir de la dosis de 5 % la concentración no es detectable, como se muestra en el anexo 6.

Figura 4.

pH en pruebas de estabilización alcalina en lodos



Nota. Comportamiento del potencial de hidrógeno en cuatro muestras de lodos residuales mezclados con dosis variables de hidróxido de calcio o cal hidratada, durante prueba de estabilización alcalina. Elaboración propia, realizado con Qtiplot.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Como se observa en la Tabla 6, la planta de tratamiento realiza cuatro etapas cíclicas en los reactores de lodos activados de tipo secuencial: llenado y mezcla anóxica, aireación, sedimentación y evacuación. Cada ciclo en el reactor secuencial dura 12 horas, tiempo durante el cual el sistema de cloración trabaja en la desinfección del caudal de aguas residuales del ciclo anterior previo a que este sea descargado a pozos de absorción. Los lodos son evacuados del reactor secuencial hacia el digestor de lodos cuando el reactor alcanza una concentración aproximada de 65 % de sólidos sedimentables, lo cual ocurre cada 10 días, en promedio. Con esto, se estima una producción mensual de 25,400 kg de lodo con 96 % de humedad, el cual es embalado en 400 costales, aproximadamente, que se dejan escurrir antes de su traslado al patio de secado de lodos, ubicado en la planta de residuos sólidos de San Marcos La Laguna (Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento de España, 2017).

De acuerdo con los resultados de la caracterización física de los lodos residuales, que se muestran en la Tabla 7, estos tienen alta porosidad y su composición es principalmente de arena. Esto indica que las partículas que los componen dejan macroporos entre sí, lo que aumenta su permeabilidad y, con ello, favorece el desarrollo de raíces y la infiltración de agua en el suelo (Pellegrini, 2019).

Asimismo, en la Tabla 8 se observa que la conductividad eléctrica de las tres muestras de lodo es menor a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual indica que su aplicación al suelo propiciaría un buen desarrollo de las plantas. Además, el potencial de hidrógeno de las tres muestras de lodo es en promedio 6.96, lo cual es un pH

óptimo para el crecimiento de las plantas (Prasad & Power, 1997, como se citó en Ibarra *et. al.*, 2009).

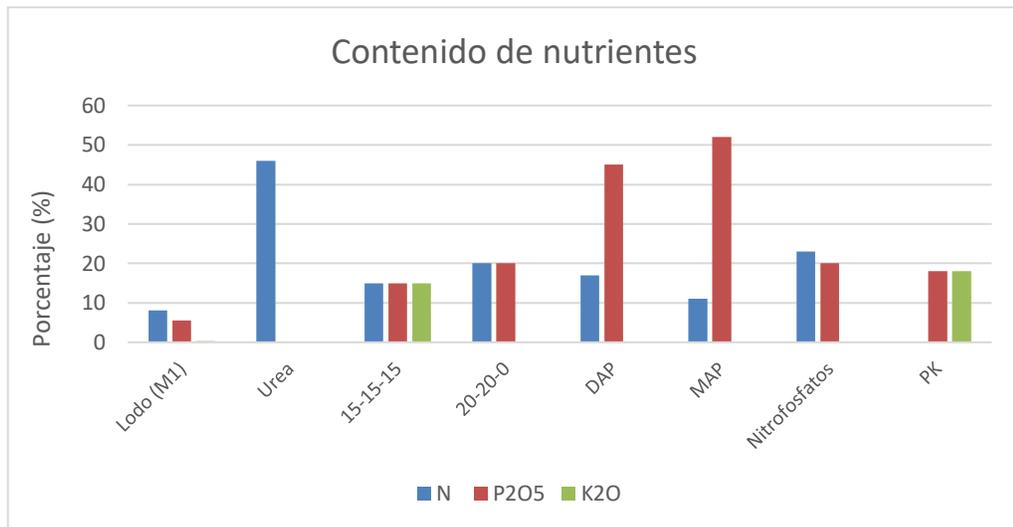
Posteriormente, en la Tabla 9 se presentan los resultados de los análisis de macronutrientes y materia orgánica en las muestras de lodos residuales, con los cuales se determinó que contienen una cantidad significativa de nitrógeno y fósforo, en promedio 5.0 y 1.6 % respectivamente, los cuales son nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Por otro lado, el alto contenido de materia orgánica en los lodos, 67.9 % en promedio, indica que gran parte de los nutrientes se encuentran en su forma orgánica, lo que vuelve menos probable que se generen lixiviados que contaminen cuerpos de agua superficial o subterránea por escorrentía e infiltración debido a su baja solubilidad en agua (Limón, 2013).

A partir de los análisis mencionados en el párrafo anterior, se realizó una comparación de los contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio, como nitrógeno total (N), óxido de fósforo (P_2O_5) y óxido de potasio (K_2O), respectivamente, de la muestra de lodo M1 y algunos de los fertilizantes más utilizados en Guatemala, como se muestra en la Figura 5. Debido al bajo contenido de nutrientes de los lodos residuales en comparación con los fertilizantes sintéticos, estos son considerados como potenciales acondicionadores del suelo y no como fertilizantes.

Como se presenta en la Tabla 10, el contenido de metales pesados en los lodos no sobrepasa los límites máximos permisibles que se establecen en el artículo 42 del Acuerdo Gubernativo 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Por consiguiente, estos podrían ser aprovechados como acondicionadores del suelo sin incurrir en el incumplimiento de dicho acuerdo.

Figura 5.

Nutrientes en lodos y fertilizantes sintéticos más comunes en Guatemala



Nota. Comparación del porcentaje de nutrientes en la muestra No. 1 de lodos residuales y los fertilizantes sintéticos más comunes en Guatemala, en gráfico de barras. Elaboración propia, realizado con Excel.

Los resultados de la caracterización microbiológica de los lodos se presentan en la Tabla 11, en donde se observa que el contenido de coliformes fecales y de huevos de helmintos en los lodos residuales supera los límites máximos permisibles que establece el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos y la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, respectivamente, para su aplicación en el suelo.

Por lo anterior, se trataron los lodos residuales con diferentes dosis de cal hidratada en un proceso conocido como post estabilización alcalina, para obtener lodos con menor contenido de patógenos de acuerdo con lo establecido en la US EPA según Jiménez y Méndez (2003), y se determinó que la dosis óptima para reducir significativamente el contenido de patógenos corresponde al 5 % en base

húmeda, tomando en consideración que la muestra de estudio eran lodos con 77.0 % de humedad.

Lo anterior equivale a una dosis de 22 % en base seca, lo que significa que deben añadirse 1.40 kg de cal por cada saco de lodo proveniente del espesador de lodos, tomando en cuenta que cada saco contiene aproximadamente 63.64 kg de lodos con 90 % de humedad. La masa de lodo residual por saco se midió *in situ*.

Con base en la producción de lodos mensuales en la PTAR del Barrio 2 de San Marcos La Laguna, la implementación del uso de cal hidratada en dicha planta de tratamiento para la estabilización alcalina de los lodos implicaría una demanda mensual de aproximadamente 500 lb o 227 kg de cal hidratada.

Es importante mencionar que, de acuerdo con diversas investigaciones, la aplicación de la dosis óptima de cal a los lodos residuales garantiza la inactivación de los huevos de helmintos, lo que significa que estos pierden su capacidad de desarrollarse hasta la etapa infecciosa.

La causa de inactivación de los microorganismos en el tratamiento alcalino es aún objeto de estudio, sin embargo, algunas investigaciones sugieren que al menos tres factores influyen en la inactivación de los microorganismos: la temperatura, el pH y la volatilización del amoníaco. La influencia del cambio de pH afecta a las especies que están presentes en los biosólidos, provocando el consecuente efecto sobre las membranas y las estructuras bacterianas (Silva, Bedoya y Torres, 2013).

6. LOGROS OBTENIDOS

Se redactó un manual de operación para el manejo adecuado de los lodos residuales de la PTAR Barrio 2 de San Marcos La Laguna, Sololá, el cual se planteó con base en el documento *Estudio Técnico de Aguas Residuales. Municipalidad de San Marcos La Laguna, Departamento de Sololá*. El manual contiene una descripción general del funcionamiento de la PTAR en la línea de aguas residuales y lodos, así como una guía de operaciones básicas para la obtención de lodos estabilizados. En este se implementó el uso de la unidad espesadora de lodos, así como el uso de cal hidratada para la reducción de patógenos y el cumplimiento del parámetro de contenido de coliformes fecales establecido en el artículo 59 del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos.

El Manual de operación para el manejo adecuado de los lodos residuales en la PTAR Barrio 2 de San Marcos La Laguna, Sololá se presenta en el apéndice 7.

Adicionalmente, aunque no fue planteado como un objetivo de este trabajo de investigación, es importante hacer mención de que se logró implementar y redactar la primera versión del Procedimiento Operacional Estándar No. 30 (POE-30), Cuantificación de Huevos de Helminetos en Lodos y Biosólidos en el Laboratorio de Calidad de Agua de la AMSCLAE.

CONCLUSIONES

1. Se propuso un plan con el que se logra el aprovechamiento sanitariamente viable de los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de San Marcos La Laguna, departamento de Sololá, adjunto en el apéndice 7, ya que en este se presenta una serie de actividades que permite eliminar los agentes patógenos de los lodos residuales mediante la aplicación de hidróxido de calcio en dosis que dependen de la humedad de los lodos al momento de su aplicación. Además, esta propuesta de plan implementa la mejora del proceso de deshidratación de los lodos, ya que se describen las operaciones para el uso adecuado de la unidad espesadora de lodos.
2. Al respecto de la descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Marcos La Laguna, se observó que las unidades de tratamiento que la componen se encuentran en funcionamiento, sin embargo, no se utiliza la unidad espesadora de lodos. Además, el patio de secado de lodos cuenta con techo de lámina galvanizada, lo que dificulta el ingreso de luz solar retrasando la deshidratación de los lodos. Sumado a eso, la inadecuada gestión de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales genera un problema de contaminación ambiental. Por lo anterior, es indispensable mejorar las condiciones de deshidratación de los lodos para contribuir a la resolución de la problemática que estos actualmente representan. Por otro lado, existen debilidades con relación a la salud y seguridad ocupacional de los operadores de la planta de tratamiento de aguas residuales, puesto que las unidades no cuentan con barandas de seguridad y los operadores carecen del equipo de protección personal adecuado.

3. Las características físicas y químicas de los lodos son favorables para su uso en el suelo como acondicionadores, sin embargo, el alto contenido de coliformes y huevos de helmintos hace necesaria la implementación de una post-estabilización que mejore su calidad y permita su aprovechamiento.
4. Los lodos residuales debidamente post-estabilizados mediante la aplicación de cal hidratada, en un porcentaje del 22 % en base seca, pueden ser utilizados como acondicionadores del suelo, ya que este proceso permite dar cumplimiento al límite máximo permisible del parámetro de coliformes fecales establecido en el artículo 59 del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Sin embargo, debe tomarse en consideración que los lodos adquieren un pH alcalino como resultado de dicho proceso.
5. El plan de manejo de lodos residuales, dirigido a los operadores de la planta de tratamiento de San Marcos La Laguna, describe de forma clara, resumida e ilustrada el funcionamiento de la planta y las operaciones que deben realizarse para el manejo adecuado de los lodos, siendo estas: la extracción de los lodos de los reactores secuenciales, la digestión aerobia de los lodos y la adición de floculante catiónico, el espesado de los lodos, la post-estabilización alcalina de los lodos y su embalaje en costales. Este manual implementó la adición de cal hidratada a los lodos en porcentajes que dependen del contenido de humedad de estos y que garantizan la reducción significativa de patógenos. Además, se hace énfasis en el equipo de protección personal necesario para la realización de tales operaciones.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio de sostenibilidad del plan de aprovechamiento de lodos residuales propuesto, con el objetivo de garantizar su implementación y permanencia en el tiempo, ya que dicho plan requiere de inversión económica para la compra de la cal hidratada y la contratación de operadores para el manejo de los lodos.
2. Evaluar la operación de la unidad espesadora de lodos, una vez implementado su uso, a fin de garantizar su uso y facilitar la manipulación de los volúmenes de lodos húmedos producidos. Dotar a los operadores de la planta de tratamiento del equipo de protección personal necesario para el resguardo de su salud e integridad física, así como, instalar barandas de seguridad en las unidades de la planta para reducir el riesgo de caídas. Además, instalar láminas traslúcidas en el patio de secado de lodos del centro de acopio para permitir el ingreso de luz solar y reducir los tiempos de secado. Considerar la construcción de un patio de secado de lodos en el área disponible del jardín de la planta, para evitar que los lixiviados de la deshidratación de los costales de lodo, previo a su traslado al patio de secado del centro de acopio, representen un foco de contaminación.
3. Caracterizar los lodos residuales al menos dos veces al año para el seguimiento y la evaluación de estos (Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos).

4. Utilizar los biosólidos como acondicionador de suelos en plantaciones forestales o comestibles, donde los frutos no estén en contacto directo con el suelo, como los árboles frutales o de aguacate, o se consuman cocidos, como el maíz y el café, y en suelos de pH con tendencia ácida.

5. Agregar la cal a los lodos cuando estos tengan una consistencia pastosa, humedad aproximada de 65-70 %, ya que en estas condiciones se garantiza la homogeneización de la cal con el lodo y, por lo tanto, la del pH (citado por Torres Marmolejo y Botina, 2005).

REFERENCIAS

- Arvizu, J. (1996). Tratamiento anaerobio-aerobio de las aguas residuales de las instalaciones del IIE. *Boletín IIE*, 20(5), 201-205. <https://biblat.unam.mx/es/revista/boletin-iae/articulo/tratamiento-anaerobio-aerobio-de-las-aguas-residuales-de-las-instalaciones-del-iae>
- Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes (2002). *Los fertilizantes y su uso*. <http://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>
- Autoridad para el Manejo Sustentable del Lago de Atitlán y su Entorno (2019). *Manual de procedimientos operacionales estándares*.
- Belzona Inc. (2010). *Tratamiento de aguas residuales*. https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf
- Campos, M., Beltrán, M., Fuentes, N., & Moreno, G. (2018). Huevos de helmintos como indicadores de contaminación de origen fecal en aguas de riego agrícola, biosólidos, suelos y pastos. *Biomédica*, 38(1), 42-53. <https://revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/3352>
- Castro, L. (2020). *Estudio Técnico de Aguas Residuales. Municipalidad de San Marcos La Laguna, Departamento de Sololá*.
- Castro, L., Hernández, J., Hernández, L., Soto, P., Luna, J., & Cifuentes, J. (2020). *Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales "PTAR Los Cebollales", en el municipio de Panajachel, departamento de Sololá, Guatemala*.

https://www.researchgate.net/publication/344305493_Evaluacion_del_sistema_de_tratamiento_de_aguas_residuales_PTAR_Los_Cebollales_en_el_municipio_de_Panajachel_departamento_de_Solola_Guatemala

Ferráns, L., Caucci, S., Cifuentes, J., Avellán, T., Dornack, C., & Hettiarachchi, H. (2018). *Wastewater management in the basin of lake Atitlan: a background study* [Manejo de aguas residuales en la cuenca del lago de Atitlán: un estudio de antecedentes]. United Nations University Institute for Integrated Management of Material Fluxes and of Resources (UNU-FLORES).

https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6451/WorkingPaper_No6.pdf

Flores, D. (2018). *Análisis de lodos de la planta de tratamiento de la Universidad Rafael Landívar para su uso como abono orgánico*. [Tesis de pregrado, Universidad Rafael Landívar de Guatemala]. Archivo digital.

<http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjrkd/2018/06/15/Flores-Daniela.pdf>

Flores, L., & Alcalá, J. (2010). *Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelos*. Universidad Nacional Autónoma de México.

<https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf>

Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento de España (2015). *Diseño, construcción y explotación de la planta de tratamiento de aguas residuales del barrio 2 de San Marcos La Laguna, Sololá, Guatemala, utilizando la tecnología de reactores secuenciales*.

http://www.guatecompras.gt/concursos/files/880/4396669%40TDRs%20PTAR%20Manclalaguna_no_v2015.pdf

Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento de España. (2017). *Manual de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales del barrio 2 de San Marcos La Laguna, Sololá, Guatemala.*

Francisco, J., Ramos, P., y Aguirre, G. (2011). Aprovechamiento agrícola del lodo generado en la PTAR de Puente Piedra - Perú. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 77(1), 66-74. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2011000100008

Galdámez, V. (2008). *Diagnóstico socioeconómico, potencialidades productivas y propuestas de inversión en San Marcos La Laguna, Sololá.* [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. http://biblioteca.usac.edu.gt/EPS/03/03_0679_v8.pdf

García, M. (2011). *Caracterización química de lodos vermicompostados y su efecto en tomate de cáscara.* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro de México]. Archivo digital. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3131/MAXIMINO%20GARC%c3%8da%20CAMILO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gutiérrez, B. (1986). *Estudio sobre digestión aeróbica de lodos en reactores de laboratorio semicontinuos.* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León de México]. Archivo digital. <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020072404.PDF>

Ibarra, D., Ruiz, J., González, D., Flores, J., & Díaz, G. (2009). Distribución espacial del pH de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. *Agricultura técnica en México*, 35(3), 267-276. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S056825172

[009000300003#:~:text=En%20general%2C%20el%20pH%20%C3%B3ptimo,et%20al.%2C%202005\).](#)

Instituto Nacional de Estadística Guatemala (2019). *Resultados del XII Censo Nacional de Población y VII de Vivienda*. https://censopoblacion.gt/archivos/resultados_censo2018.pdf

Jiménez, B., y Méndez, J. (2003). *Estabilización alcalina de lodos residuales en sistemas cerrados con recirculación de amoníaco opcional*. Universidad Autónoma de México. <https://patentimages.storage.googleapis.com/72/1f/23/1438bfaaa350c7/WO2005051853A1.pdf>

Laboratorio de Suelo y Planta del ICTA (2021). *Informe de resultados de la muestra Patio II*.

Laboratorio de suelo-planta-agua “Salvador Castillo Orellana” (2021). *Análisis físico de lodos residuales*.

Laboratorio del Departamento de Investigación y Calidad Ambiental de la AMSCLAE (2021). *Informe de resultados Propuesta de plan de aprovechamiento sanitariamente viable de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de San Marcos La Laguna, Sololá*.

Limón, J. (2013). *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?* https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/LIMÓN%202013.%20Los%20lodos%20de%20las%20plantas%20de%20tratamiento%20de%20aguas.pdf

- Medina, J. (2003). *Lodos residuales como alternativa para la recuperación de suelos*. [Monografía de pregrado, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro de México]. Archivo digital. <http://usi.earth.ac.cr/glas/sp/unarrow/0092.pdf>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (s. f.). *Interpretación de análisis de suelos*. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_05.pdf
- Miragaya, G., & Benarroch, A. (1986). Aprovechamiento de los lodos urbanos en la agricultura. *Revista del Centro Asociado de la UNED en Melilla*, 4(6), 63-70. <http://www.unedmelilla.es/nuevo/index.php/publicaciones/aldaba-2?task=download&id=6>
- Morales, P. (2005). *Digestión anaerobia de lodos de plantas de tratamiento de aguas y su aprovechamiento*. [Tesis de pregrado, Universidad de las Américas Puebla de México]. Archivo digital. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/morales_r_pm/
- Navarro, G., & Navarro, S. (2013). *Química agrícola: química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo*. <https://www.fao.org/documents/card/fr/c/6180fe75-f5b0-5702-a5f8-fd7de914d2c1>
- Oropeza, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1(1), 51-58. <https://silo.tips/download/lodos-residuales-estabilizacion-y-manejo>

Pellegrini, A. (2019). *Apunte de Edafología: Textura y color del suelo*.
https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/42831/mod_resource/content/1/TEMA%203%20-%20TEXTURA%20Y%20COLOR.pdf

Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté, S. A.
<https://books.google.com.gt/books?id=30etGjzPXyWC>

Ramírez, E. (2007). *Evaluación de la planta de tratamiento de aguas de una industria farmacéutica nacional, según el Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos y propuesta para el aprovechamiento de desechos*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital.
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1048_Q.pdf

Reglamento de descargas de aguas residuales en la cuenca del lago de Atitlán. Acuerdo Gubernativo No. 12-2011. (17 de enero de 2011). Presidencia de la República de Guatemala. Diario de Centroamérica No. 23 tomo CCXCI. Guatemala. <https://legal.dca.gob.gt/>

Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Acuerdo Gubernativo No. 236-2006. (05 de mayo de 2006). Presidencia de la República de Guatemala. Diario de Centroamérica No. 26 tomo CCLXXIX. Guatemala. <https://legal.dca.gob.gt/>

Silva, J., Bedoya, D., y Torres, P. (2013). Efecto del secado térmico y el tratamiento alcalino en las características microbiológicas y químicas de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Química Nova* 36(2), 207-2014.
https://www.researchgate.net/publication/262705786_Efecto_del_secado_termico_y_el_tratamiento_alcalino_en_las_caracteristicas_microbiolo

[gicas y quimicas de biosolidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas](#) [Effect of thermal drying an](#)

Torres, P., Marmolejo, L., y Botina, A. (2005). *Mejoramiento del potencial agrícola de lodos digeridos anaeróbicamente con el uso de cal*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/33134>

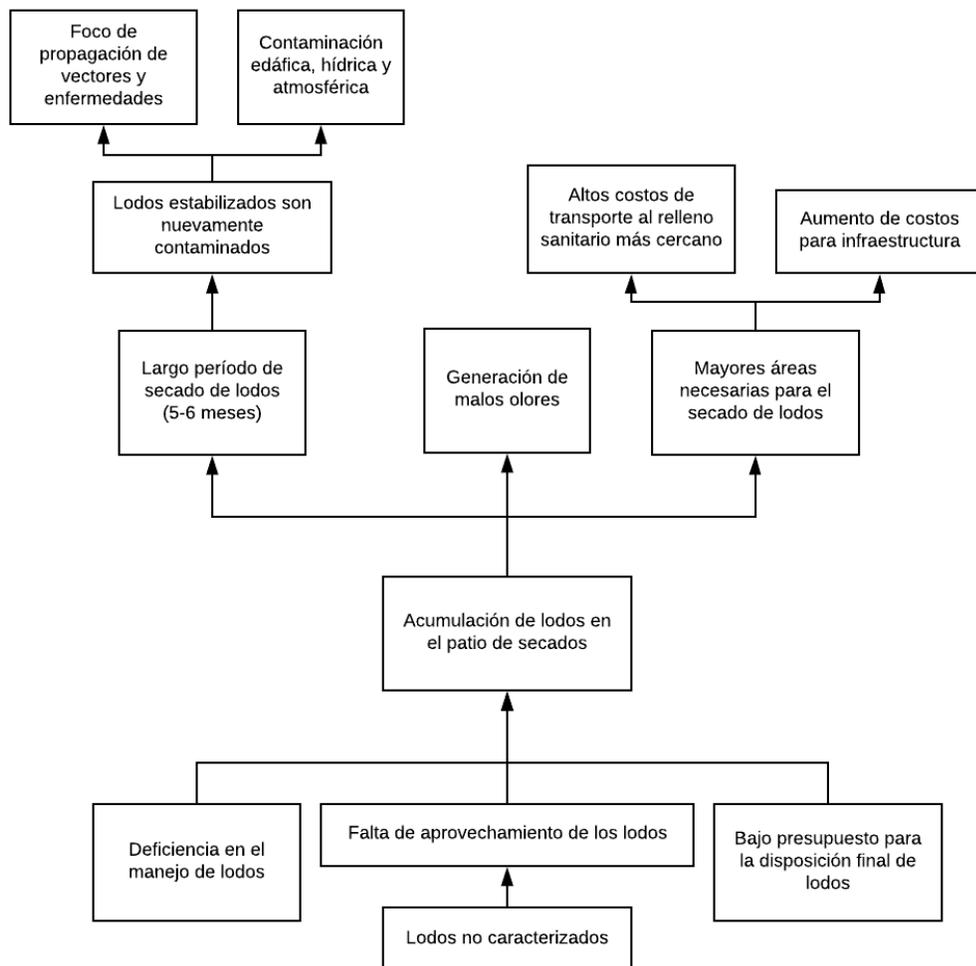
Utria, E., Reynaldo, I., Cabrera, A., Morales, D., Morúa, A., & Álvarez, N. (2006). Caracterización de los biosólidos de aguas residuales de la estación depuradora de aguas residuales "Quibú". *Cultivos tropicales*, 27(3), 83-87. <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193215825013.pdf>

Valverde, J. (2007). *Riego y drenaje*. Editorial Universidad Estatal a Distancia. https://www.google.com.gt/books/edition/Riego_Y_Drenaje/Chy5vADO63AC?hl=es&gbpv=1&dq=Riego+y+drenaje.+valverde&pg=PR7&printsec=frontcover

APÉNDICES

Apéndice 1.

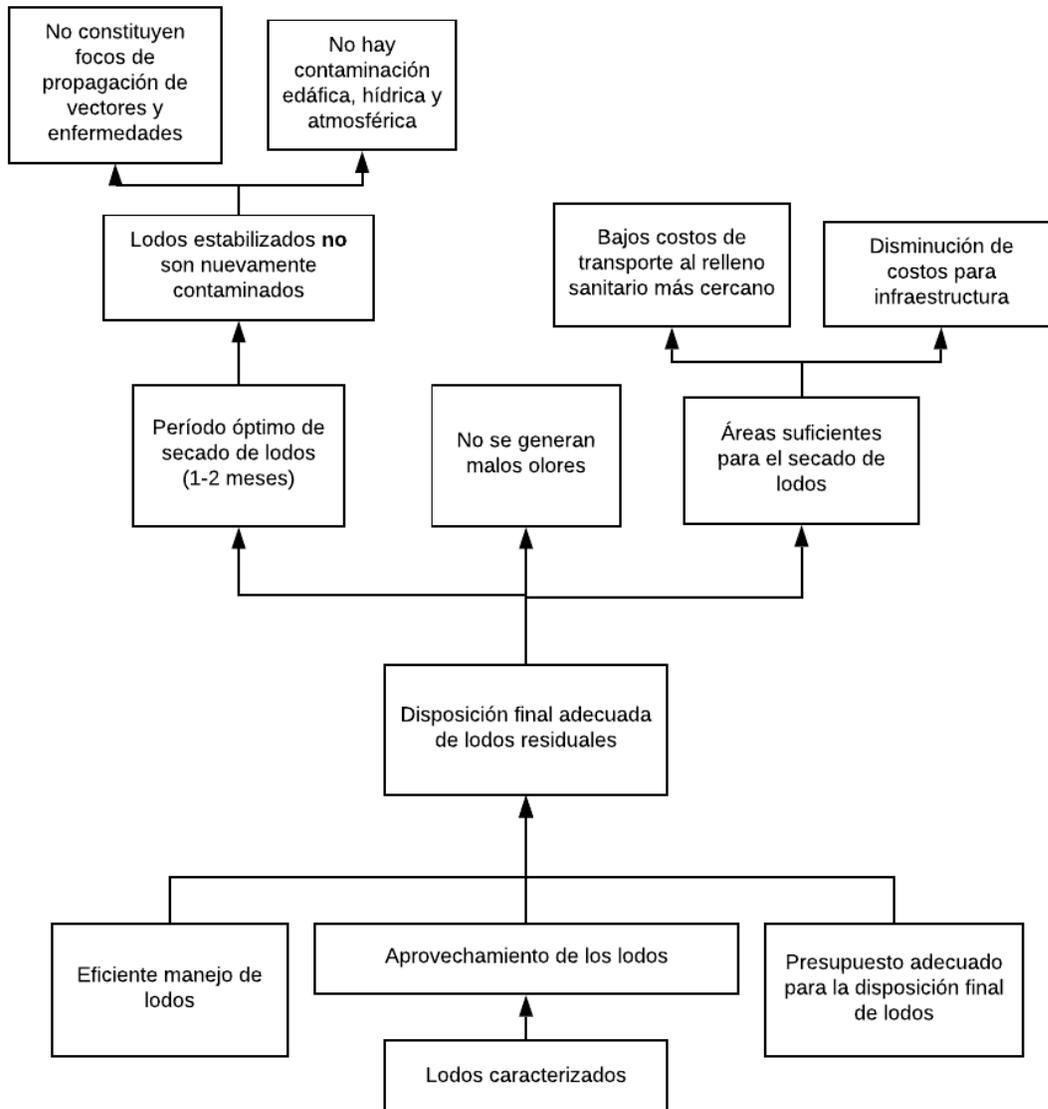
Árbol de problemas



Nota. Árbol de problemas de la investigación. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

Apéndice 2.

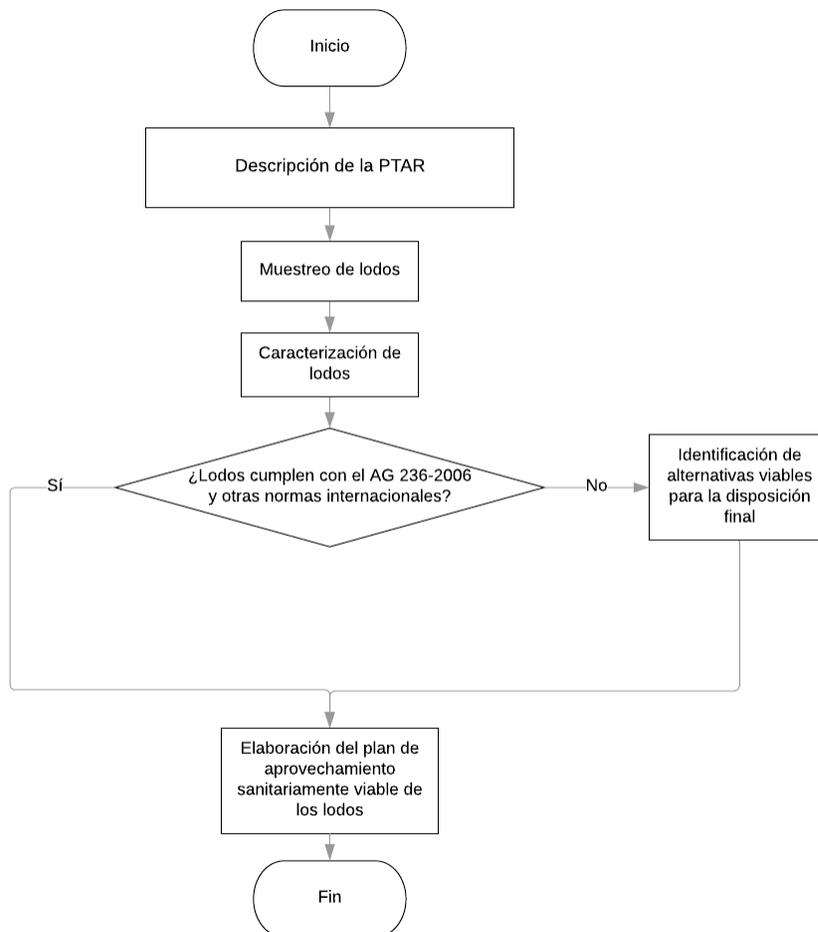
Árbol de objetivos



Nota. Árbol de objetivos de la investigación. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

Apéndice 3.

Diagrama de flujo de la metodología de investigación



Nota. Diagrama de flujo de la metodología de investigación. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

Apéndice 4.

Recomendaciones para el uso de lodos como acondicionadores del suelo

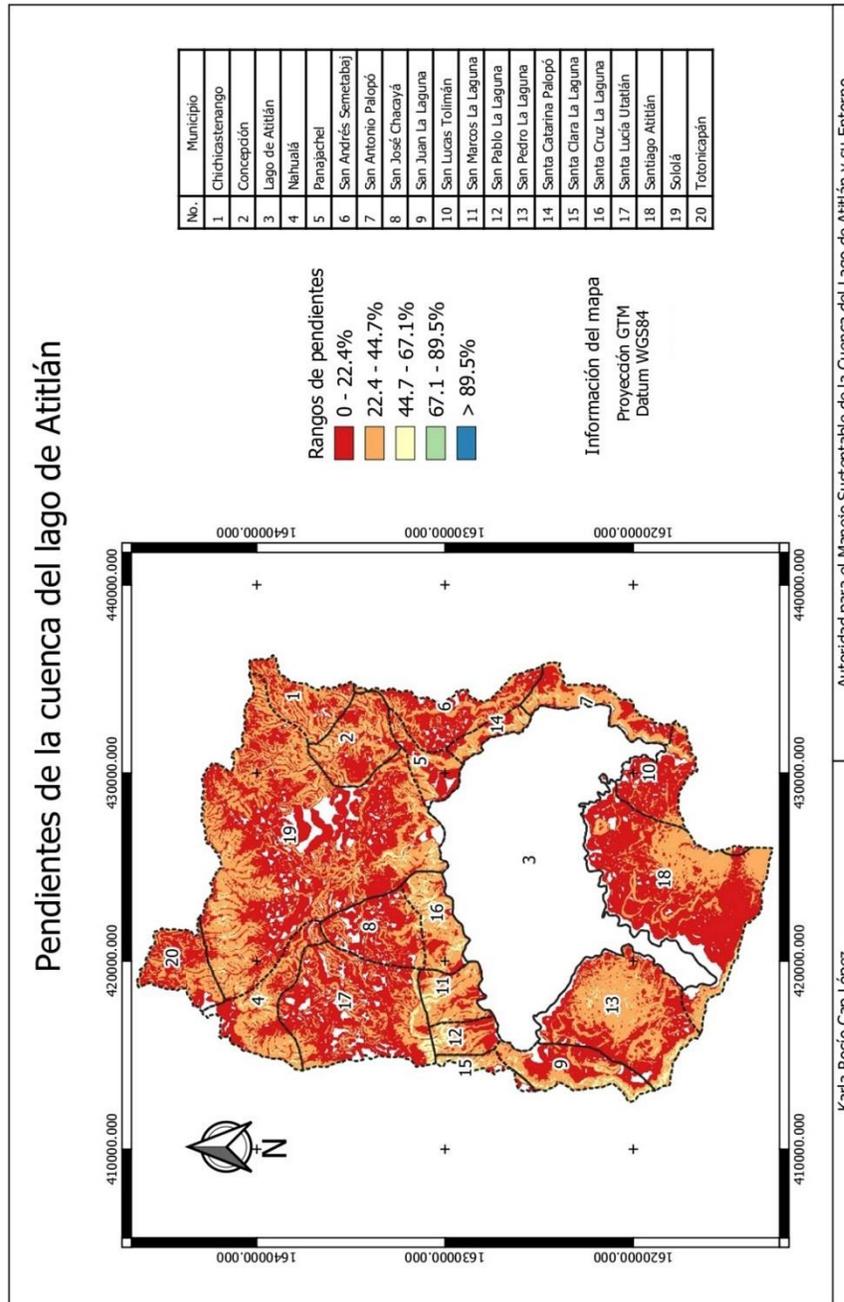
Una vez los lodos residuales hayan sido sometidos a la post-estabilización alcalina sugerida, estos pueden ser aprovechados como acondicionadores del suelo, sin embargo, deben tomarse algunas consideraciones para reducir el riesgo de contaminación de cuerpos de agua y de afectación a la salud pública:

- La disposición de lodos en terrenos con fuertes pendientes aumenta el riesgo de contaminación de los cuerpos de agua superficiales por escorrentía debido a la precipitación, por lo que deben ser aplicados en áreas de pendientes suaves. Se sugiere utilizar los lodos estabilizados en municipios aledaños como San José Chacayá y Santa Lucía Uatlán. Como medida adicional, se recomienda disponer los lodos en la época seca del año y en áreas alejadas a los cuerpos de agua, como ríos y nacimientos.
- El uso de los lodos estabilizados como mejoradores de suelos para cultivos comestibles se restringe a aquellos cuyos frutos no estén en contacto directo con el suelo, puesto que es poco probable que los agentes patógenos asciendan por la planta a través de las raíces.

Nota. Consideraciones a tener en cuenta. Elaboración propia.

Apéndice 5.

Mapa de pendientes en la Cuenca del Lago de Atitlán



Nota. Pendientes de la cuenca del lago de Atitlán. Elaboración propia, realizado con Qgis.

Apéndice 6.

Fotografías tomadas durante el Ejercicio Profesional Supervisado



Área de la PTAR donde se embalan y escurren los lodos, sin recubrimiento en el suelo que evite la infiltración de los lixiviados.



Reactor secuencial sin barandas de seguridad, lo que representa un riesgo de caída dentro del reactor.

Continuación del apéndice 6.



Operador de la PTAR sin equipo mínimo de protección personal.



Patio de secado de lodos con deficiente ingreso de luz solar debido al techado con lámina galvanizada.

Continuación del apéndice 6.



Recipientes de lodos residuales mezclados con hidróxido de calcio o cal hidratada a dosis de 2, 5, 7 y 11 %, en base húmeda.

Nota. Fotografías del proyecto. Elaboración propia.

Apéndice 7.

Manual de operación para el manejo adecuado de los lodos residuales

Manual de operación para el manejo adecuado
de los lodos residuales en la PTAR Barrio 2 de
San Marcos La Laguna, Sololá.



Primera edición

Presentado por: Karla Cap
Revisado por: Ing. Rodolfo Castro

Continuación del apéndice 7.

Descripción general del funcionamiento de la PTAR del Barrio 2 del municipio de San Marcos La Laguna, departamento de Sololá

La planta de tratamiento de aguas residuales lleva a cabo un proceso aeróbico de lodos activados y opera mediante la tecnología de Reactores Secuenciales Discontinuos (SBR). El proceso de tratamiento del agua residual consta de las siguientes etapas:

1. Pretratamiento

- El agua ingresa a la PTAR y es recibida en la trampa de sólidos y el desarenador para eliminar sólidos no biodegradables, por ejemplo, arena, trapos, botellas y bolsas plásticas, toallas sanitarias, duroport, etc., los cuales deben retirarse de las rejillas y depositarse en una bolsa plástica que debe sellarse inmediatamente después de ser utilizada.
- Luego, el agua entra a la trampa de grasas, donde se separa el agua de las grasas por diferencia de peso.
- El agua pretratada es acumulada en el tanque de homogenización y bombeo para posteriormente enviarse hacia el reactor secuencial.



Trampa de sólidos y desarenador

2. Mezcla anóxica

- Llenado: El agua pretratada es bombeada hacia los reactores, un proceso que tarda entre media hora, o una hora.
- Al mismo tiempo que el reactor es llenado, deben arrancarse las dos bombas tipo venturi para mezclar y disolver los sólidos de las aguas residuales. Aquí sucede la desnitrificación.

Continuación del apéndice 7.



Reactor en etapa de llenado y mezcla anóxica

3. Aireación

- Son activados los difusores de burbuja fina de cada reactor para transferir oxígeno a las aguas residuales. En esta etapa los microorganismos se alimentan de la materia orgánica (contaminación) de las aguas residuales y se lleva a cabo la nitrificación. Este proceso dura aproximadamente 5 horas.



Reactor en etapa de aireación

Continuación del apéndice 7.

4. Sedimentación

- Se apagan los difusores de burbuja fina y cada reactor se convierte en un sedimentador, con lo que el lodo se separa de las aguas residuales, se sedimenta y se acumula en el fondo del reactor, dejando en la parte superior el agua clarificada. Este proceso dura aproximadamente 2 horas.

5. Evacuación

- Se activan las bombas de evacuación para descargar el agua clarificada del reactor hacia el sistema de cloración. La succión en el reactor debe ocurrir 20 cm debajo de la superficie del agua residual.
- Eventualmente también se evacúa parte de los lodos residuales, que se acumulan al fondo del reactor, e inicia el tratamiento de los mismos en el digestor de lodos.

6. Desinfección del efluente

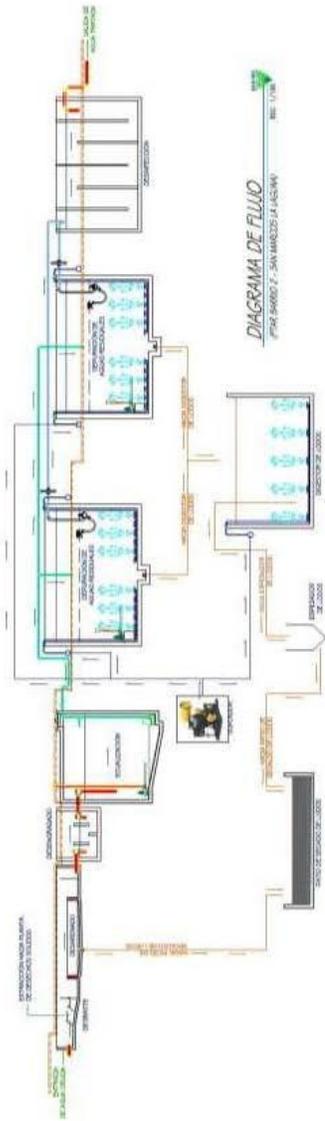
- Mediante un filtro de anillos y un sistema de cloración con hipoclorito de sodio, se desinfecta el agua proveniente de los reactores. Este proceso tiene una duración aproximada de 12 horas.

7. Descarga de agua tratada

- El agua residual tratada hasta su desinfección es descargada a un pozo de absorción para que se integre al subsuelo. Este proceso se realiza cada 12 horas.

Continuación del apéndice 7.

**Diagrama de flujo de la PTAR del Barrio 2 del municipio de San Marcos La Laguna,
departamento de Sololá**



Manual de operación para el manejo adecuado de los lodos residuales

Purga de lodos de los reactores

Periódicamente deben extraerse los lodos de los reactores para mantener lodos de una edad determinada que permitan el equilibrio biológico adecuado para el tratamiento de las aguas residuales.

Para saber si es momento de extraer los lodos de los reactores, se debe realizar el siguiente procedimiento:

1. Sumerja el cono imhoff en el reactor, 5 minutos después de activar los difusores de los reactores, en un punto donde observe mayor burbujeo y tome una muestra de 1,000 mL.
2. Deje reposar el cono imhoff en su soporte durante 30 minutos. Observe que, durante ese tiempo, el lodo se depositará en el fondo del cono y habrá agua clara en la superficie.
3. Lea el nivel de lodo dentro del cono. Si este se ha asentado hasta 700 mL o más, se recomienda la extracción de lodos.



La extracción de los lodos del reactor debe realizarse finalizado el período de sedimentación y después de evacuar el agua clarificada. Para ello, coloque la bomba sumergible al fondo del reactor y dirija los lodos hacia el digester de lodos.

Digestión de lodos y adición de floculante

Deposite los lodos en el digester dejando libres 80 cm de profundidad, aproximadamente. Mantenga los lodos en el digester durante 7 a 15 días utilizando

Continuación del apéndice 7.

los difusores de burbuja fina para su aireación adecuada y manteniendo los mismos ciclos de aireación que los reactores.

Agregue al digester de lodos 3.3 toneles de solución madre de floculante catiónico preparado al 0.5%¹ y active los difusores de burbuja durante 2 horas. Luego, desactive los difusores de aire y deje sedimentando los lodos durante otras 2 horas.

Espesado de lodos

Evacúe el agua de la superficie del digester de lodos de regreso al tanque reactor y traslade los lodos digeridos, acumulados en el fondo del digester, hacia el espesador de lodos por medio de la tubería instalada para dicho fin.

Coloque un costal a la salida del espesador y abra la llave de salida del espesador. Cuando el costal se llene, retírelo y coloque otro. Repita el proceso hasta vaciar el espesador.



Espesador de lodos

¹ Disolver 1 kg de floculante catiónico por cada tonel de agua.

Continuación del apéndice 7.

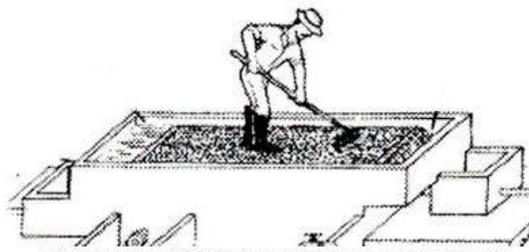
Secado y estabilización alcalina de lodos en el patio de secado

Lleve los costales que contienen los lodos al patio de secado de lodos y vierta su contenido en el lecho de secado. Luego de unas semanas, agregue cal hidratada según el contenido de humedad del lodo (vea la Tabla 1) y mezcle con ayuda de una pala o azadón. Utilice máscara de gases, botas y guantes de hule durante la aplicación de cal.

Tabla 1. Libras de cal hidratada por quintal de lodo según la humedad del lodo

Humedad ² (%)	<i>lb_{cal}/qq_{lodo}</i> ³
81	4.18
77	5.06
60	8.80

Es recomendable que agregue la cal cuando el lodo esté pastoso (60% de humedad). En ese caso, por cada quintal de lodo agregue 8.80 libras de cal hidratada.



Aplicación de cal hidratada en el patio de secado de lodos

² Humedades típicas en el patio de secado de lodos

³ Libras de cal por quintal de lodo (un quintal es equivalente a 100 libras).

Continuación del apéndice 7.

Embalaje de lodos

Una vez la humedad de los lodos hayan alcanzado un contenido de humedad de 50% o menos, estarán listos para ser encostalados. Trabaje los lodos secos con un azadón o algún otro medio mecánico y encostale. Para obtener una mejor textura de los lodos, se recomienda cernirlos.

Aprovechamiento de los lodos

Con la aplicación de la cal a los lodos se eliminan los patógenos, por lo que su aprovechamiento en el suelo se vuelve sanitariamente viable. Tome en cuenta que el pH de los lodos será alcalino, con un valor aproximado de 10 a 11. Por ello, los lodos deberán ser utilizados en suelos ácidos para neutralizar el pH.

Continuación del apéndice 7.

Salud y seguridad ocupacional en el manejo de lodos residuales

La manipulación de lodos residuales representa riesgos para la salud de los operadores de la planta de tratamiento; por ello, es indispensable el uso de equipo de protección personal adecuado y la implementación de buenas prácticas.

El equipo fundamental para el resguardo de la salud de los operadores en el ejercicio de sus actividades comprende:

- Máscara de gases: deben contarse con máscaras capaces de proteger de gases como el metano, amoníaco y dióxido de azufre, ya que estos se generan durante el tratamiento de las aguas residuales y de los lodos.



- Gafas de seguridad: para evitar el contacto directo de aguas residuales y lodos con los ojos.



- Guantes y overoles: para evitar el contacto directo de aguas residuales y lodos con el cuerpo de los operadores ya que estos contienen altas cargas de patógenos y existe riesgo de infección a través de la piel.



- Botas de caucho con punta de metal: para proteger del contacto directo a la vez que se protegen los pies de posibles accidentes con elementos pesados.



Continuación del apéndice 7.

Recomendaciones

1. Agregar la cal cuando el lodo haya alcanzado una humedad de 60% para evitar el recrecimiento de microorganismos patógenos debido a altos contenidos de humedad y para garantizar una buena mezcla del lodo con la cal.
2. Adquirir mensualmente 7 kg de floculante catiónico, o la cantidad que demande la producción de lodo, para el espesado del volumen de lodo generado en ese período de tiempo.
3. Adquirir mensualmente 500 lb de cal hidratada, o la cantidad que demande la producción de lodo, para la estabilización alcalina del volumen de lodo generado en ese período de tiempo.
4. Determinar el contenido de metales pesados (mg/kg) y coliformes fecales (UFC/kg) en los lodos estabilizados, al menos dos veces al año en cumplimiento al Artículo 49 del Acuerdo Gubernativo No. 236-2006.

Nota. Manual de operación para el manejo adecuado de los lodos residuales en la PTAR Barrio 2 de San Marcos La Laguna, Sololá. Elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1.

Artículo 20. Situaciones no reguladas.

<p style="text-align: center;">CAPÍTULO VIII DISPOSICIONES FINALES</p> <p>Artículo 20. Situaciones no reguladas. Lo no dispuesto expresamente en el presente reglamento se aplicará el Acuerdo Gubernativo número 236-2006, de fecha 5 de mayo de 2006 "Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos"; el Acuerdo Gubernativo número 431-2007, de fecha 17 de septiembre de 2007, "Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental".</p> <p>Artículo 21. Derogatoria. Se deroga el Acuerdo Gubernativo número 51-2010,d e fecha 8 de febrero de 2010, que contiene el Reglamento de Vertidos para Cuerpos Receptores de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno.</p> <p>Artículo 22. Vigencia. El presente reglamento empezará a regir ocho días después de su publicación en el Diario de Centro América.</p> <p style="text-align: center;">COMUNÍQUESE</p> <p style="text-align: center;">ÁLVARO COLOM CABALLEROS</p> <p style="text-align: center;">Luis Alberto Ferraté Felice Ministro de Ambiente y Recursos Naturales</p>

Nota. Artículo 20, situaciones no reguladas. Obtenido de Reglamento de descargas de aguas residuales en la cuenca del lago de Atitlán. Acuerdo Gubernativo No. 12-2011. (17 de enero de 2011). Presidencia de la República de Guatemala. Diario de Centroamérica No. 23 tomo CCXCI. Guatemala. <https://legal.dca.gob.gt/>

Anexo 2.

Capítulo VIII. Parámetros para lodos

CAPÍTULO VIII PARÁMETROS PARA LODOS

Artículo 38. OBLIGATORIEDAD. Todos los lodos producidos como consecuencia del tratamiento de aguas residuales que representen un riesgo para el ambiente y la salud y seguridad humana deben cumplir los límites máximos permisibles para su disposición final del presente Reglamento.

Artículo 39. APLICACIÓN. Los lodos que se regulan en el presente Reglamento son aquéllos generados por el tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario o especial.

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 cualquiera de las siguientes formas:

- a) Aplicación al suelo: acondicionador, abono o compost.
- b) Disposición en rellenos sanitarios.
- c) Confinamiento o aislamiento.
- 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

Continuación del anexo 2.

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 bio infecciosos, 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.

Artículo 46. COMERCIALIZACIÓN. La comercialización de los lodos producidos es libre, siempre que los mismos se caractericen y cumplan con los tratados y convenios internacionales que rijan en la materia y 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.

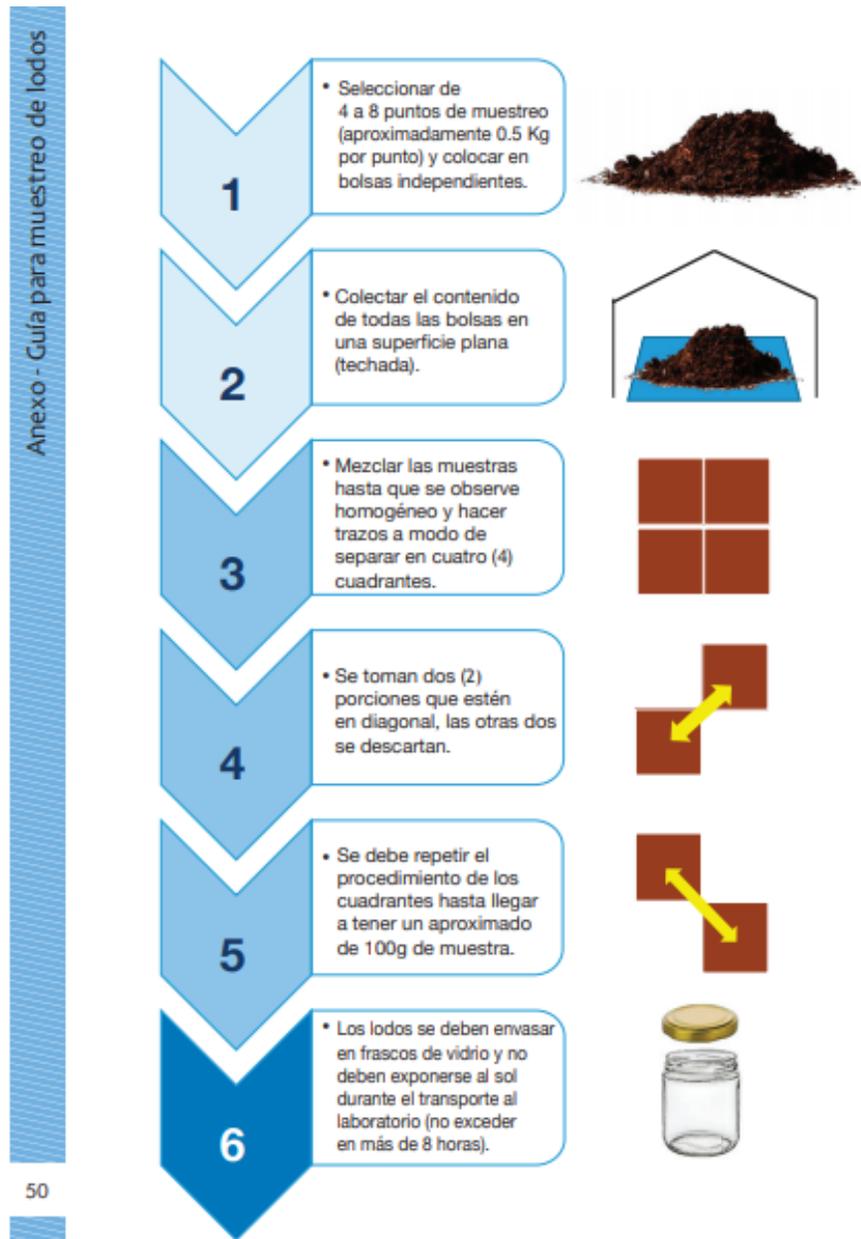
Artículo 47. CONTRATACIÓN DE SERVICIOS. Las empresas que presten los servicios de extracción, manejo o disposición final de lodos deberán cumplir lo dispuesto en los artículos 41, 42, 43, 44, 45 y 46 del presente Reglamento. En el caso de la contratación de cualquiera de los servicios establecidos en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

Nota. Capítulo VIII, parámetros para lodos. Obtenido de Obtenido de Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Acuerdo Gubernativo No. 236-2006. (05 de mayo de 2006). Presidencia de la República de Guatemala. Diario de Centroamérica No. 26 tomo CCLXXIX. Guatemala. <https://legal.dca.gob.gt/>.

Anexo 3.

Guía para muestreo de lodos.



Nota. Guía para el muestreo de lodos. Obtenido de Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación y JICA (2008). *Guía para el manual general del reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos.* (p. 50).

Anexo 5.

Resultados de la caracterización de los lodos residuales

IDENTIFICACION	gr/cc		%				CLASE TEXTURAL
	Da	Dr	Poros	Arcilla	Limo	Arena	
M-1	0.8000	2.4801	67.74	7.39	3.07	89.54	ARENA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
LABORATORIO DE SUELO-PLANTA-AGUA "SALVADOR CASTILLO ORELLANA"

INTERESADO: KARLA CAP
FECHA DE INGRESO: 4/5/2021

ANÁLISIS FÍSICO DE LODOS RESIDUALES

[Firma]

CAMPUS CENTRAL, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
EDIFICIO UVIGER, TERCER NIVEL, CIUDAD UNIVERSITARIA, ZONA 12 GUATEMALA
CÓDIGO POSTAL 01012. APARTADO POSTAL 1545. TEL.: (502) 24188000, EXTENSIÓN 1769

Nota. Caracterización física de los lodos residuales (muestra 1). Obtenido del Laboratorio de suelo-planta-agua "Salvador Castillo Orellana" (2021). *Análisis físico de lodos residuales.* (p. 1).

Anexo 6.

Informe de resultados



**GOBIERNO de
GUATEMALA**
DR. ALEJANDRO GIAMMATTEI

**AUTORIDAD PARA EL
MANEJO SUSTENTABLE DE
LA CUENCA DEL LAGO DE
ATITLÁN Y SU ENTORNO**

DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN Y CALIDAD AMBIENTAL

Panajachel, Sololá, 09 de julio de 2021
LAB-DICA-005-2021

**INFORME DE RESULTADOS PROPUESTA DE PLAN DE APROVECHAMIENTO SANITARIAMENTE
VIABLE DE LOS LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE
SAN MARCOS LA LAGUNA, SOLOLÁ**

Responsable: Licda. Flor Mayari Barreno Ortiz, *Unidad de Analítica Ambiental, Encargada de Laboratorio.*

A continuación, se presentan los resultados físico, químico y biológico de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de San Marcos la Laguna.

Cuadro 1. Resultados físico, químico y biológico

No.	Parámetros	Dimensionales	Método/Equipo	Límite de detección	Patio de Secado de Lodos	Lodos de Digestor	Patio de Secado de Lodos
1	Potencial de Hidrógeno	pH	Potenciómetro PC 700, digital	0.1 - 14	7.14	7.31	6.42
2	Conductividad	µS/cm	Sonda Multiparamétrica Hach HQ 40D, digital	0.01 - 200.0	228	113.9	12.51
3	Sólidos Volátiles	%	Standard Methods 17 edition, APHA 2540-G	≥ 1	52.25	71.44	70.85
4	Fósforo Total	gr/Kg	Standard Methods 17 edition, APHA 4500-P B, 4500-P E, POE 10	0.01-0.4	24	20	4
5	Nitrógeno Total	mg/kg	Merck análogo a DIN EN ISO 11905-1	0.5-15	81,000	67,000	3,000
6	Coliformes Fecales	UFC	POE 17, Análisis microbiológico: Método filtración por membrana; 3M™ Petrifilm™ Placas E. coli / Coliformes	3-1100	2,000	4,000	3,800
7	Huevos de Helmintos	# huevos/2 g ST	NOM-004-SEMARNAT-2002, Anexo V Método para la cuantificación de huevos de helmintos en lodos y biosólidos	≥ 1	41	44	122

Fuente: DICA-AMSCLAE, 2021

Licda. Flor Mayari Barreno Ortiz
Encargada de Laboratorio
-AMSCLAE- AMSCLAE-
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN Y CALIDAD AMBIENTAL

MSc. Elías César de Matamoros Rojas Morales
Jefe del Depto. de Investigación y Calidad Ambiental
-AMSCLAE-
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN Y CALIDAD AMBIENTAL

Vía Principal 3-56, Zona 2, Plaza San Lorenzo. Panajachel, Sololá, Guatemala, C.A.
Teléfonos: PBX (502) 7961-6464

Continuación del anexo 6.



Instituto de Ciencia
y Tecnología
Agrícolas (ICTA)

Solicitante	Karla Cap	Identificación de muestra	Patio I
Finca	S/D	Departamento	Solola
Municipio	San Marcos La Laguna	Cultivo	N/A
Fecha	02/06/2021	Informe No.	18921
Ref. Lab	33821		

PARAMETRO	VALOR	UNIDAD	Observacion
N	5.2	%	
FOSFORO(P)	0.20	%	
POTASIO (K)	0.30	%	
MAGNESIO (Mg)	0.28	%	
CALCIO (Ca)	0.60	%	
HIERRO (Fe)	148.00	%	
COBRE (Cu)	28.70	ppm	
MANGANESO (Mn)	0.01	ppm	
ZINC (Zn)	454.00	ppm	
%MO	57.20	%	
%CO	33.20	%	

MÉTODOS ANALÍTICOS

Calcinación, Bases de cambio Absorción Atómica, Lectura directa; P disponible Colorimétrico: directo; Micronutrientes Absorción Atómica, Lectura directa; Solución extractora: HCL 6M Observación: n/d = no determinado *n/d = no detectado. Los datos de análisis son válidos para la muestra en la forma como fue recibida en el laboratorio y en su impresión original. El laboratorio del ICTA no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le dé a estos datos de análisis.

Km. 21.5 carretera hacia Amatitlán, Bárcena, Villa Nueva, Guatemala, C.A.
PBX (502) 6670 1500 Ext:758

E-mail: labsueloyplanta@icta.gob.gt

www.icta.gob.gt síganos en:



@ICTAGuate



Continuación del anexo 6.



Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA)

Solicitante	Karla Cap	Identificación de muestra	Digestor
Finca	S/D	Departamento	Solola
Municipio	San Marcos La Laguna	Cultivo	N/A
Fecha	02/06/2021	Informe No.	18821
Ref. Lab	33721		

PARAMETRO	VALOR	UNIDAD	Observacion
N	6.3	%	
FOSFORO(P)	0.25	%	
POTASIO (K)	0.40	%	
MAGNESIO (Mg)	0.19	%	
CALCIO (Ca)	0.70	%	
HIERRO (Fe)	64.30	%	
COBRE (Cu)	36.00	ppm	
MANGANESO (Mn)	0.01	ppm	
ZINC (Zn)	495.00	ppm	
%MO	73.40	%	
%CO	42.60	%	

MÉTODOS ANALÍTICOS

Calcinación, Bases de cambio Absorción Atómica, Lectura directa; P disponible Colorimétrico: directo; Micronutrientes Absorción Atómica, Lectura directa; Solución extractora: HCL 6M Observación: n/d = no determinado *n/d = no detectado. Los datos de análisis son válidos para la muestra en la forma como fue recibida en el laboratorio y en su impresión original. El laboratorio del ICTA no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le dé a estos datos de análisis.

Km. 21.5 carretera hacia Amatitlán, Bárcena, Villa Nueva, Guatemala, C.A.
PBX (502) 6670 1500 Ext:758

E-mail: labsueloyplanta@icta.gob.gt

www.icta.gob.gt síganos en:    @ICTAGuate



Continuación del anexo 6.



Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA)

Solicitante	Karla Cap	Identificación de muestra	Patio II
Finca	S/D	Departamento	Solola
Municipio	San Marcos La Laguna	Cultivo	N/A
Fecha	02/06/2021	Informe No.	19021
Ref. Lab	33921		

PARAMETRO	VALOR	UNIDAD	Observación
N	6.2	%	
FOSFORO(P)	0.21	%	
POTASIO (K)	0.20	%	
MAGNESIO (Mg)	0.20	%	
CALCIO (Ca)	0.70	%	
HIERRO (Fe)	72.60	%	
COBRE (Cu)	32.00	ppm	
MANGANESO (Mn)	0.01	ppm	
ZINC (Zn)	499.00	ppm	
%MO	73.00	%	
%CO	42.30	%	

MÉTODOS ANALÍTICOS

Calcinación, Bases de cambio Absorción Atómica, Lectura directa; P disponible Colorimétrico: directo; Micronutrientes Absorción Atómica, Lectura directa; Solución extractora: HCL 6M Observación: n/d = no determinado *n/d = no detectado. Los datos de análisis son válidos para la muestra en la forma como fue recibida en el laboratorio y en su impresión original. El laboratorio del ICTA no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le dé a estos datos de análisis.

Km. 21.5 carretera hacia Amatitlán, Bárcena, Villa Nueva, Guatemala, C.A.
 PBX (502) 6670 1500 Ext:758
 E-mail: labsueloyplanta@icta.gob.gt
 www.icta.gob.gt síganos en:    @ICTAGuate



Nota. Resultados de los análisis de macronutrientes y materia orgánica en la muestra 3 de lodos residuales. Obtenido del Laboratorio de Suelo y Planta del ICTA (2021). *Informe de resultados de la muestra Patio II.*

Anexo 7.

Contenido de coliformes fecales en lodos con post-estabilización alcalina



AUTORIDAD PARA EL
MANEJO SUSTENTABLE DE
LA CUENCA DEL LAGO DE
ATITLÁN Y SU ENTORNO

DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN Y CALIDAD AMBIENTAL

Panajachel, Sololá, 16 de agosto de 2021
LAB-DICA-008-2021

INFORME DE RESULTADOS PROPUESTA DE PLAN DE APROVECHAMIENTO SANITARIAMENTE VIABLE DE LOS LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE SAN MARCOS LA LAGUNA, SOLOLÁ

Responsable: Licda. Flor Mayari Barreno Ortiz, *Unidad de Analítica Ambiental, Encargada de Laboratorio.*

A continuación, se presentan los resultados microbiológicos de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de San Marcos la Laguna, previo y posterior al tratamiento evaluado.

Cuadro 1. Microbiológico

No.	Parámetros	Dimensionales	Método/Equipo	Límite de detección	Patio de Secado de Lodos				
					Sin tratamiento	2%	5%	7%	11%
1	Coliformes Fecales	UFC/Kg	POE 17, Análisis microbiológico: Método filtración por membrana; 3M™ Petrifilm™ Placas E. coli / Coliformes	≥1	13,750,000	25,000	No detectable	No detectable	No detectable

Fuente: DICA-AMSCLAE, 2021



Vía Principal 3-56, Zona 2, Plaza San Lorenzo, Panajachel, Sololá, Guatemala, C.A.
Teléfonos: PBX (502) 7961-6464

Nota. Contenido de coliformes fecales en lodos con post-estabilización alcalina a diversas dosis de cal hidratada: sin cal, 2, 5, 7 y 11 %. Obtenido Laboratorio del Departamento de Investigación y Calidad Ambiental de la AMSCLAE (2021). *Informe de resultados Propuesta de plan de aprovechamiento sanitariamente viable de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de San Marcos La Laguna, Sololá.*