



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos  
Hidráulicos (ERIS)

**POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN EL  
PROCESO DE POTABILIZACIÓN DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

**Ing. Adriana Daniela Orozco Miranda**

Asesorado por el Dr. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera

Guatemala, noviembre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN EL  
PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y  
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

**ING. ADRIANA DANIELA OROZCO MIRANDA**

ASESORADO POR EL ING. FÉLIX ALAN DOUGLAS AGUILAR CARRERA

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE  
**MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN CIENCIAS DE INGENIERÍA  
SANITARIA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIO	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL**

EXAMINADOR	Msc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
EXAMINADOR	Msc. Ing. Adán Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	Dr. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera

## **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:

### **POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, con fecha 03 de marzo de 2015.

**Ing. Adriana Daniela Orozco Miranda**

[daniela.om9@gmail.com](mailto:daniela.om9@gmail.com)

Carné No. 200831476



Guatemala, 27 de noviembre de 2017

M.Sc. Ing Adán Pocasangre Collazos  
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria  
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS)  
Facultad de ingeniería, USAC

Habiendo revisado el documento titulado:

**POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN EL  
PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

Elaborado por la ingeniera Adriana Daniela Orozco Miranda, como parte de su Estudio Especial, y como requisito para optar al grado académico de Maestro en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, mediante la presente me permito informarle mi satisfacción con su contenido y revisión de lingüística, por lo tanto, le comunico que dicho documento cuenta con mi aprobación.

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

Atentamente.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Dr. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera  
Asesor del estudio



Guatemala, 28 de noviembre 2017

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado  
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS):

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el informe final del Estudio Especial titulado:

**POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN EL  
PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

Presentado por el estudiante:

**Ing. Adriana Daniela Orozco Miranda**

Les manifiesto que el estudiante cumplió en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio. Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,  
"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos  
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria



Guatemala, 29 de noviembre de 2017

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIE- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis, M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos y, Dr. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria ; M.Sc Ing. Adán Pocasangre Collazos y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Ruth Nohemí Cardona Mazariegos, Colegiado No. 12498, al trabajo de la estudiante Ing. Adriana Daniela Orozco Miranda, titulado: **POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO.** En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala al veintinueve día de noviembre de dos mil diecisiete.

**Imprimase**

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

**DIRECTOR**

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Pues siempre será mi inspiración, de Él viene la buena enseñanza, quien hace sobreabundar en toda sabiduría e inteligencia, y se halla el bien.

### **Mis padres**

Jener Isaías y Reyna Elizabeth, porque desde siempre han creído en mí y me demuestran cada día con su dedicación y esfuerzo, el camino que quiero.

### **Mis hermanos**

Celestina, Daniel y Mariela, porque llenan mi vida de incontables alegrías y siempre están a mi lado.

### **Mi abuela**

Celestina Elena, porque en sus oraciones siempre tiene el corazón dispuesto para bendecir mi vida.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por conceder conforme al deseo de mi corazón y hacerme comprender en el camino del conocimiento.
<b>Mi familia</b>	Por su compañía en todo momento, apoyar de muchas formas en cada meta impuesta, especialmente con su cariño, motivación y paciencia.
<b>Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos</b>	Por abrir sus puertas, brindar valiosos conocimientos, a través de sus docentes y las experiencias constructivas.
<b>Mis amigos</b>	Mariela Rodríguez y Erick Menjívar, por su amistad, el esmero en cada uno por aprender del otro, además, del apoyo constante y mutuo.
<b>Dr. Ing. Félix Aguilar</b>	Por su paciencia, no escatimar en tiempo, y sobre todo, compartir sus conocimientos para el desarrollo de esta investigación.
<b>Ing. Zenon</b>	Por su amistad, la disposición en todo momento para brindar asesoría y el entusiasmo en colaborar.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	XIII
JUSTIFICACIÓN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XIX
ANTECEDENTES.....	XXI
ALCANCES Y LIMITACIONES .....	XXV
1. MARCO TEÓRICO .....	27
1.1. Plantas de tratamiento de agua potable.....	27
1.2. Lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable .....	27
1.2.1. Generalidades de los lodos .....	27
1.2.2. Tratamiento de lodos .....	29
1.2.2.1. Homogenización.....	29
1.2.2.2. Espesamiento.....	30
1.2.2.3. Deshidratación.....	30
1.2.2.4. Secado.....	32
1.2.3. Disposición final.....	33
1.3. Normativa para lodos generados en PTAPs .....	33
2. METODOLOGÍA .....	37

2.1.	Características y condiciones de la planta estudio .....	37
2.1.1.	Transferencia de sólidos .....	37
2.1.1.1.	Cribado .....	37
2.1.1.2.	Sedimentación.....	37
2.1.1.3.	Filtración .....	38
2.1.2.	Transferencia de iones .....	38
2.1.2.1.	Coagulación química.....	38
2.1.3.	Transferencia de gases .....	39
2.1.3.1.	Desinfección .....	39
2.2.	Selección de parámetros .....	40
2.3.	Muestreo .....	41
2.3.1.	Toma de muestra.....	41
2.3.2.	Número de muestras .....	43
2.4.	Análisis de laboratorio .....	46
2.5.	Análisis estadístico de los resultados.....	47
2.6.	Revisión y comparación de parámetros normativos en lodos..	47
2.7.	Modelo experimental .....	48
2.7.1.	Fabricación .....	48
2.7.2.	Homogenización y espesamiento .....	49
2.7.3.	Deshidratación de los lodos .....	49
3.	RESULTADOS.....	51
3.1.	Resultados de laboratorio.....	51
3.2.	Prueba experimental.....	52
4.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	55
4.1.	Concentraciones medias de parámetros establecidos.....	55
4.2.	Tiempo de deshidratación .....	58
4.3.	Volumen de lodos .....	60

4.4.	Opciones de aprovechamiento para lodos analizados.....	60
4.4.1.	Aplicación al suelo .....	61
4.4.2.	Rellenos sanitarios .....	62
4.4.3.	Confinamiento o aislamiento .....	62
4.5.	Comparación con otras normativas .....	62
4.5.1.	Norma colombiana.....	62
4.5.2.	Normativa mexicana .....	63
4.5.3.	Normativa peruana .....	65
	CONCLUSIONES .....	67
	RECOMENDACIONES.....	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	APÉNDICES .....	73
	ANEXOS .....	85



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Línea de tratamiento y procesos en planta estudio.....	40
2.	Vista perfil: esquema representativo de la deposición de lodos al fondo de la unidad de sedimentación.....	42
3.	Esquema representativo de la distribución de puntos de muestreo dentro de la unidad de sedimentación.....	42
4.	Comparación aluminio presente en planta estudio y CONAGUA – México.....	55
5.	Comparación de hierro presente en planta estudio y CONAGUA – México.....	56
6.	Comportamiento deshidratación, muestra 7.....	59
7.	Comportamiento deshidratación, muestra 8.....	59

### TABLAS

I.	Comparación especificaciones para disposición lodos de PTAPs en normativa colombiana, mexicana y peruana.....	36
II.	Primera estimación de muestra.....	44
III.	Segunda estimación de muestra.....	44
IV.	Tercera estimación de muestra.....	45
V.	Cuarta estimación de muestra.....	45
VI.	Quinta estimación de muestra.....	45
VII.	Metodología para el análisis en laboratorio de parámetros.....	46
VIII.	Resumen resultados de los parámetros analizados.....	51

IX.	Monitoreo semanal deshidratación, muestra 7 .....	52
X.	Monitoreo semanal deshidratación, muestra 8 .....	53
XI.	Resultados parámetros analizados para lodos deshidratados .....	54
XII.	Opciones de aprovechamiento según Acuerdo Gubernativo 236- 2006.....	61
XIII.	Comparación normativa mexicana, disposición en terrenos.....	63
XIV.	Evaluación aprovechamiento de lodos, según normativa mexicana ....	64

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
°C	Grados Celsius
cm	Centímetro
ha	Hectárea
kg	Kilógramo
L	Litro
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
mg	Miligramo
<b>NMP</b>	Número más probable
m	Metro
ppm	Partes por millón





## GLOSARIO

<b>Afluente</b>	Agua captada de un curso de agua natural, que ingresa y es sometida a los procesos de potabilización.
<b>Alcantarillado</b>	Conjunto de tuberías y obras accesorias utilizadas para recolectar y conducir aguas residuales de tipo ordinario o especial.
<b>Caudal</b>	Volumen de agua por unidad de tiempo.
<b>CEPIS</b>	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
<b>Coliformes fecales</b>	Parámetro que indica la presencia de contaminación fecal en el agua y de bacterias patógenas, provenientes del tracto digestivo de los seres humanos y animales de sangre caliente (bacilos).
<b>Coliformes totales</b>	Parámetro que indica la presencia de contaminación de bacterias de tipo bacilos (forma en bastoncillo), Gram negativos y otros compuestos con propiedades de inhibición.
<b>Cuerpo receptor</b>	Embalse natural, lago, laguna, laguneta, río, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero,

manglar, pantano, aguas costeras y subterráneas donde se descargan aguas residuales.

**Efluente** caudal de aguas residuales que son descargadas por un ente generador.

**Límite máximo permisible** Valor asignado a un parámetro, que no debe ser excedido por los lodos, para que puedan ser dispuestos o aprovechados.

**MEM** Ministerio de Energía y Minas.

**MSPAS** Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social.

**pH** Escala que representa la acidez relativa o alcalinidad.

**Parámetro** Variable que identifica una característica de las aguas sin tratamiento, residuales y lodos.

**PTAP** Planta de tratamiento de agua potable.

**PTAR** Planta de tratamiento de aguas residuales.

## RESUMEN

El estudio especial que a continuación se presenta, es el resultado del proceso de investigación en lodos generados en los sedimentadores de una planta de tratamiento de agua para consumo humano, desarrollado en Guatemala. En su contenido, se desarrolla una descripción de la información general, la calidad y el uso potencial de los lodos generados como subproducto en la unidad de sedimentación que es parte del tren de tratamiento de la planta estudio, como propuesta de solución ante la problemática que se plantea en esta investigación.

El desarrollo de esta investigación se establece, a partir de los resultados del análisis en laboratorio de los parámetros de aluminio, arsénico, cadmio, cromo, mercurio, plomo y hierro, correspondientes a un número determinado de muestras, y en la elaboración de un modelo físico experimental para el monitoreo de su deshidratación mediante el proceso de evaporación.

Este documento se constituye de cuatro capítulos: siendo los primeros dos, una fase de referencias bibliográficas y la caracterización de los lodos provenientes de PTAPs; los capítulos 3 y 4, corresponden a la presentación de los resultados, su respectivo análisis que permitió determinar la concentración media de 124,000 mg/kg de aluminio y 34,200 mg/kg de hierro, las concentraciones máximas presentes con 3 mg/kg de cadmio, 62 mg/kg de cromo, 285 mg/kg de plomo, 7.9 mg/kg de arsénico y en el caso del mercurio que no fue detectado; además, del planteamiento en cuanto a su aplicación al suelo como acondicionadores, abonos, entre otras formas como las posibles opciones de aprovechamiento por cumplir con la calidad establecida en el

Acuerdo Gubernativo 236-2006 como marco normativo de referencia y en base a la consulta de los requerimientos de la República de Colombia, México y Perú.

De igual manera, el incluir el desarrollo del modelo físico experimental que consistió en un monitoreo de la deshidratación de dos muestras de lodos compuestas, dando como resultado un tiempo de 60 días para la temporada de lluvias y 40 días para época de verano, y presentó una reducción de su volumen del 13 % y 28 %, respectivamente.

Se recomendó realizar pruebas con sistemas que contemplen un drenaje para optimizar el tiempo de deshidratación; estudios específicos de helmintos y salmonella, para conocer con mayor certeza la calidad microbiológica de los lodos; y evaluar el pH de los lodos, por ser un indicador que permite identificar la acidificación a causa de los metales presentes en el material.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las plantas de tratamiento de agua potable administran específicamente la producción de agua apta para consumo humano, proceso que se realiza mediante una serie de técnicas de tratamiento, donde la mayoría de las veces, no se tiene conciencia de los diferentes subproductos que se generan en las unidades y el manejo adecuado que estos requieran.

Los lodos son de esos residuos que se producen durante el tren de tratamiento, derivados principalmente de las sustancias que están presentes en el agua a tratar, en combinación de aquellos agregados químicos procedentes de los procesos de potabilización. El vertido directo de este producto puede implicar una influencia negativa en cualquier receptor; en alcantarillados, perjudicar la circulación en la red de tuberías por obstrucciones si estas no tienen la capacidad de evacuarlos, y de llegar a las estaciones de tratamiento de aguas residuales, comprometer su funcionamiento por no estar contemplada la carga y concentración de los lodos en el sistema; en el caso de cauces naturales, influir en el comportamiento hidráulico por la posible formación de bancos de lodos, que consisten en su depósito y acumulación en los tramos, donde la corriente no tiene la capacidad de transportarlos, posibles presiones ambientales si tienen incidencia en la degradación de la calidad del agua por aumento de turbiedad, color, y otros parámetros que no son tan notorios a simple vista, pero que pueden condicionar el medio; además, del posible desperdicio de un material que podría ser aprovechado de diferentes formas.

Esta situación surge a raíz de la falta de un manejo apropiado de los lodos, que debiera ser adoptado como parte de una gestión integral en la

potabilización del agua; asimismo, por el desconocimiento en el tema y la falta de un marco normativo que regule estas prácticas para orientar acerca de su disposición. Así, su posible aprovechamiento representa darles un valor agregado y una solución para evitar que estos provoquen los daños e impactos ambientales descritos anteriormente.

### **Pregunta principal**

¿Cuál es el aprovechamiento que se le puede dar a los lodos generados en PTAPs que emplean sulfato de aluminio como coagulante?

## JUSTIFICACIÓN

En los procesos de potabilización se generan lodos por la separación, mediante métodos físicos y químicos, de los sedimentos o partículas suspendidas presentes y que son transportadas en el agua. El volumen de este subproducto, varía según las características de la fuente a tratar, no obstante, la cantidad siempre es representativa.

Los lodos de las unidades de sedimentación y filtración de plantas potabilizadoras, actualmente son de poco interés en cuanto a su manejo y disposición final; en el caso de los filtros, estos son una pequeña fracción del volumen total de los generados durante la línea de tratamiento, se aprecian durante el lavado de la unidad y por facilidad, pueden ser dirigidos e introducidos a la cabeza del sistema de potabilización, mientras que el resto que corresponde a los generados durante la sedimentación, no reciben la atención que merecen y por la cantidad, generalmente son dispuestos directamente a los alcantarillados o afluentes naturales. En Guatemala se cree que muy pocas plantas de tratamiento de agua potable, o quizás ninguna, contemplan un manejo adecuado de este material, e inclusive se desconoce cuál es su disposición final.

Resulta más preocupante aún, cuando ello implica que sean descargados a receptores naturales sin ningún tratamiento; acción que puede causar a futuro serios problemas relacionados con la degradación de las corrientes naturales de agua, afectando el medio y demás ecosistemas que puedan depender del mismo.



Para sustentar el problema planteado, se refiere a la planta estudio que está limitada a su principal y única función, que es, potabilizar el agua; durante su diseño no se tenía el alcance de visión con respecto a la conciencia ambiental que hoy en día está presente, y para estos, se proveyó de un sistema de tuberías de drenaje que se conecta desde las purgas de los sedimentadores, y tiene la finalidad de canalizar el residuo a la corriente natural más cercana. En el caso de los lodos producidos en los filtros, estos son recirculados.

# OBJETIVOS

## General

Identificar las opciones de aprovechamiento de los lodos generados en sedimentadores de plantas de tratamiento de agua potable, donde se utiliza sulfato de aluminio como agregado en el proceso de coagulación.

## Específicos

1. Definir las concentraciones medias de aluminio, arsénico, cadmio, cromo, hierro, mercurio y plomo en los lodos generados en sedimentadores de la planta estudio.
2. Determinar el tiempo de deshidratación de los lodos, mediante el desarrollo de un modelo físico experimental.
3. Comparar la calidad de los lodos analizados con los requerimientos exigidos por las normativas de otros países, para el aprovechamiento de lodos.



## **HIPÓTESIS**

Los lodos generados en sedimentadores de PTAPs donde se utiliza sulfato de aluminio en el proceso de coagulación, pueden ser aprovechados como acondicionadores en suelos, abonos, entre otras formas de aplicación, dando lugar a un manejo más apropiado que permitiría mitigar los impactos que genera su no aprovechamiento.



## **ANTECEDENTES**

Los procesos de potabilización de agua en el país, tuvieron sus inicios desde el año 1776, con la finalidad de cubrir una de las necesidades más esenciales de la población. En la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS-, se han realizado diversos estudios acerca del análisis de la calidad y consumo del agua potable, procesos de potabilización, propuestas de innovación en las unidades de tratamiento, estudios de sistemas para la desinfección del agua, la remoción de parámetros específicos, evaluación de componentes naturales para los procesos de tratamiento, entre otros; temas que han sido gran aporte para las diferentes líneas de investigación; sin embargo, no se tienen estudios específicos sobre el manejo adecuado de lodos producidos en plantas de tratamiento de agua potable, lo que debería considerarse como parte de una gestión integral.

Respecto al tema de interés, puede referirse el “Manual de Normas Sanitarias que establecen los procesos y métodos de purificación de agua para consumo humano” (Acuerdo Ministerial 1148-09, MSPAS); del Capítulo II, PROCESOS Y MÉTODOS DE PURIFICACIÓN, en su Artículo 23, MANEJO DE SEDIMENTOS, acerca de la recolección, manejo, transporte, depósito o reutilización de los lodos como subproducto del proceso de purificación, considerando los aspectos relacionados a la seguridad ambiental y de las personas.

Asimismo, el “REGLAMENTO DE LAS DESCARGAS Y REÚSO DE AGUAS RESIDUALES Y DE LA DISPOSICIÓN DE LODOS” (Acuerdo Gubernativo 236-2006); del Capítulo VIII, PARÁMETROS PARA LODOS, donde

se encuentra una sección destinada al análisis y manejo específicamente de los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales. A pesar de ser residuos que difieren en sus características, los límites máximos permisibles que presenta el reglamento, son empleados como referencia para esta investigación.

En países de Latinoamérica y sobre todo a nivel mundial se han realizado estudios acerca del tema, por el impacto que se puede llegar a tener, sí no se toma en cuenta como parte de una gestión integral, por ejemplo y para apoyo de esta investigación:

En Colombia un estudio con el nombre: “Manejo de lodos producidos en la planta de tratamiento de agua potable, Planta 2, del Municipio de Cartago, Valle” desarrollado en noviembre de 2003 por el ingeniero Guillermo Andrés Ramírez Fernández; donde se hizo una caracterización físico-química y bacteriológica de la muestra de lodos proveniente del fondo del sedimentador y de la tubería de evacuación de lodos. Los resultados son una propuesta preliminar de manejo, tratamiento y disposición final de los lodos, que consiste en nueve lechos de secado que ocupan un área de 2160 m<sup>2</sup>, los cuales fueron dimensionados según las características físico-químicas de los lodos y su volumen de producción. La disposición final para los lodos ya tratados, es el relleno sanitario cumpliendo con las leyes ambientales del lugar, adicionalmente se dimensionó para la planta, un sistema de evacuación por gravedad y uno por bombeo de los lodos provenientes del sedimentador, donde el sistema por gravedad presentó menores costos en equipos, manejo y mantenimiento.

Otra investigación muy relacionada, que tiene por nombre “Estudio para el tratamiento, manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable” realizado en Quito, Ecuador, en julio del año 2012

por el ingeniero Marco Vinicio Martínez Córdova; donde se realiza una caracterización físico-química y bacteriológica del agua, como también del lodo producido en una planta convencional de tratamiento de agua potable, y a partir de los resultados se realizaron cuatro modelos experimentales de lechos filtrantes con diferentes espesores, donde la deshidratación se realiza únicamente por evaporación; dos de ellos se ubicaron dentro de un invernadero y los otros dos bajo una cubierta. Los resultados de este estudio evidenciaron que el espesor óptimo de lodo a deshidratar es de 15 cm, y que durante la época de verano el tiempo de secado es de 30 días en invernadero, y para invierno 37 días, obteniendo un material seco con el 12 % de humedad.

Entre otros estudios, que se relacionan más al tema de disposición final, están: “Reutilización de lodos de planta de potabilización en el tratamiento de aguas residuales” por los ingenieros Julian Alberto Gallo Ramírez y el ingeniero Juan Carlos Uribe Hurtado, Colombia, en el año 2003, donde los resultados indicaron que la combinación de cloruro férrico y lodo decantado presentan en un 10 %, mejores remociones de turbiedad en aguas residuales que la combinación de sulfato de aluminio y lodo decantado, y un 5 % en la remoción de color, además de determinar que las dosis superiores a 8000 ppm no producen remociones significativas de turbidez y color; asimismo, “Utilización de los lodos generados en el proceso de potabilización del agua de la planta de tratamiento CASIGANA, como aditivo para suelos de cultivo” realizado por la ingeniera Fátima Elizabeth Ruiz Mora, en la ciudad de Ambato, Ecuador, en el año 2011, donde se realizó la aplicación de lodos residuales más un fertilizante químico en plantas de maíz y brócoli, dando como resultado que para el maíz el mejor tratamiento fue 6 kg/m<sup>2</sup> de lodos residuales más el 50 % de fertilizante químico, y para el brócoli fue 6 kg/m<sup>2</sup> de lodos residuales más el 50 % de fertilizante químico, basados en la evaluación de altura, calibre, número de hojas, peso fresco y seco.



Existen también publicaciones de artículos, tales como: “Lodos producidos en el tratamiento del agua potable” desarrollado por el ingeniero Francisco Ramírez Quiros, donde menciona procesos de tratamiento de los lodos, caracterización fisicoquímica de los lodos y la necesidad de su tratamiento por el impacto que se tiene, al ser residuos inorgánicos que forman depósitos en los cauces receptores; también, el artículo “Aprovechamiento de lodos generados en la planta potabilizadora Los Berros, sistema Cutzamala, primera etapa” por Rosa Ramírez Zamora, Nathalie Chantal Cabirol, Sandra Millán Hernández, Fabricio Espejel Ayala, Arturo Rodríguez Cruz y Marcelo Rojas, donde según los resultados de caracterización, seleccionan la aplicación en suelos, la elaboración de cemento-clinker, la elaboración de productos cerámicos y de productos cementantes como las cuatro mejores formas de aprovechamiento.

## **ALCANCES Y LIMITACIONES**

Esta investigación pretende fortalecer los conocimientos en el tema del manejo de lodos producidos durante la potabilización, como una línea de investigación que ha sido de poco interés, a pesar de su importancia y que compete a la ingeniería sanitaria; asimismo, incentivar a la gestión integral del manejo de lodos como parte del sistema de tratamiento de agua potable; proveer de información que pueda ser utilizada como base para futuras investigaciones relacionadas al tema; y principalmente plantear las opciones disponibles para su manejo y disposición.

El alcance de la investigación consiste específicamente para lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable, no así, de aguas residuales u otros procesos donde se generen este tipo de productos, ya que sus características difieren significativamente, y por lo tanto, no puede considerarse el mismo criterio.

No obstante, en el desarrollo de esta investigación es posible tener ciertas limitaciones, al no contar con material bibliográfico en el medio que pueda servir como fundamento para su realización.



# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. Plantas de tratamiento de agua potable**

Es el conjunto de unidades de tratamiento necesarias, para mejorar las características físico-químicas y biológicas de una fuente determinada, donde el objetivo principal es obtener agua sanitariamente segura para el consumo y aprovechamiento dentro de las actividades de una población.

Las plantas de tratamiento de agua potable, administran la producción de agua apta para consumo humano, proceso que se realiza mediante una serie de técnicas de tratamiento, en donde es común la generación de diferentes subproductos sólidos, líquidos y gaseosos, en este caso, los lodos.

## **1.2. Lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable**

### **1.2.1. Generalidades de los lodos**

Las características que definen a los lodos, dependen esencialmente de la calidad del agua que se está tratando y del tren de tratamiento aplicado; sin embargo, entre las generalidades, se considera como un fluido no newtoniano, compuesto principalmente por agua y por un porcentaje muy pequeño de partículas coloidales, sustancias húmicas, microorganismos varios y compuestos químicos.

Los lodos provenientes de los sedimentadores, corresponden el 60 y 70 % de los sólidos totales que se generan en una PTAP del tipo convencional, y el

resto, son los que resultan de la filtración u otros tratamientos relacionados a la remoción de hierro y manganeso, ablandamiento, adsorción, o por intercambio iónico; los lodos de los sedimentadores son relativamente estables, no se descomponen rápido y no causan problemas de septicidad (Arboleda, 2000)

Los lodos generados como subproducto del tren de tratamiento del agua, generalmente, se forman en las unidades de floculación durante el proceso coagulación-floculación; es importante saber que, existen materias presentes en las aguas naturales, que resultan del contacto con los suelos, viento u otros factores que dependen del ambiente, el clima y las actividades desarrolladas dentro del área de influencia (cuenca), estas son transportadas, debido a las fuerzas de arrastre del afluente en movimiento, o bien, aquellas aguas degradadas por circunstancias diversas, entre ellas, las descargas residuales.

La coagulación, es el proceso en el que se adicionan sustancias químicas al agua sin tratamiento, dando origen a reacciones físicas y químicas para desestabilizar la suspensión de las partículas que se encuentran dispersas en ella, e inmediatamente, interviene el proceso de floculación que consiste en aglomerarlas durante su transporte en el mismo líquido, dando como resultado la ganancia de tamaño y peso (CEPIS, 2004).

Una vez que las partículas obtienen el tamaño necesario, estas pueden ser removidas con mayor facilidad; como resultado, el agua que los rodea se volverá más clara. Esto se realiza comúnmente mediante la sedimentación, que es un proceso físico donde ocurre la caída y depósito por efecto gravitacional, de las partículas que han ganado peso pero que aún están suspendidas en el fluido.

Para este proceso, si se trata de unidades de tipo convencional, se precisa de grandes estructuras, tipo tanque, donde se concentran los lodos en su fondo, y ocurre cuando las partículas más pesadas se depositan primero, mientras que las más ligeras quedan en la parte superior; como resultado se forma una estratificación por el acondicionamiento de los lodos, que posteriormente se recogen a través de las purgas de esa unidad y en el lavado de los filtros.

Independiente del tipo de lodo que resulte, existen diferentes tipos de tratamiento a los que pueden ser sometidos, destinados a mejorar sus características y lograr un mejor manejo.

## **1.2.2. Tratamiento de lodos**

### **1.2.2.1. Homogenización**

También considerado como mezcla, es un proceso que tiene como finalidad lograr un volumen de lodos más uniforme, dado que, al depositarse en los decantadores se van ordenando capas de concentraciones variables (estratificación). La mezcla se realiza previa a cualquier otro tratamiento, y es sumamente favorable, así los siguientes procesos no se vean afectados en su rendimiento, debido a las variaciones que estos puedan presentar, durante las diferentes épocas del año.

Idealmente, en este proceso se reúnen y almacenan los lodos provenientes del lavado de filtros, las purgas de sedimentadores y otras fuentes de origen dentro de la PTAP, en unidades con dimensiones lo suficientemente grandes para cubrir la variabilidad del volumen de lodos, que está condicionado por la programación del mantenimiento de las unidades, para después tener un

flujo continuo con el que puedan trabajar los tratamientos siguientes (Arboleda, 2000).

#### **1.2.2.2. Espesamiento**

Mediante la decantación, este tratamiento busca remover el exceso de agua remanente, logrando una mejor concentración de los sólidos; en consecuencia se da una disminución en el volumen de los lodos que ayudará a un mejor manejo en los tratamientos posteriores.

Las unidades para este proceso, pueden ser espesadores por gravedad, que son tanques con estructuras compuestas con puentes barrelados (paletas giratorias), funcionan con un movimiento continuo y lento, movilizandolos lodos concentrados en el fondo, mientras que el agua que se va clarificando en la parte superior puede ser recuperada y enviada nuevamente al tren de tratamiento para su reutilización (Arboleda 2000).

Otra de las tecnologías para este tratamiento, es el espesamiento por flotación, que es un sistema más complejo y funciona bajo el principio de separar los sólidos con baja densidad, y se logra mezclando los lodos con agua presurizada y saturada de aire; a consecuencia, el lodo flota cercano a la superficie, permitiendo su concentración y es donde se aprovecha para retirarlo por medios mecánicos, mientras que el agua clarificada puede obtenerse del fondo de la unidad (Ramalho, 1996).

#### **1.2.2.3. Deshidratación**

La deshidratación de los lodos podría considerarse como el tratamiento más importante, pues tiene la intención de lograr una concentración de los

lodos aún mayor y reducir representativamente el volumen de los mismos, dando lugar al manejo cómodo de un material sólido, seco y más apropiado para su reutilización o disposición final.

Este proceso emplea medios físicos para remover tanta agua como sea posible, y con ello, lograr que el lodo se comporte más como un sólido húmedo que como un líquido. Intervienen comúnmente fuerzas de gravedad y evaporación, cuando se emplean métodos naturales, mientras que en sistemas más complejos y automatizados, se emplean fuerzas de vacío, centrifugación, presión, acción capilar, entre otros.

Los lechos de secado son una de las alternativas más utilizadas dada su baja sensibilidad a las variaciones de calidad y cantidad del lodo, cómodo coste, facilidad en operar de manera natural y simple, sin embargo, la mayoría de las veces se encuentra inconveniente porque necesitan de grandes áreas a disponer y de largos períodos de tiempo para el tratamiento.

El tiempo de deshidratación en este método, está condicionado por el clima, de tal manera que para zonas de fuerte insolación y precipitaciones muy escasas, el período puede ser de unos días, mientras que, para condiciones menos favorables, puede extenderse a semanas.

El sistema de lechos de secado consiste en tanques o depósitos de poca altura y funcionan removiendo el agua por percolación, con el paso descendente del fluido a través de diferentes capas de medio filtrante (arenas y gravas), al fondo, el agua sin sólidos es recolectada por tuberías de drenaje; existe un porcentaje del agua, que también es removida por evaporación. Su aplicación logra concentraciones del 20 al 25 % de sólidos (Ramalho, 1996).



Otro método muy similar, son las lagunas de espesamiento y secado, que consisten en grandes estanques de sedimentación donde no hay salida de agua, y funcionan idealmente para zonas con altas tasas de evaporación. Para este sistema es recomendable el establecimiento de dos unidades, para asegurar la disponibilidad en caso de limpieza o mantenimiento (CONAGUA, 2007).

Existen otras alternativas que pueden ser implementadas, cuando no hay disponibilidad en el terreno, o bien, sí las condiciones del sitio no son favorables para los métodos naturales ya mencionados. Se trata de tecnología que funciona a partir de métodos mecánicos, donde se logran concentraciones mayores, entre los más comunes: centrifugación, filtro prensa, filtros banda, filtro de vacío (Arboleda, 2000).

Estas dependen de costos muy elevados para su funcionamiento, una operación más compleja, necesitan manejar cantidades menores del residuo y son sensibles a la calidad del lodo.

#### **1.2.2.4. Secado**

El procedimiento consiste en una deshidratación completa del residuo, logrando eliminar la humedad presente hasta su totalidad, está relacionado con el calor, por lo que implican gastos elevados durante su funcionamiento, no obstante, se alcanza el menor volumen y se obtiene un material fino (Ramírez, 2008).

Para el secado, los métodos se basan en el contacto, convención o radiación; siendo necesaria la intervención de aire caliente o el suministro de

calor por elementos de infrarrojo. Este tipo de procesos generan un producto de buena calidad microbiológica y sin olores.

### **1.2.3. Disposición final**

El producto que resulta del proceso de deshidratación, generalmente no es considerado como un residuo tóxico o peligroso, por ello, es destinado a almacenarse como material inerte en vertederos controlados, tales como: rellenos en terrenos de cantera ya explotadas, o ser dispuestos en áreas que no impliquen malestar a la población (Arboleda, 2000).

En algunos lugares, ha sido de gran utilidad como abono en pastizales y áreas de conservación natural; servir de compostaje; fabricación de productos cerámicos, baldosas, azulejos, mientras el contenido de materia orgánica sea bajo; no obstante, para estas medidas deben conocerse las concentraciones de hierro y aluminio, e inclusive las características microbiológicas, y a partir de ello, descartar esta alternativa sí perjudica el espacio de aplicación.

### **1.3. Normativa para lodos generados en PTAPs**

En el caso de Guatemala, únicamente existe el Acuerdo Ministerial 1148-09 del Ministerio de Salud y Asistencia Pública (MSPAS), como documento específico para los lodos de PTAPs. En el capítulo II “Procesos y Métodos de Purificación”, Artículo 23. Manejo de sedimentos, indica que aquellos generados en el proceso de purificación deben ser manejados, dispuestos o reutilizados considerando la seguridad ambiental y de las personas.

Así, no existe un marco normativo que aborde de manera más específica este material, amplíe y regule las prácticas sobre su disposición y las opciones

para su aprovechamiento o reutilización; únicamente se cuenta para aquellos lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales – PTARs, y que corresponde al Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Países como Colombia, México y Perú, sí cuentan con normativas que regulan el manejo, disposición o aprovechamiento de los lodos generados en PTAPs, donde se presentan lineamientos para orientar a los entes generadores de estos en el tema, y establecen las especificaciones para mitigar los impactos que puedan implicar su mal manejo.

En la República de Colombia, la Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico del Ministerio de Desarrollo Económico, a través del Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2000, en el capítulo C13 cuentan con la regulación del manejo de lodos generados en PTAPs, donde contemplan la realización de estudios previos para la caracterización de los lodos; el manejo, tratamiento, transporte, disposición; parámetros de diseño para cada proceso; y los controles mínimos que deben cumplirse en cada actividad. No se fijan parámetros específicos que restrinjan o delimiten la calidad de los lodos.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en México, mediante el “Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas potabilizadoras de tecnología simplificada”, en el capítulo 8, que trata del manejo y disposición de subproductos de potabilización, aborda el tema de lodos generados en PTAPs con respecto a sus características, el manejo, los tratamientos, la disposición final en rellenos sanitarios, terrenos, sistemas de aguas residuales, cuerpos de agua y su recuperación. Para definir el aprovechamiento de los lodos, la calidad de los mismos debe evaluarse según las coliformes fecales, salmonella y helmintos como indicadores biológicos; y

específicamente si son dispuestos en terrenos agrícolas, deben cumplir con las concentraciones máximas de arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, molibdeno, níquel, selenio, plata y zinc.

Perú, por otro lado, con Resolución Ministerial No. 128-2017-VIVIENDA del Ministerio de vivienda, Construcción y Saneamiento, de fecha 5 de abril de 2017, aprobó las condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final, destinada para aquellos que son generados en PTAPs y PTARs; en el documento se establecen los lineamientos para su manejo, planes para su minimización, la recolección, almacenamiento, tratamiento, transporte, reaprovechamiento y disposición final. En lo que se refiere a lodos de PTAPs, la normativa peruana los considera como residuos no peligrosos, y por lo tanto, las condiciones mínimas para que sean reaprovechados es que tengan un contenido de sólidos de igual o mayor de 25 %.

A continuación, se realiza una comparación de las especificaciones que demandan las normativas de Colombia, México y Perú.

Tabla I. **Comparación especificaciones para disposición lodos de PTAPs en normativa colombiana, mexicana y peruana**

COLOMBIA	MÉXICO	PERÚ
<p>Permiten la descarga en corrientes de agua, siempre que adquieran el permiso de las autoridades competentes con su respectivo estudio de impacto ambiental donde se demuestre que no habrá implicaciones.</p> <p>Asimismo, la descarga con o sin tratamiento en alcantarillados. Si el volumen de lodos es grande no deben descargarse en alcantarillados.</p>	<p>Para la disposición en relleno sanitario, debe demostrarse que no se trata de material peligroso, ligada a la producción de lixiviados.</p> <p>Disposición en terrenos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lodos Clase A “Uso urbano con contacto público directo”: menor de 1000 NMP/g de coliformes fecales, menor de 3 NMP/g de Salmonella, y menor de 1ω huevos de helmintos/g.</li> <li>▪ Lodos Clase B “Uso urbano sin contacto público directo”: menor de 1000 NMP/g de coliformes fecales, menor de 3 NMP/g de Salmonella, y menor de 10ω huevos de helmintos/g.</li> <li>▪ Lodos Clase C “Usos forestales, mejoramiento de suelos, usos agrícolas”: menor de 2000000 NMP/g de coliformes fecales, menor de 300 NMP/g de Salmonella, y menor de 35ω huevos de helmintos/g.</li> </ul> <p>La disposición en PTARs, cumpliendo con la normativa para descargas de aguas residuales.</p> <p>Descarga en alcantarillados, cumpliendo con la norma oficial mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996.</p> <p>La descarga en cuerpos de agua, requiere permiso de descarga de la Comisión Nacional del Agua, cumpliendo con el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales.</p>	<p>Reaprovechamiento y comercialización siempre que estén deshidratados y presenten un contenido de sólidos igual o sea mayor de 25 %.</p>

Fuente: elaboración propia.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Características y condiciones de la planta estudio**

La planta estudio se caracteriza por ser un sistema convencional de filtración rápida, donde se emplean los siguientes procesos unitarios de transferencia:

#### **2.1.1. Transferencia de sólidos**

##### **2.1.1.1. Cribado**

Se evita el ingreso a la PTAP de sólidos con gran tamaño, arrastrados y transportados en el afluente captado, y que pueden ocasionar daños en las instalaciones y tren de tratamiento; esto se logra pasando el agua de ingreso a la planta, por una serie de perfiles metálicos, alineados verticalmente para obstaculizar su paso y posteriormente puedan ser removidos manualmente.

##### **2.1.1.2. Sedimentación**

Retención relativa del agua a tratar en grandes tanques longitudinales durante un tiempo determinado, con velocidades muy bajas; permitiendo que las partículas en suspensión más densas sean concentradas al fondo de la unidad por fuerza gravitacional y representa la primera estación donde se da la clarificación del agua.

La unidad cuenta con tolvas en su fondo, destinadas a la extracción de los lodos acumulados; son recibidos por un sistema de tuberías que los canaliza y dispone hacia el receptor natural más cercano, específicamente en una corriente fluvial.

### **2.1.1.3. Filtración**

La planta estudio cuenta con una batería de filtros de tasa declinante y retrolavado; opera con un lecho filtrante a base de arena por donde se conduce el fluido, en su trayectoria se producen mecanismos de remoción y procesos biológicos; se reconoce como la etapa final de clarificación. De estas unidades se genera, comparado a la sedimentación, un porcentaje pequeño de lodos durante su limpieza, razón por la cual, son reenviados a la línea de tratamiento.

## **2.1.2. Transferencia de iones**

### **2.1.2.1. Coagulación química**

Se emplea sulfato de aluminio, y es aplicado al flujo durante su paso por un dispositivo hidráulico que provoca turbulencia, a partir de un salto hidráulico generado, principalmente, por el cambio de sección en el canal; esto tiene la finalidad de lograr una mezcla de forma instantánea.

La coagulación es un proceso breve y de momento, paralelamente a él, inicia la fase de floculación a través de las unidades conformadas por una serie de pantallas que permiten durante su larga trayectoria, la formación de las partículas sedimentables.

### **2.1.3. Transferencia de gases**

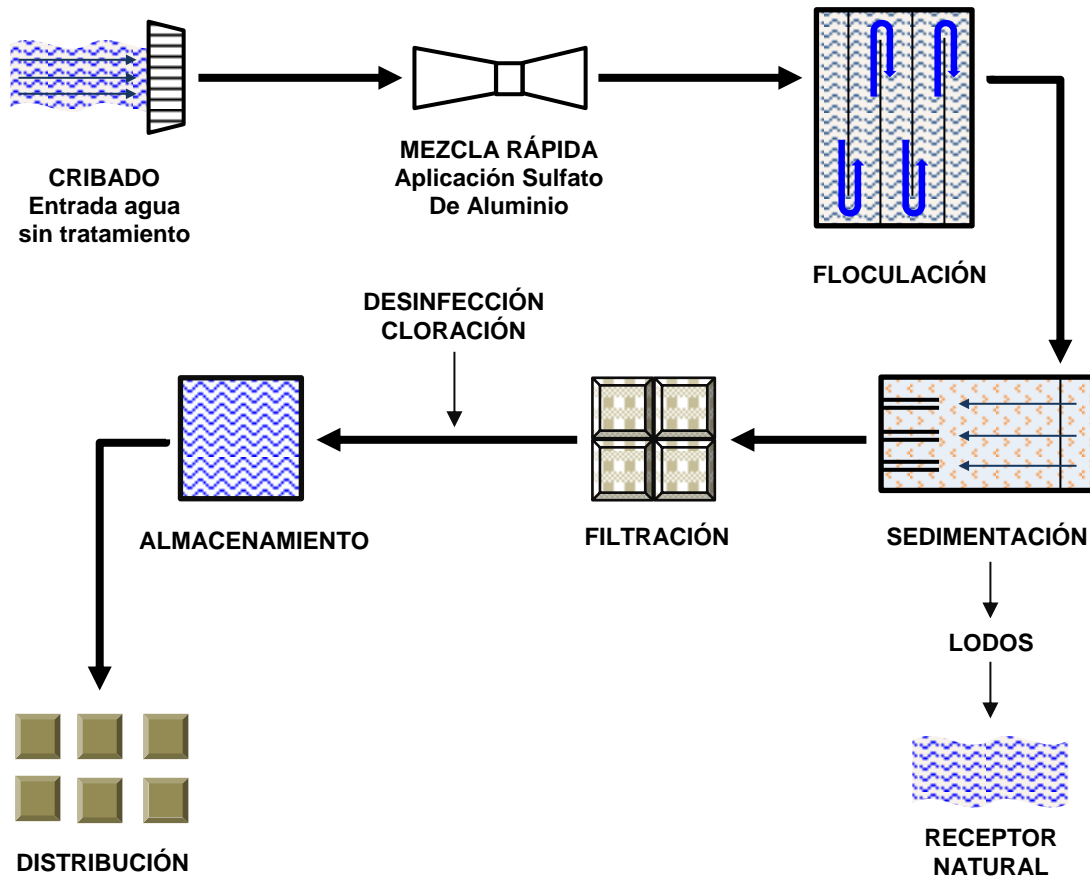
#### **2.1.3.1. Desinfección**

Es el proceso unitario conclusivo, donde le es aplicado al flujo que viene en la línea de tratamiento, sustancias que eliminan organismos no deseados que pueden transmitir enfermedades y perjudicar el bienestar de los consumidores, en este caso, se utiliza gas cloro como agente químico.

El conjunto de los procesos descritos, permiten lograr y completar el proceso de potabilización del agua en la planta estudio. En la imagen 1, se representa esquemáticamente la línea de tratamiento y los procesos más representativos de la planta estudio.



Figura 1. Línea de tratamiento y procesos en planta estudio



Fuente: elaboración propia.

## 2.2. Selección de parámetros

Guatemala no cuenta con una normativa específica para lodos generados en PTAPs, en tal caso, para la selección de los parámetros se tomó como referencia el Acuerdo Gubernativo 236-2006 “Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos”, capítulo VIII: Parámetros para lodos, artículo 142: Parámetros y límites máximos permisibles

para lodos, por ser la normativa que más se acerca al tema, a pesar de que es específico para aguas residuales y no para los procesos de potabilización.

En el apartado se establecen los límites máximos permisibles de 5 metales pesados, que son: arsénico, cadmio, cromo, mercurio y plomo; en base a estos, se establecen las opciones en que puede considerarse su disposición.

Asimismo, se contemplan los valores de las sustancias que conforman el coagulante adicionado en el proceso de tratamiento, en este caso: hierro y aluminio, la calidad microbiológica del lodo sometido a la prueba experimental con respecto a la determinación de bacterias del grupo coliforme total, y el subgrupo fecal.

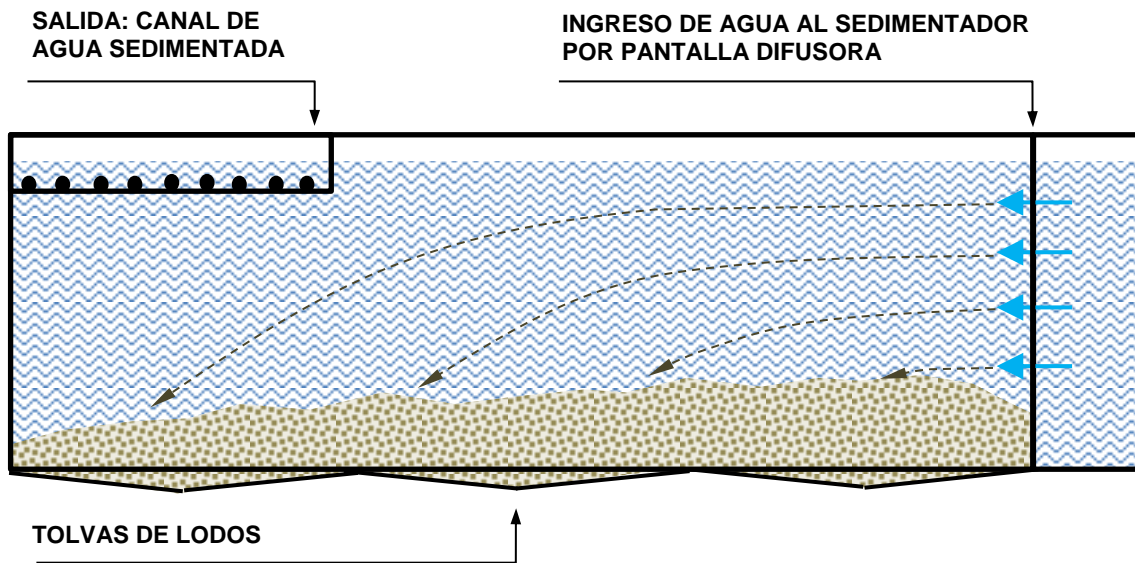
## **2.3. Muestreo**

### **2.3.1. Toma de muestra**

El muestreo se realizará durante la limpieza de los sedimentadores; al fondo de los sedimentadores, cuando el agua que se encuentra por encima de estos, haya sido evacuada.

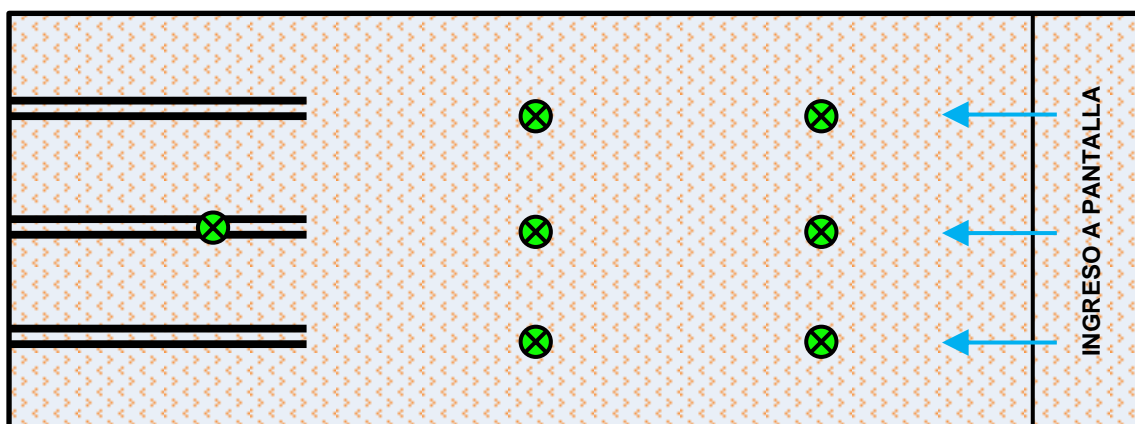
En la planta estudio se verificó que la mayor parte de los lodos ocupan el primer tercio del tanque y estos, van disminuyendo a lo largo de la unidad, teniendo en cuenta esta condición, se trabajó con una muestra compuesta a partir de la recolección en puntos distribuidos estratégicamente (consultar figura 2 y 3).

Figura 2. **Vista perfil: esquema representativo de la deposición de lodos al fondo de la unidad de sedimentación**



Fuente: elaboración propia.

Figura 3. **Esquema representativo de la distribución de puntos de muestreo dentro de la unidad de sedimentación**



Fuente: elaboración propia.

### 2.3.2. Número de muestras

En el desarrollo de cualquier investigación, es importante determinar un número de muestras, de tal manera que en su análisis se obtengan resultados representativos, sin embargo, una de las brechas en este estudio, es la información limitada, pues se carece de referencias o una base de datos que permita determinar este valor, porque a pesar de ser un tema vigente en otros países, en Guatemala aún se está conociendo.

En este caso, se empleará una estimación estadística que utiliza la distribución t-student de dos colas y se define con la siguiente expresión (Walpole – Myers - Myers, 2012):

$$n = \left( \frac{ts}{\bar{X} - \mu} \right)^2$$

Donde,

n = número de muestras

t = valor obtenido en función del nivel de confianza y los grados de libertad

s = desviación estándar

$\bar{X}$  = promedio real

$\mu$  = promedio esperado

Al aplicar esta fórmula, la desviación estándar debe ser un valor conocido a partir de estudios previos acerca de la caracterización de lodos, o bien, contar con muestras preliminares ya analizadas, en razón de ello, se realizó un premuestreo, tomando como referencia los resultados de aluminio por su constancia en los resultados. El premuestreo consistió en establecer la desviación estándar de los resultados para las primeras dos muestras

analizadas y determinar el número de muestras con respecto al valor calculado; posterior, se recolectó una tercera determinando el nuevo valor de la desviación estándar para los tres datos y su respectivo número de muestras; este procedimiento se aplicó a medida que se recolectaban nuevas muestras.

La diferencia entre el promedio real y esperado, representa al error de la muestra, y al ser el promedio real un valor desconocido, a criterio se utilizará que el error corresponde a un 10 % del valor promedio. En cada estimación, se utilizó el valor de “t” para un nivel de confianza del 90 %.

Tabla II. **Primera estimación de muestra**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FECHA</b>	<b>ALUMINIO</b>		
			Promedio	11.02 mg/L
MUESTRA 1	23-sep-14	10.6 mg/L	Desviación estándar	0.60 mg/L
MUESTRA 2	14-oct-14	11.4 mg/L	Grados de libertad	1
			“t” (90 %)	6.31
			Error (10 %)	1.10 mg/L
			No. muestras	12

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Segunda estimación de muestra**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FECHA</b>	<b>ALUMINIO</b>		
			Promedio	11.25 mg/L
MUESTRA 1	23-sep-14	10.6 mg/L	Desviación estándar	0.59 mg/L
MUESTRA 2	14-oct-14	11.4 mg/L	Grados de libertad	2
MUESTRA 3	11-nov-14	11.7 mg/L	“t” (90 %)	2.91
			Error (10 %)	1.13 mg/L
			No. muestras	2

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Tercera estimación de muestra**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FECHA</b>	<b>ALUMINIO</b>		
			Promedio	12.27 mg/L
MUESTRA 1	23-sep-14	10.6 mg/L	Desviación estándar	2.09 mg/L
MUESTRA 2	14-oct-14	11.4 mg/L	Grados de libertad	3
MUESTRA 3	11-nov-14	11.7 mg/L	“t” (90 %)	2.35
MUESTRA 4	06-mar-15	15.3 mg/L	Error (10 %)	1.23 mg/L
			No. muestras	16

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Cuarta estimación de muestra**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FECHA</b>	<b>ALUMINIO</b>		
			Promedio	12.31 mg/L
MUESTRA 1	23-sep-14	10.6 mg/L	Desviación estándar	1.81 mg/L
MUESTRA 2	14-oct-14	11.4 mg/L	Grados de libertad	4
MUESTRA 3	11-nov-14	11.7 mg/L	“t” (90 %)	2.13
MUESTRA 4	06-mar-15	15.3 mg/L	Error (10 %)	1.23 mg/L
MUESTRA 5	29-abr-15	12.5 mg/L	No. muestras	10

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Quinta estimación de muestra**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FECHA</b>	<b>ALUMINIO</b>		
			Promedio	12.42 mg/L
MUESTRA 1	23-sep-14	10.6 mg/L	Desviación estándar	1.64 mg/L
MUESTRA 2	14-oct-14	11.4 mg/L	Grados de libertad	5
MUESTRA 3	11-nov-14	11.7 mg/L	“t” (90 %)	2.02
MUESTRA 4	06-mar-15	15.3 mg/L	Error (10 %)	1.24 mg/L
MUESTRA 5	29-abr-15	12.5 mg/L	No. muestras	7
MUESTRA 6	03-jul-15	12.9 mg/L		

Fuente: elaboración propia.

Durante este procedimiento, se observó que la variabilidad de la desviación estándar disminuyó, además de considerar bajo criterio, que el número de muestras estimado es el apropiado, pues se tienen análisis tanto de la época de lluvias como de verano, por lo tanto, el número de muestras considerado para este estudio, es de  $n = 7$ . La séptima muestra, que también fue analizada para los parámetros establecidos, se destinó para la prueba experimental de esta investigación.

#### 2.4. Análisis de laboratorio

Las muestras de lodos fueron sometidas a un análisis en laboratorio, con el objetivo de conocer las concentraciones de los parámetros establecidos para el desarrollo de esta investigación; las primeras 6 muestras se analizaron en los laboratorios del Ministerio de Energía y Minas, mientras tanto, la muestra 7 fue analizada en un laboratorio privado. Para ambos casos, se utilizó la siguiente metodología:

Tabla VII. Metodología para el análisis en laboratorio de parámetros

PARÁMETRO	METODOLOGÍA
Arsénico (As)	EPA 3051A. UNICAM AN40177_E10/03C
Cadmio (Cd)	EPA 3051A. SMWW3111B
Mercurio (Hg)	EPA 3051A. UNICAM AN40181_E10/03C
Plomo (Pb)	EPA 3051A. SMWW3111B
Cromo (Cr)	EPA 3051A. SMWW3111D
Coliformes totales	SMWW 9221A
Coliformes fecales	SMWW 9221A

SMWW: Standard Methods of Water and Wastewater

Fuente: elaboración propia.

El método EPA 3051A es aplicable para la extracción y disolución; emplea ácidos apropiados y un horno de microondas en el tratamiento de lodos. Se pueden analizar mediante absorción atómica los cinco metales establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

En espectrofotometría directa por absorción atómica (SMWW 3111B, 3111D, UNICAM AN40177\_E10/03C, UNICAM AN40181\_E10/03C). El procedimiento mide la cantidad de luz absorbida, donde cada metal tiene su propia longitud de onda de absorción característica. Así, la cantidad de energía absorbida a una longitud de onda específica es proporcional a la concentración del elemento en la muestra.

La determinación de coliformes totales y fecales, se realizó en diferentes diluciones de lodo, aplicando el método de los tubos de fermentación múltiple. La lectura final se realiza de acuerdo con la tabla del Número Más Probable – NMP.

## **2.5. Análisis estadístico de los resultados**

El análisis estadístico de los resultados de las muestras para determinar los valores medios de los parámetros establecidos para esta investigación, se realizó con el programa IBM SPSS Statistics; este software dispone de varias técnicas para el análisis de datos, incluyendo las pruebas de normalidad que son útiles para validar si la serie de datos tiene un comportamiento normal.

## **2.6. Revisión y comparación de parámetros normativos en lodos**

Las concentraciones de los parámetros analizados para este estudio, en comparación con los límites establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006,



permitieron determinar la calidad de estos y sus formas de aprovechamiento. Además, se consultaron las normativas de la República de Colombia, México y Perú, países que sí cuentan con un marco normativo específico para lodos generados en PTAPs:

- Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000, capítulo C.13 “Manejo de lodos”. Colombia.
- Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas potabilizadoras de tecnología simplificada, capítulo 8 “Procesos para el manejo y disposición de subproductos de potabilización”, sección 8.3 “Disposición final de residuos” México.
- Condiciones Mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final, capítulo VII “Aprovechamiento de los lodos”. Perú.

## **2.7. Modelo experimental**

Para el desarrollo del modelo experimental, se realizó el monitoreo de una muestra de lodos durante la temporada de lluvias y otra en el verano.

### **2.7.1. Fabricación**

Se elaboró la unidad de secado, que en principio, puede ser considerado como un patio de lodos, utilizando recipientes plásticos circulares disponibles en el medio; además, se instaló una cubierta a base de parales y nylon, para evitar la exposición del material ante las lluvias y el aumento de la humedad en el aire que se da durante las noches.

### **2.7.2. Homogenización y espesamiento**

Previo a la deshidratación, los lodos fueron sometidos al proceso de homogenización y espesamiento; la actividad consistió en reunir en un recipiente, las muestras recolectadas en los diferentes puntos ya establecidos dentro del sedimentador y que corresponden a la muestra compuesta 7.

Se prepararon los lodos mediante su mezcla por 15 minutos con movimientos circulares, tenues y continuos, posteriormente se almacenaron y se dejaron reposar durante 6 días, logrando la remoción del remanente de agua en su superficie. Para el tiempo de espesamiento se tomó como referencia, los resultados de la investigación realizada por el ingeniero Martínez, donde se estableció que los lodos requieren como máximo de esa cantidad de días para su espesamiento.

### **2.7.3. Deshidratación de los lodos**

En la deshidratación se logró separar un porcentaje del contenido de agua con respecto a los sólidos, recurriendo únicamente al proceso de evaporación, que consistió en el cambio de estado del agua (líquido-gaseoso) y estuvo condicionado directamente por el clima

Para esto, los lodos fueron dispuestos en la unidad de secado con un espesor de 15 cm, y desde el momento en que fueron colocados se inició un monitoreo diario del peso y altura. Para la capa de lodos, se tomó como referencia, los resultados de la investigación realizada por el ingeniero Martínez, donde estableció ese valor como espesor óptimo para la deshidratación.

La prueba experimental también se desarrolló para una muestra 8, ejecutando cada una de las actividades descritas anteriormente. Además, de realizar el último análisis en laboratorio de la muestra 7, con respecto a los parámetros establecidos para esta investigación en los lodos ya deshidratados.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Resultados de laboratorio

El detalle de los resultados de laboratorio puede consultarse en el anexo correspondiente. A continuación, se presenta un resumen de los parámetros analizados:

Tabla VIII. **Resumen resultados de los parámetros analizados**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>M - 1</b>	<b>M - 2</b>	<b>M - 3</b>	<b>M - 4</b>	<b>M - 5</b>	<b>M - 6</b>	<b>M - 7</b>
PLATA, mg/kg	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	-
ALUMINIO, % masa	10.59	11.44	11.73	15.31	12.50	12.94	-
BARIO, % masa	0.09	0.09	0.10	0.07	0.09	0.10	-
CALCIO, % masa	1.34	0.99	1.27	1.02	1.44	0.99	-
CADMIO, mg/kg	1.00	N. D.	N. D.	N. D.	3.00	3.00	N. D.
COBALTO, mg/kg	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	N. D.	-
CROMO, mg/kg	13.00	N. D.	62.00	11.00	9.00	8.00	N. D.
COBRE, % masa	56.00	50.00	44.00	0.03	71.00	58.00	-
HIERRO, % masa	3.19	3.78	3.48	2.37	3.25	4.44	-
POTASIO, % masa	1.59	1.34	1.53	0.55	0.75	1.06	-
LITIO, % masa	-	-	-	0.10	33.00	54.00	-
MAGNESIO, % masa	0.49	0.35	0.40	0.28	0.48	0.38	-
MANGANESO, % masa	0.13	0.11	0.10	0.16	0.18	0.11	-
SODIO, % masa	2.08	1.66	3.99	1.00	1.20	3.30	-
NIQUEL, mg/kg	19.00	13.00	N. D.	11.00	19.00	19.00	-
PLOMO, % masa	57.00	285.00	45.00	0.05	N. D.	6.00	N. D.
ESTRONCIO, % masa	179.00	178.00	0.02	0.01	161.00	169.00	-
TITANIO, % masa	-	-	0.38	0.20	-	0.47	-

ZINC, % masa	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	-
GALIO, % masa	-	-	-	0.02	320.00	35.00	-
ARSENICO, mg/kg	-	-	-	N. D.	N. D.	N. D.	7.90
BISMUTO, mg/kg	-	-	-	N. D.	N. D.	-	-
FOSFORO, % masa	-	-	-	1.27	-	-	-
MERCURIO, mg/kg	-	-	-	-	-	-	N. D.

- Parámetro no analizado

N. D. No detectado

Fuente: elaboración propia.

En las muestras se registraron valores con potencial de hidrógeno de 6.4 a 7.8 unidades y temperaturas de 21 – 24.6°C.

### 3.2. Prueba experimental

Tabla IX. **Monitoreo semanal deshidratación, muestra 7**

DESCRIPCIÓN	FECHA	PESO LODOS	% DE HUMEDAD TOTAL
SEMANA 1	12/05/2017	8.112	100.00
SEMANA 2	19/05/2017	6.662	82.13
SEMANA 3	26/05/2017	5.472	67.46
SEMANA 4	02/06/2017	4.447	54.82
SEMANA 5	09/06/2017	3.184	39.25
SEMANA 6	16/06/2017	2.315	28.51
SEMANA 7	23/06/2017	1.908	23.52
SEMANA 8	30/06/2017	1.296	15.98
SEMANA 9	07/07/2017	1.098	13.54
SEMANA 10	14/07/2017	1.042	12.85
SEMANA 11	21/07/2017	1.018	12.55
SEMANA 12	28/07/2017	0.020	12.57

SEMANA 13	04/08/2017	1.03	12.70
SEMANA 14	11/08/2017	1.174	14.47
SEMANA 15	18/08/2017	1.032	12.72
SEMANA 16	25/08/2017	1.062	13.09
ULTIMO REGISTRO	29/08/2017	1.022	12.60

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Monitoreo semanal deshidratación, muestra 8**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FECHA</b>	<b>PESO LODOS</b>	<b>% DE HUMEDAD TOTAL</b>
SEMANA 1	08/06/2017	8.853	100.00
SEMANA 2	15/06/2017	7.623	86.61
SEMANA 3	22/06/2017	6.418	72.50
SEMANA 4	29/06/2017	4.808	54.31
SEMANA 5	06/07/2017	3.100	35.02
SEMANA 6	13/07/2017	2.224	25.12
SEMANA 7	20/07/2017	2.104	23.77
SEMANA 8	27/07/2017	2.062	23.29
SEMANA 9	03/08/2017	2.062	23.29
SEMANA 10	10/08/2017	2.066	23.34
SEMANA 11	17/08/2017	2.066	23.34
SEMANA 12	24/08/2017	2.088	23.59
ULTIMO REGISTRO	30/08/2017	2.080	23.49

Fuente: elaboración propia.

Los análisis de laboratorio realizados para los lodos ya deshidratados de la muestra 7, establecieron los resultados siguientes:

Tabla XI. **Resultados parámetros analizados para lodos deshidratados**

<b>PARAMETRO</b>	<b>RESULTADO</b>
ARSÉNICO, mg/kg	7.9
CADMIO, mg/kg	N.D.
MERCURIO, mg/kg	N.D.
PLOMO, mg/kg	N.D.
CROMO, mg/kg	N.D.
COLIFORMES TOTALES, NMP/100 g	23
COLIFORMES FECALES, NMP/100 g	<1.8
N. D. No detectado	
NMP Número más probable	

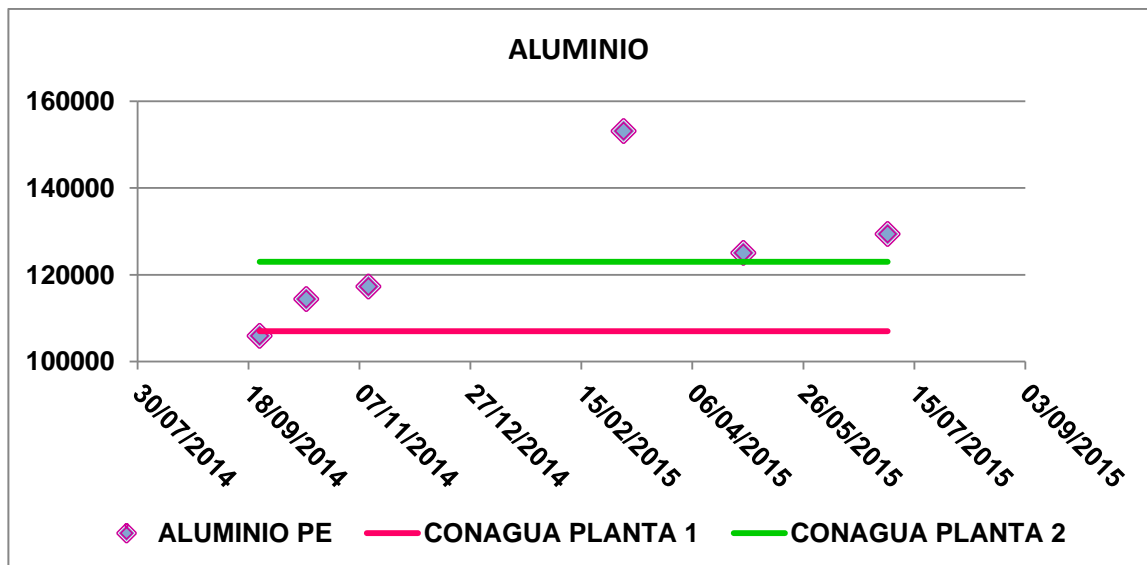
Fuente: elaboración propia.

## 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Concentraciones medias de parámetros establecidos

En la imagen 4 y 5, se presentan las concentraciones de aluminio y hierro presentes en cada una de las muestras analizadas para este estudio y su comportamiento con respecto al tiempo que comprende los años 2014 y 2015, identificado en las gráficas como: ALUMINIO PE Y HIERRO PE; en comparación con las concentraciones reportadas por las plantas analizadas por CONAGUA - México, identificadas en las gráficas como: CONAGUA PLANTA 1 Y CONAGUA PLANTA 2.

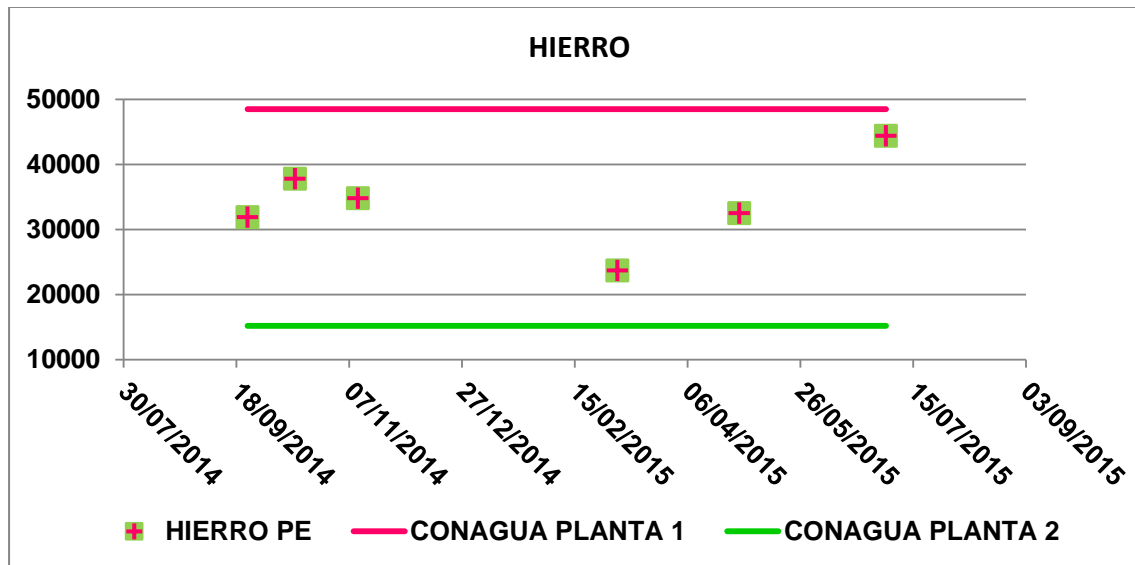
Figura 4. Comparación aluminio presente en planta estudio y CONAGUA - México



Fuente: elaboración propia.



Figura 5. **Comparación de hierro presente en planta estudio y CONAGUA - México**



Fuente: elaboración propia.

El aluminio presente en cada muestra analizada en este estudio (ALUMINIO PE), es similar a las concentraciones de las PTAPs analizadas y presentadas por la normativa mexicana, y que son de 107,000.00 mg/kg (CONAGUA PLANTA 1) y 123,000.00 mg/kg (CONAGUA PLANTA 2), tal como se muestra en la figura 4. En el caso del hierro (HIERRO PE), este se encuentra dentro del rango de los valores presentados de 48,500.00mg/kg (CONAGUA PLANTA 1) y 15,200.00 mg/kg (CONAGUA PLANTA 2), según la gráfica 5.

De los datos de aluminio y aplicando la prueba de normalidad Shapiro-Wilk, método utilizado para analizar series de datos menores a 30, se obtuvo una significancia de 0.547; se conserva la hipótesis de un comportamiento normal con un nivel de significancia mayor a 0.05, por lo tanto, la serie de datos de aluminio tiene un comportamiento normal, con nivel de confianza del 95 %,

establece un valor promedio de 12.42 % masa, equivalente a 124,000 mg/kg, y desviación estándar de 1.64 % masa.

En el análisis de hierro, se obtuvo una significancia de 0.929; por lo tanto, la serie de datos de hierro tiene un comportamiento normal, con un nivel de confianza del 95 %, establece un valor promedio de 3.42 % masa, equivalentes a 34,200 mg/kg y desviación estándar de 0.68 % masa. Esto evidencia las trazas del coagulante aplicado en el tratamiento.

Es importante considerar el aluminio presente en los suelos, pues es un elemento que en concentraciones mayores, implica problemas de toxicidad, incrementan la alcalinidad, afectan el rendimiento y dificulta que las plantas dispongan de otros nutrientes, además, del alcance a los subsecuentes de la cadena alimenticia; según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000-, la enfermedad del Alzheimer se asocia a las altas concentraciones de este elemento.

Respecto al análisis de cadmio, cromo, plomo y arsénico, se presentaron valores de significancia menores a 0.05, por lo tanto, las series de datos no tienen un comportamiento normal; esto implica que se requiere una serie de datos mayor para poder determinar un valor medio que sea estadísticamente representativo. Para el presente estudio, el comportamiento de cadmio se presentó en un rango de 0 – 3 mg/kg; el cromo en 0 – 62 mg/kg; el plomo en 0 – 285 mg/kg; y el arsénico en 0 – 7.9 mg/kg

Asimismo, se realizó el análisis de laboratorio para el parámetro mercurio; sin embargo, en los resultados se indica que no fue detectada concentración alguna. Teniendo en cuenta que, la calidad de los lodos depende directamente

de las características del agua tratada, las concentraciones de los parámetros analizados pueden variar de los resultados en esta investigación.

Es importante establecer a partir del análisis de metales pesados, que las concentraciones no se presenten de formas excesivas, pues ponen en riesgo la salud de los miembros subsecuentes de la cadena de alimentos y alteran la calidad del ambiente. El mercurio y plomo son los metales considerados más dañinos; el primero puede causar efectos imperceptibles y un acortamiento general de la vida, la exposición a niveles tóxicos puede causar intoxicación por plomo, conocida como plumbismo.

En el caso del mercurio, existen eventos históricos que documentan los serios efectos ocasionados por este metal, el más reconocido es el incidente de Minamata, Japón (1950), con 111 personas afectadas y 46 de ellas de forma severa. Los sobrevivientes presentaron daños severos en el sistema nervioso, riñones, parálisis parcial o total, ataxia, atrofia muscular, discapacidad del habla y auditiva, desorden mental e infertilidad.

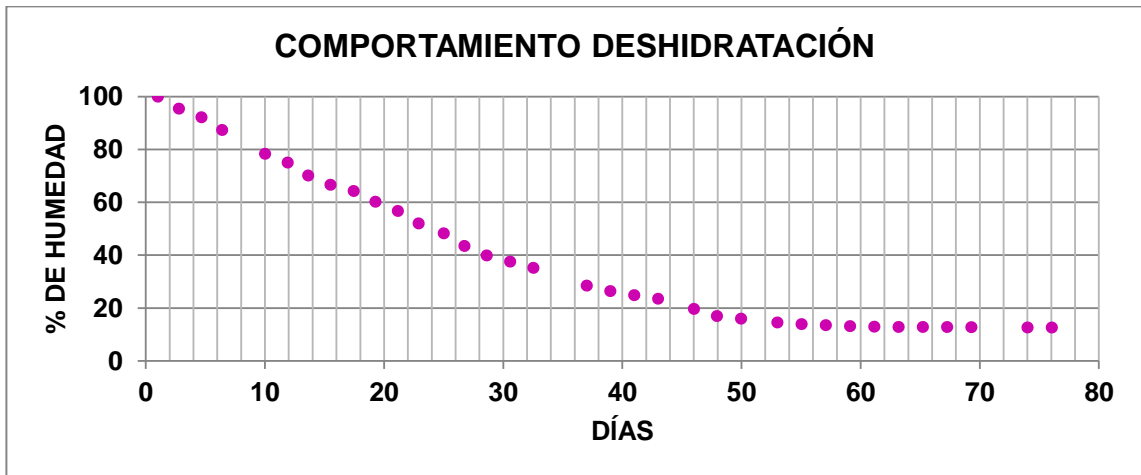
El cadmio por su parte, se caracteriza por efectos acumulativos, sobrepasando los niveles de toxicidad pueden incidir en daño testicular y degradación renal; la exposición constante a bajos niveles, alteraciones respiratorias, gastrointestinales, anemia, osteomalasia e hipersensibilidad a las enfermedades cardíacas (Mordtvedt, Giordano, Lindsay, 1983).

#### **4.2. Tiempo de deshidratación**

El monitoreo de la muestra 7 duró 110 días, logrando un 12.60 % de porcentaje de humedad; la muestra 8 duró 84 días, logrando un 23.5 % de

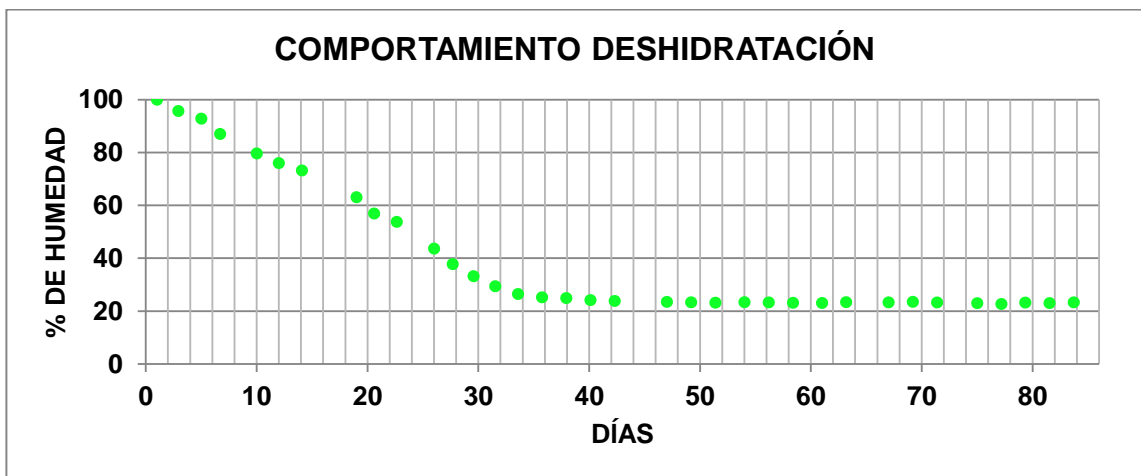
porcentaje de humedad. A continuación se presentan las gráficas que describen el comportamiento de la deshidratación con respecto al tiempo:

Figura 6. **Comportamiento deshidratación, muestra 7**



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Comportamiento deshidratación, muestra 8**



Fuente: elaboración propia.

El tiempo de deshidratación estimado para los lodos, sugiere que en la época más crítica para este proceso, que corresponde a la temporada de lluvias, se necesitan de 60 días (2 meses) para lograr una deshidratación representativa; contemplando que el mecanismo fue únicamente la evaporación, por lo que si se proveen de drenajes, el tiempo puede reducirse considerablemente. En el caso de la época más favorable, que es durante el verano, se necesitan de 40 días (1.3 meses); de igual manera, si se proveen de drenajes, el tiempo se reduciría considerablemente.

El tiempo de deshidratación puede aumentar, sí se presentan condiciones desfavorables en cuanto al clima, es decir, lugares donde se tengan precipitaciones mayores, climas más húmedos y donde las tasas de evaporación sean menores a las de precipitación.

#### **4.3. Volumen de lodos**

Los lodos deshidratados que corresponden a la muestra 7, se redujeron en un 13 % de su volumen inicial, estos lodos son derivados del tratamiento del afluyente captado durante verano; en cambio, la muestra 8 redujo su volumen en un 28 %, y estos son los derivados del tratamiento del agua captada durante invierno. Desde un inicio los lodos de la muestra 8 presentaron mayor concentración de lodos, y esto puede asociarse al arrastre de sólidos que se genera durante las lluvias en el área de influencia (cuenca).

#### **4.4. Opciones de aprovechamiento para lodos analizados**

Para definir las opciones de aprovechamiento, se realizó una revisión de los parámetros normativos para lodos del Acuerdo Gubernativo 236-2006

“Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos”, y los límites máximos permisibles para estos:

Tabla XII. **Opciones de aprovechamiento según Acuerdo Gubernativo 236-2006**

DESCRIPCIÓN	DISPOSICIÓN			RESULTADO DE LA INVESTIGACIÓN
	APLICACIÓN AL SUELO*	DISPOSICIÓN EN RELLENOS SANITARIOS*	CONFINAMIENTO O AISLAMIENTO*	
ARSÉNICO	50 mg/kg	100 mg/kg	> 100 mg/kg	7.90 mg/kg
CADMIO	50 mg/kg	100 mg/kg	> 100 mg/kg	3.00 mg/kg
CROMO	1500 mg/kg	3000 mg/kg	> 3000 mg/kg	62.0 mg/kg
MERCURIO	25 mg/kg	50 mg/kg	> 50 mg/kg	N. D.
PLOMO	500 mg/kg	1000 mg/kg	> 1000 mg/kg	285.0 mg/kg

\* Acuerdo Gubernativo 236-2006 “Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos”.

Fuente: elaboración propia.

Los límites corresponden para aquellos lodos que presenten potencial de hidrógeno menor a 7 unidades; sí se presentan valores mayores o igual a este valor, el reglamento indica que los límites máximos permisibles pueden aumentar hasta un 50 % más. La disposición de los lodos en cualquiera de las formas establecidas por la normativa guatemalteca de referencia, es aceptable.

#### 4.4.1. Aplicación al suelo

Los lodos pueden ser dispuestos como acondicionadores de suelo hasta 200,000 kg/ha/año; sí se considera su aplicación como abono, pueden ser dispuestos hasta 100,000 kg/ha/año.

La ventaja de esta disposición es que, en el caso del cromo, plomo, mercurio, cadmio y otros presentes en los lodos dispuestos en suelos, son asimilados a metales no tóxicos como sodio, potasio, litio, calcio y otros por intercambio iónico; además, también existe la presencia de cobre, hierro, manganeso y zinc, que son considerados micronutrientes para los suelos y vegetación (Ramalho, 1996). Entre otros elementos están el calcio, fósforo, magnesio y potasio, que se constituyen como macronutrientes.

#### **4.4.2. Rellenos sanitarios**

Los lodos podrán ser dispuestos en rellenos sanitarios, sí estos no son bioinfecciosos y que no requieran confinamiento; siempre y cuando, los rellenos sanitarios cuenten con autorización del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales – MARN, y Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social – MSPAS.

#### **4.4.3. Confinamiento o aislamiento**

Si los lodos presentan compuestos que comprometan la calidad del manto freático, fuentes de agua superficiales y subterráneas, suelo y aire; estos deben ser confinados o aislados para evitar su impacto. De igual manera, el sitio de confinamiento o aislamiento debe ser autorizado por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y el Ministerio de Energía y Minas (MEM).

### **4.5. Comparación con otras normativas**

#### **4.5.1. Norma colombiana**

Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. RAS – 2000, capítulo C13 “Manejo de lodos”. Establece que si los lodos se

devuelven directamente a la corriente de agua debe adquirirse un permiso de las autoridades competentes, acompañada de un estudio que demuestre que no afectarán al ecosistema circundante. En el caso de alcantarillados, también deben verificarse que los daños que impliquen no sean significativos.

#### 4.5.2. Normativa mexicana

Pueden ser dispuestos en rellenos sanitarios municipales siempre que se demuestren que no sean residuos peligrosos; dispuestos en terrenos agrícolas, pues cumplen con las especificaciones de establecidos por la normativa mexicana (consultar tabla XIII. Comparación normativa mexicana, disposición en terrenos).

Tabla XIII. **Comparación normativa mexicana, disposición en terrenos**

<b>METAL</b>	<b>CONCENTRACIÓN MÁXIMA*</b>	<b>RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>
ARSÉNICO, mg/kg	41	7.9
CADMIO, mg/kg	39	3.00
CROMO	1200	62.00
COBRE, mg/kg	1500	13.00
PLOMO, mg/kg	300	285.00
MERCURIO, mg/kg	17	N. D.
MOLIBDENO, mg/kg	18	-
NIQUEL, mg/kg	420	13.50
SELENIO, mg/kg	36	-
ZINC, mg/kg	2800	0.02

\* Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas potabilizadoras de tecnología simplificada. CONAGUA.

Fuente: elaboración propia.



La normativa mexicana también da a conocer que la disposición de los lodos de PTAPs en los sistemas de aguas residuales, únicamente transfiere el problema del manejo a la PTAR, y que para el caso, la descarga deberá cumplir con la norma que rige la calidad de descargas en sistemas de alcantarillado. Asimismo, contemplan la descarga en cuerpos de agua, pues lo reconocen como una práctica común en el medio y lo establecen como una forma de disposición, en tal sentido, indican que esto no puede realizarse directamente y necesitan de un tratamiento previo, cumpliendo con la norma que rige la calidad de descargas en cuerpos de agua.

La norma también cuenta con un apartado para evaluar el aprovechamiento de los lodos, de acuerdo a las coliformes fecales, salmonela y helmintos. Esta investigación únicamente evaluó los coliformes fecales, dando como resultado 23 NMP/100 g, equivalentes a 2300 NMP/g, lo que indica que son lodos clase C, del tipo Excelente – bueno, con aprovechamiento en usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas (consultar tabla XIV. Evaluación aprovechamiento de lodos según normativa mexicana).

Tabla XIV. **Evaluación aprovechamiento de lodos, según normativa mexicana**

INDICADOR BIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN	CLASE		
	A*	B*	C*
COLIFORMES FECALES	< 1000 NMP	< 1000 NMP	< 2000000 NMP
SALMONELA	< 3	< 3	< 300
PARÁSITOS	< 1 $\omega$	< 10	< 35

\* Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas potabilizadoras de tecnología simplificada. CONAGUA.  
 NMP Número más probable  
 $\omega$  Huevos de helmintos viables

Fuente: elaboración propia.

### **4.5.3. Normativa peruana**

Condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final, capítulo VII “Aprovechamiento de los lodos”, indica que para el reaprovechamiento y comercialización, los lodos deshidratados de plantas potabilizadoras deberán cumplir con un contenido de sólidos igual o mayor de 25 %, y podrán ser aprovechados de las siguientes formas:

1. Material de construcción
2. Material de cobertura de rellenos sanitarios
3. Material de recuperación de sitios contaminados, si cumplen con los estándares de calidad para la aplicación en suelos, específicamente con el contenido de metales pesados
4. Aplicación en suelos (elaboración de brechas cortafuegos en suelos forestales y, en menor grado, como mejorador de suelos en invernaderos)
5. Elaboración de productos cerámicos de alfarería (vasijas ornamentales y ladrillos)
6. Elaboración de adsorbentes y catalizadores por sus altas concentraciones de hierro, aluminio, manganeso o cal.

La norma también establece que, los lodos deshidratados deben ser dispuestos en rellenos sanitarios, si estos no tienen posibilidad de reaprovechamiento. Por lo general, asumen que no hay problema y pueden ser utilizados.



## CONCLUSIONES

1. Los lodos generados en sedimentadores de la PTAP de estudio, sí pueden ser aprovechados en la aplicación al suelo como acondicionadores, abonos, brechas corta fuegos, entre otras formas; o bien ser dispuestos en rellenos sanitarios, pues cumplen con la calidad establecida en el marco normativo utilizado de referencia para este estudio.
2. El análisis estadístico permitió conocer las concentraciones medias de algunos de los parámetros establecidos en esta investigación, siendo estos: 12.42 % masa de aluminio, 3.42 % masa de hierro, con una desviación estándar de 1.64 % masa y 0.69 % masa, respectivamente. Para el resto, el valor más alto de cada uno es: 3 mg/kg de cadmio, 62 mg/kg de cromo, 285 mg/kg de plomo, 7.9 mg/kg de arsénico, y en el caso de mercurio, este no fue detectable.
3. El tiempo de deshidratación estimado para la temporada de lluvias, es de 60 días, y para época de verano se necesitaron de 40 días.
4. Los lodos analizados se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por el Acuerdo Gubernativo 236-2006, asimismo, cumplieron con las exigencias de la normativa mexicana, peruana y colombiana.



## RECOMENDACIONES

1. La determinación de las concentraciones medias de los metales pesados: cadmio, cromo, plomo y arsénico, necesitan del análisis de un número de muestras mayor que el realizado para esta investigación, pues su comportamiento no es normal, porque la serie de datos es muy pequeña.
2. Desarrollar estudios que incorporen pruebas experimentales con los principios de patios de secados, donde se incorpora un sistema de drenajes que aceleran la deshidratación y donde se esperaría una optimización del tiempo.
3. Los lodos necesitan de un estudio específico de helmintos y salmonella para conocer con mayor certeza su calidad microbiológica. Tomando en cuenta que son indicadores biológicos de contaminación importantes establecidos en la normativa mexicana.
4. La creación de una normativa que regule los lodos de PTAPs, debe considerar la disposición de estos en alcantarillados y receptores naturales por ser una práctica común en el medio; por lo tanto, pueden constituirse en aguas residuales, siempre y cuando, cumplan con la calidad exigida por el Acuerdo Gubernativo 236-2006. Teniendo en cuenta que estos conceptos que aborda la normativa de la República de México.

5. Las normativas consultadas no establecen límites para las concentraciones de aluminio presentes en lodos, no obstante, el Acuerdo Gubernativo 236-2006 regula el pH por ser un parámetro que condiciona la acidificación, y que en unidades muy elevadas habría necesidad de una estabilización alcalina o bien que los lodos sean dispuestos en aquellos suelos que por sus características tengan mayor asimilación de metales, por ejemplo, los suelos arcillosos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. 3a ed. Santa Fe de Bogotá, D. C. Colombia: McGraw-Hill, 2000. 362 p.
2. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA – Conagua. República de México. Manual de agua potable, alcantarillado sanitario y saneamiento. Diseño de plantas potabilizadoras de tecnología simplificada. México: 2007. 343 p.
3. MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO DIRECCIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000. Sección II. Título C. Sistemas de potabilización. Bogotá D. C.: República de Colombia, 2000. 198 p.
4. MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO. Resolución Ministerial No. 128-2017-VIVIENDA. Aprobación de las condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final. Lima, Perú: República de Perú, 2017. 8 p.
5. MORDTVEDT, J. J., GIORDANO, P. M., LINDSAY, W. L. *Micronutrientes en agricultura*. México, D. F.: AGT Editor S. A., 1983. 741 p.



6. RAMÍREZ QUIRÓS, Francisco. *Lodos producidos en el tratamiento del agua potable*. Artículo TI 306, Artículo técnico. Disponible en: <http://www.tecnicaindustrial.es/TIFrontal/a-222-lodos-producidos-tratamiento-agua-potable.aspx>
7. RAMALHO, Rubens Sette. *Tratamiento de aguas residuales*. Edición revisada. Barcelona: Editorial REVERTÉ S. A., 1996. 705 p.
8. PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA. Acuerdo Gubernativo No. 236-2006. Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”. Guatemala: República de Guatemala, 2005. 24 p.
9. VARGAS, Lidia. *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría. Tomo I*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente – CEPIS.Lima, Perú: 2004. 278 p.

## APÉNDICES

### A. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LAS ACTIVIDADES



Fotografía 1. Recolección de muestra al fondo del sedimentador.



Fotografía 2. Lodos de puntos distribuidos para muestra compuesta.



Fotografía 3. Homogenización y preparación de lodos.



Fotografía 4. Lodos al finalizar los 6 días de espesamiento.



Fotografía 5. Retiro capa sobrenadante de agua sobre lodos espesados.



Fotografía 6. Consistencia de los lodos espesados.



Fotografía 7. Comparación del sobrenadante de agua extraída.



Fotografía 8. Comparación de los lodos espesados.



Fotografía 9. Materiales para modelo físico experimental.



Fotografía 10. Instalación de modelo físico experimental.



Fotografía 11. Medición de la masa del recipiente sin lodos.



Fotografía 12. Incorporación de los lodos al recipiente.



Fotografía 13. Inicio del monitoreo de la deshidratación de los lodos



Fotografía 14. Inicio del monitoreo de altura en la capa de lodos.



Fotografía 15. Continua monitoreo de la deshidratación de los lodos



Fotografía 16. Continua monitoreo de altura en la capa de lodos



Fotografía 17. Continua monitoreo de la deshidratación de los lodos



Fotografía 18. Continua monitoreo de altura en la capa de lodos



Fotografía 19. Finaliza monitoreo de la deshidratación de los lodos



Fotografía 20. Finaliza monitoreo de altura en la capa de lodos



Fotografía 21. Muestra 7 de lodos en proceso de deshidratación.



Fotografía 22. Muestra 8 de lodos en proceso de deshidratación.



Fotografía 23. Medición de la torta resultante de lodos deshidratados.



Fotografía 24. Medición de la torta resultante de lodos deshidratados.

## B. REGISTRO DEL MONITOREO DE HUMEDAD EN MUESTRA 7 DE LODOS

FECHA	PESO DEL RECIPIENTE (kg)	PESO LODOS + RECIPIENTE	PESO LODOS	% DE HUMEDAD
12/05/2017	0.278	8.390	8.112	100.00
13/05/2017	0.278	8.170	7.892	97.288
14/05/2017	0.278	7.985	7.707	95.007
15/05/2017	0.278	7.880	7.602	93.713
16/05/2017	0.278	7.685	7.407	91.309

<b>FECHA</b>	<b>PESO DEL RECIPIENTE (kg)</b>	<b>PESO LODOS + RECIPIENTE</b>	<b>PESO LODOS</b>	<b>% DE HUMEDAD</b>
17/05/2017	0.278	7.450	7.172	88.412
18/05/2017	0.278	7.230	6.952	85.700
19/05/2017	0.278	6.940	6.662	82.125
20/05/2017	-----	-----	-----	-----
21/05/2017	0.278	6.635	6.357	78.365
22/05/2017	0.278	6.485	6.207	76.516
23/05/2017	0.278	6.350	6.072	74.852
24/05/2017	0.278	6.125	5.847	72.078
25/05/2017	0.278	5.885	5.607	69.120
26/05/2017	0.278	5.750	5.472	67.456
27/05/2017	0.278	5.630	5.352	65.976
28/05/2017	0.278	5.575	5.297	65.298
29/05/2017	0.278	5.375	5.097	62.833
30/05/2017	0.278	5.205	4.927	60.737
31/05/2017	0.278	5.055	4.777	58.888
01/06/2017	0.278	4.905	4.627	57.039
02/06/2017	0.278	4.725	4.447	54.820
03/06/2017	0.278	4.470	4.192	51.677
04/06/2017	-----	-----	-----	-----
05/06/2017	0.278	4.195	3.917	48.286
06/06/2017	0.278	3.996	3.718	45.833
07/06/2017	0.278	3.750	3.472	42.801
08/06/2017	0.278	3.606	3.328	41.026
09/06/2017	0.278	3.462	3.184	39.250
10/06/2017	0.278	3.372	3.094	38.141
11/06/2017	0.278	3.294	3.016	37.179
12/06/2017	0.278	3.226	2.948	36.341
13/06/2017	0.278	3.046	2.768	34.122
14/06/2017	0.278	2.894	2.616	32.249
15/06/2017	-----	-----	-----	-----
16/06/2017	-----	-----	-----	-----
17/06/2017	0.278	2.590	2.312	28.501
18/06/2017	0.278	2.476	2.198	27.096
19/06/2017	0.278	2.420	2.142	26.405
20/06/2017	0.278	2.362	2.084	25.690
21/06/2017	0.278	2.296	2.018	24.877
22/06/2017	0.278	2.262	1.984	24.458

<b>FECHA</b>	<b>PESO DEL RECIPIENTE (kg)</b>	<b>PESO LODOS + RECIPIENTE</b>	<b>PESO LODOS</b>	<b>% DE HUMEDAD</b>
23/06/2017	0.278	2.186	1.908	23.521
24/06/2017	-----	-----	-----	-----
25/06/2017	-----	-----	-----	-----
26/06/2017	0.278	1.876	1.598	19.699
27/06/2017	0.278	1.716	1.438	17.727
28/06/2017	0.278	1.652	1.374	16.938
29/06/2017	0.278	1.600	1.322	16.297
30/06/2017	0.278	1.574	1.296	15.976
01/07/2017	0.278	1.498	1.220	15.039
02/07/2017	-----	-----	-----	-----
03/07/2017	0.278	1.458	1.18	14.546
04/07/2017	0.278	1.426	1.148	14.152
05/07/2017	0.278	1.408	1.130	13.930
06/07/2017	0.278	1.396	1.118	13.782
07/07/2017	0.278	1.376	1.098	13.536
08/07/2017	0.278	1.368	1.090	13.437
09/07/2017	0.278	1.346	1.068	13.166
10/07/2017	0.278	1.344	1.066	13.141
11/07/2017	0.278	1.33	1.052	12.968
12/07/2017	0.278	1.324	1.046	12.894
13/07/2017	0.278	1.320	1.042	12.845
14/07/2017	0.278	1.320	1.042	12.845
15/07/2017	0.278	1.320	1.042	12.845
16/07/2017	0.278	1.320	1.042	12.845
17/07/2017	0.278	1.318	1.040	12.821
18/07/2017	0.278	1.318	1.040	12.821
19/07/2017	0.278	1.314	1.036	12.771
20/07/2017	0.278	1.312	1.034	12.747
21/07/2017	0.278	1.296	1.018	12.549
22/07/2017	-----	-----	-----	-----
23/07/2017	-----	-----	-----	-----
24/07/2017	0.278	1.304	1.026	12.648
25/07/2017	0.278	1.302	1.024	12.623
26/07/2017	0.278	1.302	1.024	12.623
27/07/2017	0.278	1.300	1.022	12.599
28/07/2017	-----	-----	-----	-----
29/07/2017	0.278	1.296	1.018	12.549



<b>FECHA</b>	<b>PESO DEL RECIPIENTE (kg)</b>	<b>PESO LODOS + RECIPIENTE</b>	<b>PESO LODOS</b>	<b>% DE HUMEDAD</b>
30/07/2017	-----	-----	-----	-----
31/07/2017	0.278	1.426	1.148	14.152
01/08/2017	0.278	1.324	1.046	12.894
02/08/2017	0.278	1.320	1.042	12.845
03/08/2017	0.278	1.318	1.040	12.821
04/08/2017	0.278	1.308	1.030	12.697
05/08/2017	0.278	1.306	1.028	12.673
06/08/2017	-----	-----	-----	-----
07/08/2017	0.278	1.300	1.022	12.599
08/08/2017	0.278	1.394	1.116	13.757
09/08/2017	0.278	1.356	1.078	13.289
10/08/2017	0.278	1.342	1.064	13.116
11/08/2017	0.278	1.452	1.174	14.472
12/08/2017	-----	-----	-----	-----
13/08/2017	0.278	1.338	1.060	13.067
14/08/2017	-----	-----	-----	-----
15/08/2017	0.278	1.342	1.064	13.116
16/08/2017	0.278	1.332	1.054	12.993
17/08/2017	0.278	1.318	1.040	12.821
18/08/2017	0.278	1.310	1.032	12.722
19/08/2017	-----	-----	-----	-----
20/08/2017	-----	-----	-----	-----
21/08/2017	0.278	1.282	1.004	12.377
22/08/2017	0.278	1.288	1.010	12.451
23/08/2017	0.278	1.286	1.008	12.426
24/08/2017	0.278	1.336	1.058	13.042
25/08/2017	0.278	1.340	1.062	13.092
26/08/2017	0.278	1.330	1.052	12.968
27/08/2017	0.278	1.312	1.034	12.747
28/08/2017	0.278	1.306	1.028	12.673
29/08/2017	0.278	1.300	1.022	12.599

C. REGISTRO DEL MONITOREO DE HUMEDAD EN MUESTRA 7 DE  
 LODOS

FECHA	PESO DEL RECIPIENTE (kg)	PESO LODOS + RECIPIENTE	PESO LODOS	% DE HUMEDAD
08/06/2017	0.302	9.155	8.853	100.000
09/06/2017	0.302	8.915	8.613	97.289
10/06/2017	0.302	8.765	8.463	95.595
11/06/2017	0.302	8.64	8.338	94.183
12/06/2017	0.302	8.52	8.218	92.827
13/06/2017	0.302	8.205	7.903	89.269
14/06/2017	0.302	7.925	7.623	86.106
15/06/2017	-----	-----	-----	-----
16/06/2017	-----	-----	-----	-----
17/06/2017	0.302	7.355	7.053	79.668
18/06/2017	0.302	7.14	6.838	77.239
19/06/2017	0.302	7.03	6.728	75.997
20/06/2017	0.302	6.925	6.623	74.811
21/06/2017	0.302	6.79	6.488	73.286
22/06/2017	0.302	6.72	6.418	72.495
23/06/2017	0.302	6.575	6.273	70.857
24/06/2017	-----	-----	-----	-----
25/06/2017	-----	-----	-----	-----
26/06/2017	0.302	5.89	5.588	63.120
27/06/2017	0.302	5.475	5.173	58.432
28/06/2017	0.302	5.27	4.968	56.117
29/06/2017	0.302	5.11	4.808	54.309
30/06/2017	0.302	5.005	4.703	53.123
01/07/2017	0.302	4.62	4.318	48.774
02/07/2017	-----	-----	-----	-----
03/07/2017	0.302	4.17	3.868	43.691
04/07/2017	0.302	3.836	3.534	39.919
05/07/2017	0.302	3.572	3.27	36.937
06/07/2017	0.302	3.402	3.1	35.016
07/07/2017	0.302	3.122	2.82	31.854
08/07/2017	0.302	2.942	2.64	29.820
09/07/2017	0.302	2.872	2.57	29.030
10/07/2017	0.302	2.696	2.394	27.042






<b>FECHA</b>	<b>PESO DEL RECIPIENTE (kg)</b>	<b>PESO LODOS + RECIPIENTE</b>	<b>PESO LODOS</b>	<b>% DE HUMEDAD</b>
11/07/2017	0.302	2.618	2.316	26.161
12/07/2017	0.302	2.566	2.264	25.573
13/07/2017	0.302	2.526	2.224	25.121
14/07/2017	0.302	2.522	2.22	25.076
15/07/2017	0.302	2.508	2.206	24.918
16/07/2017	0.302	2.46	2.158	24.376
17/07/2017	0.302	2.442	2.14	24.173
18/07/2017	0.302	2.436	2.134	24.105
19/07/2017	0.302	2.416	2.114	23.879
20/07/2017	0.302	2.406	2.104	23.766
21/07/2017	0.302	2.388	2.086	23.563
22/07/2017	-----	-----	-----	-----
23/07/2017	-----	-----	-----	-----
24/07/2017	0.302	2.382	2.08	23.495
25/07/2017	0.302	2.372	2.07	23.382
26/07/2017	0.302	2.368	2.066	23.337
27/07/2017	0.302	2.364	2.062	23.292
28/07/2017	0.302	2.358	2.056	23.224
29/07/2017	0.302	2.348	2.046	23.111
30/07/2017	-----	-----	-----	-----
31/07/2017	0.302	2.372	2.07	23.382
01/08/2017	0.302	2.368	2.066	23.337
02/08/2017	0.302	2.364	2.062	23.292
03/08/2017	0.302	2.364	2.062	23.292
04/08/2017	0.302	2.352	2.05	23.156
05/08/2017	0.302	2.35	2.048	23.133
06/08/2017	-----	-----	-----	-----
07/08/2017	0.302	2.344	2.042	23.066
08/08/2017	0.302	2.402	2.1	23.721
09/08/2017	0.302	2.376	2.074	23.427
10/08/2017	0.302	2.368	2.066	23.337
11/08/2017	0.302	2.458	2.156	24.353
12/08/2017	0.302	-----	-----	-----
13/08/2017	0.302	2.366	2.064	23.314
14/08/2017	0.302	2.372	2.07	23.382
15/08/2017	0.302	2.384	2.082	23.517
16/08/2017	0.302	2.376	2.074	23.427

<b>FECHA</b>	<b>PESO DEL RECIPIENTE (kg)</b>	<b>PESO LODOS + RECIPIENTE</b>	<b>PESO LODOS</b>	<b>% DE HUMEDAD</b>
17/08/2017	0.302	2.368	2.066	23.337
18/08/2017	0.302	2.352	2.05	23.156
19/08/2017	-----	-----	-----	-----
20/08/2017	-----	-----	-----	-----
21/08/2017	0.302	2.338	2.036	22.998
22/08/2017	0.302	2.336	2.034	22.975
23/08/2017	0.302	2.3	1.998	22.569
24/08/2017	0.302	2.39	2.088	23.585
25/08/2017	0.302	2.36	2.058	23.246
26/08/2017	0.302	2.358	2.056	23.224
27/08/2017	0.302	2.344	2.042	23.066
28/08/2017	0.302	2.34	2.038	23.020
29/08/2017	0.302	2.334	2.032	22.953
30/08/2017	0.302	2.382	2.08	23.495



# ANEXOS

## A. RESULTADOS DE MUESTRAS DE LODO.

 <b>Gobierno de Guatemala</b> Ministerio de Energía y Minas	<h3>LABORATORIOS TÉCNICOS</h3>	PAGINA 1 DE (1) LAB-REP-1832-14 ORDEN No. L-868-14 GUATEMALA, 24-10-14																																																						
<b>RESULTADOS DE ANÁLISIS</b>																																																								
MUESTRA: <b>LODO (MUESTRA 1)</b> PRESENTADA POR: Adriana Orozco RESPONSABLE DEL MUESTREO: Adriana Orozco LOCALIZACIÓN: 38 Calle 12-16 Zona 12 FECHA DE MUESTREO: Desconocida FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 15-10-14 FECHA DE ANALISIS: 23-10-14 PRECIO DE ANALISIS: \$ 52.00 ANALISTA: Ing. Hugo Argueta																																																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>DESCRIPCION</th> <th>TECNICA</th> <th>RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Plata, mg/Kg</td><td>E.A.A.</td><td>No detectable</td></tr> <tr><td>Aluminio, % masa</td><td>ICP-OES</td><td>10.59</td></tr> <tr><td>Bario, % masa</td><td>ICP-OES</td><td>0.09</td></tr> <tr><td>Calcio, % masa</td><td>ICP-OES</td><td>1.34</td></tr> <tr><td>Cadmio, mg/Kg</td><td>ICP-OES</td><td>1</td></tr> <tr><td>Cobalto, mg/Kg</td><td>ICP-OES</td><td>No detectable</td></tr> <tr><td>Cromo, mg/Kg</td><td>ICP-OES</td><td>13</td></tr> <tr><td>Cobre, mg/Kg</td><td>ICP-OES</td><td>56</td></tr> <tr><td>Hierro, % masa</td><td>ICP-OES</td><td>3.19</td></tr> <tr><td>Potasio, % masa</td><td>ICP-OES</td><td>1.59</td></tr> <tr><td>Magnesio, % masa</td><td>ICP-OES</td><td>0.49</td></tr> <tr><td>Manganeso, % masa</td><td>ICP-OES</td><td>0.13</td></tr> <tr><td>Sodio, % masa</td><td>ICP-OES</td><td>2.08</td></tr> <tr><td>Niquel, mg/Kg</td><td>ICP-OES</td><td>19</td></tr> <tr><td>Plomo, mg/Kg</td><td>ICP-OES</td><td>57</td></tr> <tr><td>Estroncio, mg/Kg</td><td>ICP-OES</td><td>179</td></tr> <tr><td>Zinc, % masa</td><td>ICP-OES</td><td>0.03</td></tr> </tbody> </table>			DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL	Plata, mg/Kg	E.A.A.	No detectable	Aluminio, % masa	ICP-OES	10.59	Bario, % masa	ICP-OES	0.09	Calcio, % masa	ICP-OES	1.34	Cadmio, mg/Kg	ICP-OES	1	Cobalto, mg/Kg	ICP-OES	No detectable	Cromo, mg/Kg	ICP-OES	13	Cobre, mg/Kg	ICP-OES	56	Hierro, % masa	ICP-OES	3.19	Potasio, % masa	ICP-OES	1.59	Magnesio, % masa	ICP-OES	0.49	Manganeso, % masa	ICP-OES	0.13	Sodio, % masa	ICP-OES	2.08	Niquel, mg/Kg	ICP-OES	19	Plomo, mg/Kg	ICP-OES	57	Estroncio, mg/Kg	ICP-OES	179	Zinc, % masa	ICP-OES	0.03
DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL																																																						
Plata, mg/Kg	E.A.A.	No detectable																																																						
Aluminio, % masa	ICP-OES	10.59																																																						
Bario, % masa	ICP-OES	0.09																																																						
Calcio, % masa	ICP-OES	1.34																																																						
Cadmio, mg/Kg	ICP-OES	1																																																						
Cobalto, mg/Kg	ICP-OES	No detectable																																																						
Cromo, mg/Kg	ICP-OES	13																																																						
Cobre, mg/Kg	ICP-OES	56																																																						
Hierro, % masa	ICP-OES	3.19																																																						
Potasio, % masa	ICP-OES	1.59																																																						
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.49																																																						
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.13																																																						
Sodio, % masa	ICP-OES	2.08																																																						
Niquel, mg/Kg	ICP-OES	19																																																						
Plomo, mg/Kg	ICP-OES	57																																																						
Estroncio, mg/Kg	ICP-OES	179																																																						
Zinc, % masa	ICP-OES	0.03																																																						
<p>Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.          mg/Kg = Miligramos por kilogramo.          ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.          E.A.A. = Espectrometría de absorción atómica.</p>																																																								
 <b>Ing. Byron Rosales</b> ÁREA DE MINERALES																																																								
 <b>Vo. Bo. Inga. Maura Villatoro</b> COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS																																																								

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.  
 Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, [www.mem.gob.gt](http://www.mem.gob.gt)

[www.guatemala.gob.gt](http://www.guatemala.gob.gt)

### RESULTADOS DE ANÁLISIS

MUESTRA: LODO (MUESTRA 2)  
PRESENTADA POR: Adriana Orozco  
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Adriana Orozco  
LOCALIZACIÓN: 38 Calle 12-16 Zona 12  
FECHA DE MUESTREO: Desconocida  
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 15-10-14  
FECHA DE ANALISIS: 23-10-14  
PRECIO DE ANALISIS: \$ 52.00  
ANALISTA: Ing. Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Plata, mg/Kg	E.A.A.	No detectable
Aluminio, % masa	ICP-OES	11.44
Bario, % masa	ICP-OES	0.09
Calcio, % masa	ICP-OES	0.99
Cadmio, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Cobalto, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Cromo, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Cobre, mg/Kg	ICP-OES	50
Hierro, % masa	ICP-OES	3.78
Potasio, % masa	ICP-OES	1.34
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.35
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.11
Sodio, % masa	ICP-OES	1.66
Nicuel, mg/Kg	ICP-OES	13
Plomo, mg/Kg	ICP-OES	285
Estroncio, mg/Kg	ICP-OES	178
Zinc, % masa	ICP-OES	0.02

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.  
mg/Kg =Miligramos por kilogramo.  
ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.  
E.A.A. = Espectrometría de absorción atómica.

  
Ing. Byron Rosales  
**ÁREA DE MINERALES**



  
Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro  
**COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS**



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.  
[Diagonal 17, 29-78 zona 11, \(502\) 2419-6464, www.mem.gob.gt](http://Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, www.mem.gob.gt)

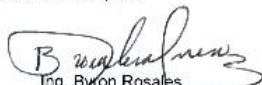
[www.guatemala.gob.gt](http://www.guatemala.gob.gt)

**RESULTADOS DE ANÁLISIS**

**MUESTRA: MUESTRA DE LODO NÚMERO 3**  
 PRESENTADA POR: Adriana Orozco  
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Desconocido  
 LOCALIZACION: 38 Calle 12-16, Zona 12  
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida  
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 11-11-14  
 FECHA DE ANALISIS: 18-11-14  
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 52.00  
 ANALISTA: Ing. Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Plata, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Aluminio, % masa	ICP-OES	11.73
Bario, % masa	ICP-OES	0.10
Calcio, % masa	ICP-OES	1.27
Cadmio, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Cobalto, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Cromo, mg/Kg	ICP-OES	62
Cobre, mg/Kg	ICP-OES	44
Hierro, % masa	ICP-OES	3.48
Potasio, % masa	ICP-OES	1.53
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.40
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.10
Sodio, % masa	ICP-OES	3.99
Niquel, % masa	ICP-OES	No detectable
Plomo, mg/Kg	ICP-OES	45
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.02
Titanio, % masa	ICP-OES	0.38
Zinc, % masa	ICP-OES	0.02

Nota: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.  
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.

  
 Ing. Byron Rosales  
 AREA DE MINERALES

Vo. Bo. Inga. Mayra Vilatoro  
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



Jvg

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, [www.mem.gob.gt](http://www.mem.gob.gt)

[www.guatemala.gob.gt](http://www.guatemala.gob.gt)



### RESULTADOS DE ANÁLISIS

MUESTRA: LODO  
 PRESENTADA POR: Adriana Orozco  
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Desconocido  
 LOCALIZACION: 38 Calle 12-16 Zona 12  
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida  
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 06-03-15  
 FECHA DE ANALISIS: 20-03-15  
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 52.00  
 ANALISTA: Ing. Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Plata, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Aluminio, % masa	ICP-OES	15.31
Bario, % masa	ICP-OES	0.07
Calcio, % masa	ICP-OES	1.02
Cadmio, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Cobalto, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Cromo, mg/Kg	ICP-OES	11
Cobre, % masa	ICP-OES	0.03
Hierro, % masa	ICP-OES	2.37
Potasio, % masa	ICP-OES	0.55
Litio, % masa	ICP-OES	0.10*
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.28
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.16
Sodio, % masa	ICP-OES	1.00
Niquel, mg/Kg	ICP-OES	11
Plomo, % masa	ICP-OES	0.05
Estroncio, % masa	ICP-OES	0.01
Zinc, % masa	ICP-OES	0.02
Galio, % masa	ICP-OES	0.02*
Arsénico, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Bismuto, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Titanio, % masa	ICP-OES	0.20
Fósforo, % masa	ICP-OES	1.27

Notas: Resultados válidos para la cantidad de muestra entregada al laboratorio  
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.  
 mg/Kg= Miligramos por kilogramo.  
 \*Elemento no referenciado.



*Byron Rosales*  
 Ing. Byron Rosales  
 AREA DE MINERALES



Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro  
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS

sf

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, [www.mem.gob.gt](http://www.mem.gob.gt)

[www.guatemala.gob.gt](http://www.guatemala.gob.gt)

### RESULTADOS DE ANÁLISIS

**MUESTRA: MUESTRA DE LODO**  
 PRESENTADA POR: Adriana Orozco  
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Desconocido  
 LOCALIZACION: 38 Calle 12-16 Colonia Villa Sol, Zona 12  
 FECHA DE MUESTREO: Desconocida  
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 29-04-15  
 FECHA DE ANALISIS: 04-05-15  
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 52.00  
 ANALISTA: Ing. Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Plata, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Aluminio, % masa	ICP-OES	12.50
Arsénico, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Bario, % masa	ICP-OES	0.09
Bismuto, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Calcio, % masa	ICP-OES	1.44
Cadmio, mg/Kg	ICP-OES	3
Cobalto, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Cromo, mg/Kg	ICP-OES	9
Cobre, mg/Kg	ICP-OES	71
Hierro, % masa	ICP-OES	3.25
Galio, mg/Kg	ICP-OES	320*
Potasio, % masa	ICP-OES	0.76
Litio, mg/Kg	ICP-OES	33*
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.48
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.18
Sodio, % masa	ICP-OES	1.20
Níquel, mg/Kg	ICP-OES	19
Plomo, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Estroncio, mg/Kg	ICP-OES	161
Zinc, % masa	ICP-OES	0.03

Notas: Resultados válidos para la cantidad de muestra entregada al laboratorio.  
 ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.  
 mg/Kg= Miligramos por kilogramo.  
 \*Elemento no referenciado.

  
 Ing. Byron Rosales  
**AREA DE MINERALES**  
  
 Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro  
**COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS**

Jvg

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, [www.mem.gob.gt](http://www.mem.gob.gt)

[www.guatemala.gob.gt](http://www.guatemala.gob.gt)

### RESULTADOS DE ANÁLISIS

MUESTRA: **LODO**  
PRESENTADA POR: Adriana Orozco  
RESPONSABLE DEL MUESTREO: Desconocido  
LOCALIZACION: Ciudad de Guatemala  
FECHA DE MUESTREO: Desconocida  
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 03-07-15  
FECHA DE ANALISIS: 08-07-15  
PRECIO DE ANALISIS: \$ 52.00  
ANALISTA: Ing. Hugo Argueta

DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS EN FORMA ELEMENTAL
Plata, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Aluminio, % masa	ICP-OES	12.94
Arsénico, mg/Kg	ICP-OES	35
Bario, % masa	ICP-OES	0.10
Bismuto, mg/Kg	ICP-OES	No detectable*
Calcio, % masa	ICP-OES	0.99
Cadmio, mg/Kg	ICP-OES	3
Cobalto, mg/Kg	ICP-OES	No detectable
Cromo, mg/Kg	ICP-OES	8
Cobre, mg/Kg	ICP-OES	58
Hierro, % masa	ICP-OES	4.44
Potasio, % masa	ICP-OES	1.06
Litio, mg/Kg	ICP-OES	54*
Magnesio, % masa	ICP-OES	0.38
Manganeso, % masa	ICP-OES	0.11
Sodio, % masa	ICP-OES	3.30
Níquel, mg/Kg	ICP-OES	19
Plomo, mg/Kg	ICP-OES	6
Estroncio, mg/Kg	ICP-OES	169
Zinc, % masa	ICP-OES	0.02
Titanio, % masa	ICP-OES	0.47

Notas: Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al Laboratorio.  
ICP-OES = Espectrometría de emisión óptica.  
mg/Kg= Miligramos por kilogramo.  
\*Elemento no referenciado.  
Digestión de muestra: Casi total



*B. Rosales*  
Ing. Byron Rosales  
ÁREA DE MINERALES



*M. Villatoro*  
Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro  
COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS

SF

El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

Diagonal 17, 29-78 zona 11, (502) 2419-6464, [www.mem.gob.gt](http://www.mem.gob.gt)

[www.guatemala.gob.gt](http://www.guatemala.gob.gt)

## B. RESULTADOS DE MUESTRA DE LODO DE PRUEBA EXPERIMENTAL.



LABORATORIO AMBIENTAL E INDUSTRIAL

17 avenida 2-39 zona 4 Mixco | Guatemala | Oficinas Zaragoza 2 | Bodega 2  
502 + 2437 7224 | 2437 4455

laboratorio@ecosistemas.com.gt | info@ecosistemas.com.gt | www.ecosistemas.com.gt

Ref 2294-17

Pág 1/1

### REG 016 Resultados de Análisis

Muestra: 1 muestra de lodo  
Análisis solicitado por: ADRIANA DANIELA OROZCO MIRANDA  
Dirección: GUATEMALA  
Procedencia de la muestra: MODELO FÍSICO EXPERIMENTAL  
Fecha de ingreso de muestras: 040917  
Fecha de análisis: 040917-130917  
Fecha del informe: 130917

Identificación de la muestra: LODO (MUESTRA 7)

Correlativo Ecosistemas: 9585

Parámetros analizados:

PARAMETRO	DIMENSIONAL	LIMITE DE DETECCION	RESULTADO	METODOLOGIA
* Arsénico As	mg/kg	2	7.9	EPA 3051A, UNICAM AN40177 E10/03C
* Cadmio Cd	mg/kg	4	N.D.	EPA 3051A, SMWW 3111B
* Mercurio Hg	mg/kg	2	N.D.	EPA 3051A, UNICAM AN40181 E10/03C
* Plomo Pb	mg/kg	10	N.D.	EPA 3051A, SMWW 3111B
* Cromo Cr	mg/kg	6	N.D.	EPA 3051A, SMWW 3111 D
** Coliformes Totales	NMP/100 g	1.8	23	SMWW 9221A
** Coliformes Fecales	NMP/100 g	1.8	<1.8	SMWW 9221A

#### Notas:

*Captación de muestras: La muestra fue captada por personal ajeno a Ecosistemas.*

*Transporte y preservación de la muestra: Temperatura ambiente.*

*Metodología base: Espectrofotometría de Absorción Atómica. Standard Methods for the examination of water and wastewater APHA, AWWA, WEF 22 Ed. / EPA 3051A*

*Se trabajaron diluciones.*

*N.D. No detectable. Debajo del límite de detección.*

*NMP: Número mas probable.*

*Los resultados se determinaron en base seca.*

*Los resultados obtenidos corresponden únicamente a la muestra recibida por el personal de Ecosistemas Proyectos Ambientales.*

*Se prohíbe la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita de Ecosistemas Proyectos Ambientales.*

\* Análisis acreditado COGUANOR NTG/ISO/IEC 17025:2005 según OGA LE 006-04

\*\* Análisis referidos.

Ing. Oscar Paez  
Gerente Técnico