



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS 

ESTABILIZACIÓN DE LODOS ACTIVADOS PROVENIENTES DE
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS
MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA 

AUTOR

DIEGO SEBASTIÁN CATTANI PÉREZ

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

**ESTABILIZACIÓN DE LODOS ACTIVADOS PROVENIENTES DE PLANTAS
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE
DIGESTIÓN ANAEROBIA**

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y
Remediación

Profesora Guía
MSc. Viviana Pavlova Sigcha Terán

Autor
Diego Sebastián Cattani Pérez

Año
2018

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, ESTABILIZACIÓN DE LODOS ACTIVADOS PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA, a través de reuniones periódicas con el estudiante Diego Sebastián Cattani Pérez, en el semestre 2018-1, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”

Viviana Pavlova Sigcha Terán
Máster en Gestión Integral del Agua
C. I.: 1722216163

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, ESTABILIZACIÓN DE LODOS ACTIVADOS PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA, de Diego Sebastián Cattani Pérez, en el semestre 2018-1, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

Daniel Hernán Hidalgo Villalba

Magister en Ciencias Especialización Ingeniería Ambiental

C. I.: 1801914449

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Diego Sebastián Cattani Pérez

C.I.: 1719033209

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme realizar mi sueño y bendecirme en todo este tiempo de formación académica.

A mi familia, por apoyarme incondicionalmente en todo momento.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres, Marcelino y Marcita, a mis hermanos Marcelo y Melanie, quienes me apoyaron.

Gracias por todo.

RESUMEN

En el tratamiento de las aguas residuales domésticas, tiene como finalidad remover todo contaminante perjudicial que se encuentre contenido en un efluente, dando formación a lodos crudos los cuales tienen características de un residuo peligroso. Teniendo en cuenta, que si al lodo residual doméstico se lo sometiera a una estabilización es posible su reutilización con fines agrícolas, recuperación de suelos erosionados, fertilizantes, entre otros.

El presente trabajo de titulación se efectuó en los meses de Octubre y Diciembre del 2017, en los cuales se utilizó el lodo biológico procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas Vacuumtruck Services S.A. ubicado en la provincia de Francisco de Orellana. Al lodo biológico se lo sometió a un proceso de espesamiento, adición del bioacelerador (tierra negra), dosificación nutritiva (NPK) y finalmente a una digestión anaerobia mesófila, al cual, se le realizó un estudio mediante un diseño completamente aleatorio (DCA).

El análisis de resultados se divide en tres componentes: (1) el monitoreo de la temperatura y pH como parámetros del proceso de digestión anaerobia mesófila, (2) los parámetros de relación SV/ST que determinan la estabilización del biosólido y (3) el estudio de los coliformes y metales pesados que determinan el reúso potencial del biosólido.

Con lo cual se concluyó que la adición de un bioacelerador optimiza el proceso de digestión anaerobia mesófila ya que este redujo 33.5% de humedad, y con una dosificación nutritiva (NPK) acelera el tiempo de estabilización. Obteniendo así un biosólido clase A, el cual se estabilizó en 7 días y redujo el 99.3% de coliformes totales.

ABSTRACT

The purpose of the treatment of domestic sewage water, is to remove all harmful pollutants that are contained in an effluent, causing formation of raw sludge which has characteristics of hazardous waste. Taking into account that if the domestic residual sludge is subjected to a stabilization process, it is possible to reuse it for agricultural purposes, retrieval of eroded soil, fertilizers, among others.

The present titration work was carried out in the months of October and December 2017, in which the biological sludge from the treatment plant of domestic sewage water, Vacuumtruck Services S.A., was used. Located in the province of Francisco de Orellana. The biological sludge was subjected to a thickening process, bio accelerator addition (black earth), nutrient dosage (NPK) and finally to a mesophilic anaerobic digestion, to which a study was carried out by means of a completely randomized design (DCA).

The analysis of results is divided into three components: (1) temperature and pH follow ups, as guidelines for the mesophilic anaerobic digestion process; (2) the SV / ST ratio criteria that determine the biosolid stabilization and (3) the study of coliforms and heavy metals that resolve a potential reuse of biosolids.

In which was concluded that the addition of a bio accelerator optimizes the mesophilic anaerobic digestion process since it reduced 33.5% humidity, and with a nutrient dosage (NPK), accelerates the stabilization time. Obtaining a biosolid class A, which was stabilized in 7 days and reduced 99.3% of total coliforms.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Alcance.....	4
1.3. Justificación.....	4
1.4. Hipótesis.....	5
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Aguas residuales: Generación y Problemática.....	6
2.1.1. Generación de aguas residuales.....	6
2.1.2. Problemática de las aguas residuales.....	10
2.2. Producción de lodos residuales.....	11
2.2.1. Tratamiento de los lodos provenientes de las PTARs.....	14
2.3. Procesos de estabilización de lodos.....	15
2.4. Digestión Anaerobia.....	17
3. METODOLOGÍA.....	21
3.1. Caracterización del área de estudio.....	21
3.1.1. Localización del área de estudio.....	21
3.1.2. Toma de muestra.....	22
3.1.3. Ubicación geográfica del punto de muestreo.....	22
3.2. Tratamiento de la muestra.....	25
3.2.1. Espesamiento.....	25
3.3. Valoración física, química y microbiológica del lodo residual.....	26
3.3.1. Análisis físico y químico del lodo.....	27
3.3.1.1. Medición del pH y temperatura del lodo.....	27
3.3.1.2. Medición de Sólidos Totales.....	28

3.3.1.3. Medición de Sólidos Volátiles.....	29
3.3.1.4. Medición de Metales Pesados.....	29
3.3.1.5. Medición de Macronutrientes.....	30
3.3.1.6. Conductividad.....	30
3.3.2. Análisis microbiológico.....	31
3.4. Diseño experimental completamente aleatorio.....	32
3.5. Digestión anaerobia mesófila.....	34
3.6. Dosificación nutritiva.....	35
3.7. Monitoreo de la experimentación.....	36
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	36
4.1. Espesamiento del lodo.....	36
4.2. Caracterización inicial del lodo 4.....	39
4.2.1. Humedad.....	40
4.2.2. Relación de Temperatura y pH.....	41
4.2.3. Sólidos Totales.....	42
4.2.4. Metales.....	42
4.2.5. Nutrientes.....	42
4.2.6. Coliformes totales y Huevos de Helmintos.....	43
4.3. Condiciones de estabilización.....	43
4.3.1. Temperatura y pH.....	43
4.3.2. Sólidos Totales y Sólidos Volátiles.....	52
4.3.3. Reúso de biosólido.....	56
4.3.3.1. Análisis microbiológico del lodo.....	56
4.3.3.2. Metales Pesados.....	58
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	59
5.1. Conclusiones.....	59
5.2. Recomendaciones.....	61
REFERENCIAS.....	62
ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de agua residual, en función a su procedencia.....	7
Figura 2. Esquema de un tratamiento de aguas residual y formación de lodos.....	12
Figura 3. Ubicación geográfica de la empresa VTS.....	22
Figura 4. Fotografías de las instalaciones de tratamiento de Vacuumtruck Services S.A.....	23
Figura 5. Recolección del lodo biológico de la PTAR.....	24
Figura 6. Espesamiento por conos del lodo biológico.....	26
Figura 7. Diagrama de proceso de espesamiento.....	27
Figura 8. Medición de temperatura y pH en el laboratorio LQ5 de la Universidad de las Américas.....	28
Figura 9. Detector de conductividad.....	30
Figura 10. Análisis microbiológico, metodología placas 3M™ Petrifilm™.....	32
Figura 11. Funcionamiento del tratamiento en función a la digestión anaerobia en el proceso de estabilización del lodo residual domestico.....	35
Figura 12. Resultados obtenidos en el proceso de espesamiento del lodo residual doméstico.....	37
Figura 13. Balance de masa.....	38
Figura 14. Cantidad de Humedad registrada.....	41
Figura 15. Tiempo de medición en [días] de la temperatura de los 5 tratamientos sometidos a una digestión anaerobia.....	44
Figura 16. Tiempo de medición en [días] del pH de los 5 tratamientos sometidos a una digestión anaerobia.....	48
Figura 17. Interacción de la temperatura vs pH.....	51
Figura 18. Representación de los sólidos totales respecto al tiempo referente a cada tratamiento realizado.....	52
Figura 19. Representación de los sólidos volátiles respecto al tiempo referente a cada tratamiento realizado.....	53

Figura 20. Tiempo de medición en [días] del coeficiente (SV/ST) de estabilización para los 5 tratamientos sometidos a una digestión anaerobia	54
Figura 21. Conteo inicial y final de coliformes totales.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición típica de un agua residual doméstica, las cuales son valoradas en g/L, a excepción de los Sólidos sedimentables que se los mide en ml/L y el pH que es adimensional.....	7
Tabla 2. Dosis adecuada de ingesta de agua al día por habitante.....	8
Tabla 3. Características y Problemáticas de las aguas residuales domésticas.....	10
Tabla 4. Características de lodos primarios y secundarios, con una valoración promedio \pm desviación estándar.....	13
Tabla 5. Caracterización de un lodo.....	15
Tabla 6. Diferentes tratamientos de estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales.....	16
Tabla 7. Factores para una estabilización anaerobia óptima.....	19
Tabla 8. Coordenadas del punto de recolección de lodo biológico.....	24
Tabla 9. Factores del DCA.....	33
Tabla 10. DCA, tratamientos de espesamiento de lodos y dosificación nutritiva.....	33
Tabla 11. DCA, optimización de dosificación nutritiva.....	34
Tabla 12. Características físicoquímicas y microbiológicas iniciales del lodo secundario respecto a valores típicos del mismo.....	39
Tabla 13. Características de temperaturas típicas de un tratamiento de digestión anaerobia Mesófila, respecto al rango de temperatura obtenido en todo el tiempo de experimentación (28 días) con los tratamientos de menor y mayor temperatura registrados.....	44
Tabla 14. Características de la dosificación nutritiva respecto a los tratamientos A, B, C, D y E en la estabilización de los lodos biológicos mediante la digestión anaerobia mesófila.....	45
Tabla 15. Análisis de temperatura a partir de ANOVA.....	46

Tabla 16. Análisis Tukey, comparación entre grupos de temperatura.....	46
Tabla 17. Análisis del pH a partir de ANOVA.....	49
Tabla 18. Análisis Tukey, comparación entre grupos de pH.....	49
Tabla 19. Análisis de SV/ST a partir de ANOVA.....	55
Tabla 20. Análisis Tukey, comparación entre grupos de SV/ST.....	56
Tabla 21. Resultados de análisis de huevos de helmintos.....	58
Tabla 22. Eficiencia de remoción de metales pesados con el tratamiento E....	58

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Según Yang (2009) el objetivo principal de un tratamiento de aguas residuales domésticas, es remover todo contaminante perjudicial que se encuentre contenido en un efluente, con la finalidad de hacerlo idóneos para su reutilización o evitar la contaminación al medio ambiente. Existen varios tipos de tratamientos utilizados para la depuración de aguas residuales domésticas, que en su mayoría consisten en las siguientes etapas: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, desinfección y tratamiento de lodos (Juan, 2013, p.1120). Es importante destacar que, el tratamiento secundario es la etapa que incluye fases biológicas, en las que los microorganismos son los responsables de degradar los contaminantes disueltos en el agua (Morales, 2005). Como lo menciona García (2006, p.57-59) una de las técnicas biológicas más utilizada para el tratamiento de aguas residuales domésticas es el tratamiento por lodos activados; no obstante, tratar el agua residual conlleva a que se formen grandes cantidades de lodos, tanto en las etapas de tratamiento primario y secundario. Estos lodos contienen compuestos orgánicos en estado líquido, sólido o semisólido que se forman durante los procesos mecánicos, biológicos y/o químicos realizados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (Mahamud, Gutierrez y Sastre, 2011).

Alrededor del mundo, el destino final de estos lodos residuales son los rellenos sanitarios y la incineración, procesos que resultan nocivos para el medio ambiente y promueven un mal aprovechamiento de la capacidad de reutilización de éstos (Lozada, Rodríguez, Barba, Moran y Narváez, 2014, p.12). Los lodos biológicos contienen un alto contenido de nutrientes como: nitrógeno, fósforo y materia orgánica (Valdéz, Ramos, Franco, Flores y Dendoven, 2008, p.1102-

1103). Lo que abre la posibilidad de su reutilización como abono o fertilizante en suelos agrícolas y forestales, creando una alternativa renovable importante a nivel mundial (Salcedo, Antonio, Laksmy, Zamora y Hernández, 2007, p.32). Teniendo en cuenta que la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2015) notifica que existe una demanda de abono, la cual está en crecimiento y la perspectiva para el 2018 es de un aproximado de 200,5 millones de toneladas de abono, lo que representa un 25% más que la demanda registrada en 2008; resultaría en una escasez de este producto, que se podría contrarrestar con el compostaje de los biosólidos.

El programa HABITAT de las Naciones Unidas (United Nations Human Settlements Programme UN-HABITAT) y la Comisión Canadiense, declararon en el 2008 que los países en vías de desarrollo no prestan atención a los aspectos económicos, tecnológicos ni políticos en referencia al tratamiento de lodos residuales, a diferencia de los países desarrollados; mismos que tienen un plan de manejo y optimización de estos residuos; por ejemplo: la Unión Europea de los 9 MMt (millones de toneladas métricas) por año de lodos residuales que genera, emplea un 45% en la agricultura, 23% para generación térmica, 18% a disposición en rellenos sanitarios y 14% en actividades de compostaje (Remis y Espinosa, 2012). De igual manera, Zagal (2012, p.754-761) redacta que los Estados Unidos posee plantas modernas para el tratamiento de aguas residuales, las cuales estabilizan y reducen el volumen de los lodos, obteniendo 7,2 millones de toneladas por año de lodos residuales, de los cuales destinan: 49% a la agricultura, 45% es dispuesto en rellenos sanitarios y 6% a otros fines. En América Latina, Brasil dispone el 45% de sus lodos en rellenos sanitarios, 5,6% en la agricultura y el 49,4% tiene una aplicación desconocida.

En cuanto a las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales, un gran porcentaje de las ciudades no las posee, por lo cual, las aguas servidas son descargadas a los ríos (Yang, 2010, p.32). En Ecuador, solo el 8% de aguas

negras tienen algún tipo de tratamiento; al ser un país en vías de desarrollo, no cuenta con la capacidad física, política y económica para la instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales a nivel de país (Cabrera, Garcés y Paredes, 2012). Moreno (2010) ya lo dijo, que este problema existe en la ciudad de Quito, ya que las aguas residuales domésticas son transportadas por medio de las alcantarillas a los cuerpos hídricos más cercanos a la ciudad; un claro ejemplo de ello es la contaminación suscitada en el río Machángara, mismo que no tiene presencia de vida acuática y emana malos olores a las poblaciones más cercanas.

El Ministerio del Ambiente (2013) declara que es muy común que los lodos producidos en el tratamiento de las aguas residuales tengan como destino final los rellenos sanitarios, siendo la opción menos favorable para el medio ambiente, ya que este es propenso a generar una proliferación de microorganismos patógenos, los cuales alteran toda actividad microbiana ya existente en estos rellenos. Al estabilizar los lodos, estos pueden ser reutilizados en agricultura, recuperación de suelos contaminados y en elaboración de fertilizantes y compostaje (Sepulveda, 2011). Con lo cual, nos indica Scholz (2006) que una estabilización de los lodos biológicos genera una reducción del 70% al 90% aproximado del volumen inicial, lo que conlleva a que exista una reducción de la fermentación de materia orgánica, eliminación de microorganismos y la eliminación de malos olores que afectan a la salud pública.

Salcedo (2007, p.102) señala que entre las tecnologías más utilizadas para la estabilización de lodos residuales provenientes de las plantas de tratamiento a nivel mundial se pueden mencionar a: la digestión anaerobia, la digestión aerobia, la estabilización con cal, el tratamiento térmico y el compostaje. Siendo los más usados, la digestión aerobia y la digestión anaerobia por los resultados alentadores que se ha obtenido con ellas (Turios, 2010).

1.2. Alcance

La presente investigación radica en la estabilización de lodos biológicos procedentes de una planta de tratamiento de agua residuales domésticas, a través de una digestión anaerobia, con el fin de evitar: la putrefacción, contaminación de fuentes acuíferas, erosión del suelo, generación de un volumen excesivo de lodos residuales; y, de esta manera propiciar un aprovechamiento de este biosólido como fertilizante, reduciendo el costo de la contratación de servicios externos para el tratamiento del lodo. Para esto, se ha realizado una estabilización de lodos biológicos por medio de una digestión anaerobia a escala laboratorio, en la que se ha controlado los parámetros establecidos en la metodología y en la que se ha tratado un volumen de 100 litros de lodo residual.

1.3. Justificación

Se ha mencionado previamente que las plantas de tratamiento de aguas residuales conciben una gran cantidad de lodos, los cuales, al no ser estabilizados, son una fuente potencial de contaminación al medio ambiente y un peligro para la salud pública. Sin embargo, existen múltiples beneficios a través de la estabilización de lodos, logrando su reutilización en actividades como: compost, fertilizantes, mejoradores de suelo contaminado y una fuente generadora de biogás (Medina et al., 2009; García, 2006, p. 61).

Un ejemplo a escala nacional es el tratamiento de aguas residuales domésticas, realizado por la empresa Vacuumtruck Services S.A. Este proceso genera una gran cantidad de lodos provenientes de la planta de tratamiento, lo que resulta en un gasto excesivo para la empresa, ya que esta empresa debe contratar compañías externas para la recolección de sus lodos; mismos que no se

encuentran estabilizados. Además, al generar un volumen exorbitante de lodos a la semana, que no puede ser tratado, se procede a almacenarlo temporalmente, propagando así malos olores y contaminación al suelo, hasta su posterior recolección. Es por ello que este estudio pretende brindar una solución a los problemas que existen por la falta de tratamiento a lodos crudos, por medio de la revisión de estándares en una digestión anaerobia.

1.4. Hipótesis

- El proceso de digestión anaerobia aplicado en lodos biológicos permitirá reducir significativamente su volumen y masa.
- El proceso de digestión anaerobia aplicado en lodos biológicos no permitirá reducir significativamente su volumen y masa.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

- Determinar las condiciones de estabilización de los lodos biológicos de la empresa Vacuumtruck Services S.A. durante el tratamiento de sus aguas residuales domésticas.

1.5.2. Objetivos específicos

- Implementar un proceso de digestión anaeróbico en los lodos residuales.
- Caracterizar el lodo biológico antes y después del proceso de estabilización.
- Verificar la eficiencia del proceso de estabilización de lodos mediante estudios fisicoquímicos y microbiológicos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Aguas residuales: Generación y Problemática

2.1.1. Generación de aguas residuales

Romero (2005, p.17) indica que las aguas residuales son la consecuencia de la utilización de este recurso para distintos fines, como resultado de este uso, el agua recoge materias en suspensión y disueltas que cambian sus propiedades: físicas, químicas y microbiológicas naturales. Dependiendo de la procedencia del agua residual, como se resume en la figura 1, estas presentan características muy variables, en especial, entre las aguas residuales domésticas, y las aguas residuales industriales (Greenberg y Eaton, 2010, p.26-27).

Aguas residuales domésticas	Aguas blancas	Aguas residuales industriales	Aguas residuales agrícolas
<ul style="list-style-type: none"> • Desechos orgánicos de los seres humanos, del aseo personal, procedentes de la cocina y de la limpieza de los hogares. 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedencia atmosférica (lluvia, nieve o hielo) o del riego y limpieza de calles, parques y lugares públicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resultantes de las labores agrícolas en las zonas rurales

Figura 1. Tipos de agua residual, en función a su procedencia.

Adaptado de Toranco, 2009.

Como Maintainer (2003) ya lo dijo, que cual sea su procedencia, las aguas residuales generan una amenaza para el medio ambiente, ya que modifican las características iniciales del medio natural donde se promueve su descarga. El nivel de esta amenaza depende de sus propiedades, es decir, de su composición como se indica en la tabla 1 y su cantidad. Por lo tanto, antes de elegir un método de tratamiento, primero se debe determinar todas las características del agua residual a tratar (Wang, 2012, p.79).

Tabla 1

Composición típica de un agua residual doméstica, las cuales son valoradas en g/L, a excepción de los Sólidos sedimentables que se los mide en ml/L y el pH que es adimensional.

COMPOSICIÓN	GRADOS DE CONTAMINACIÓN		
	Fuerte	Media	Débil
Sólidos totales	1000	500	200
Sólidos totales fijos	300	150	80
Sólidos totales volátiles	700	350	120
Sólidos en suspensión	500	300	100

Sólidos en suspensión fijos	100	50	30
Sólidos en suspensión volátiles	400	250	70
Sólidos disueltos	500	200	100
Sólidos disueltos fijos	200	100	50
Sólidos disueltos volátiles	300	100	50
Sólidos sedimentables	250	180	40
Sólidos sedimentables fijos	150	108	24
Sólidos sedimentables volátiles	100	72	16
DBO ₅	400	220	110
DQO	1000	500	250
COT	290	160	80
N total	86	50	25
N orgánico	35	20	10
NH ⁺⁴	50	30	15
NO ⁺³	0,4	0,2	0,1
NO ₂	0,1	0,05	0
P total	15	8	4
P orgánico	5	3	1
P inorgánico	10	5	3
pH	06 --09	06--09	06--09
Grasas y aceites	150	100	50

Adaptado de Romero, 2004, p.20.

Según Barba (2002, p.142) el ser humano necesita en promedio 5 litros de agua por día para poder subsistir. Sin embargo, en el año 2014 se llevó acabo el 1er Simposio de Hidratación en el Ciclo Vital, el cual establece las cantidades apropiadas para cada ser humano dependiendo la edad y el género (CAS-UDD, 2014), como se lo indica a continuación.

Tabla 2

Dosis adecuada de ingesta de agua al día por habitante.

Edad	USA Y Canadá (IoM 2004)	Europa (2) (EFSA 2010)	Mundo (WHO 2003,2005)
1-2 años	1.3 L/d	1.1 – 1.2 L/d	1 L/d

2-3 años	1.3 L/d		1.3 L/d		1 L/d	
4-8 años	1.7 L/d		1.6 L/d		Mujeres 2.2 L/d	Hombres 2.9 L/d
9-13 Años	Niñas 2.1 L/d	Niños 2.4 L/d	Niñas 1.9 L/d	Niños 2.1 L/d	Mujeres 2.2 L/d	Hombres 2.9 L/d
14-18 Años	Niñas 2.3 L/d	Niños 3.3 L/d	Mujeres 2 L/d	Hombres 2.5 L/d	Mujeres 2.2 L/d	Hombres 2.9 L/d
Mayores de 18 años	Mujeres 2.7 L/d	Hombres 3.7 L/d	Mujeres 2 L/d	Hombres 2.5 L/d	Mujeres 2.2 L/d	Hombres 2.9 L/d

Adaptada de CAS-UDD, 2014.

Según Jurado (2004) la cantidad de agua requerida para una persona también depende del clima y de la altitud, ya que lugares de clima húmedo o caliente, provocan una mayor deshidratación al cuerpo, generando que las personas de estos lugares consuman mayor cantidad de agua, de igual manera las personas que se encuentran a más de 2.500 metros de altura, deben consumir más líquido puesto que el organismo genera mayor cantidad de orina y la respiración se acelera por la falta de oxígeno. La OMS (Organización Mundial de la Salud) declara que existe un consumo aproximado de 20 litros de agua al día por persona, para satisfacer las necesidades alimenticias e higiene personal (ONU-SAES, 2015, p.8)

Las aguas residuales domésticas contienen un gran porcentaje de, deyecciones sólidas y líquidas que son compuesto de naturaleza reductora, por lo que consumirán oxígeno, y pueden estar presente de forma coloidal o disuelta (Poyatos, 2005).

Lattanzio (2013) alude, que en Latinoamérica el 80% de la población vive en grandes ciudades; sin embargo, estas poblaciones en su mayoría se encuentran cercanas a fuentes acuíferas contaminadas. Es importante considerar que América Latina alberga un tercio del agua disponible a nivel mundial, por lo que la contaminación en estos cuerpos hídricos representa una gran consecuencia ecológica adversa (Batista, 2013). En promedio, el 70% de las aguas residuales son tratadas en países que tienen un ingreso económico alto; no obstante, los países que tienen un ingreso económico medio alto caen bruscamente al 38% en el tratamiento de sus aguas residuales y un 28% en países con ingresos económicos medio bajo, sin mencionar que los países con ingresos bajos solo dan un 8% de tratamiento a sus aguas residuales (UNESCO, 2017).

2.1.2. Problemática de las aguas residuales

Según menciona Alabama (2009), las aguas residuales domésticas, debido a la gran cantidad de sustancias tóxicas y microorganismos que portan, pueden ser causa y vehículo de contaminación. Con lo cual, estas aguas residuales domésticas, al no contar con un previo tratamiento, afectan la calidad de los ecosistemas acuáticos y ocasionan un riesgo a la salud pública (Vigeras, Zafra, García, Martínez y Pérez, 2014, p. 294). En la siguiente tabla, se indican las características de un agua residual doméstica en función al índice de la problemática que genera cada una de ellas.

Tabla 3

Características y Problemáticas de las aguas residuales domésticas

CARACTERÍSTICAS	PROBLEMA	DESCRIPCIÓN	CONSECUENCIA
-----------------	----------	-------------	--------------

FÍSICAS	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Mal olor 	<ul style="list-style-type: none"> • Altas y bajas • Amoníaco, sulfuro, escatol, mercaptanos 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de O.D. • Problemas a las vías respiratorias
QUÍMICAS	<ul style="list-style-type: none"> • Materia orgánica • Materia inorgánica • Agentes tenso activos 	<ul style="list-style-type: none"> • Hidratos de carbonos, proteínas, grasas • Cloruros, sulfuros y fosforo de sodio • Sulfatos de alquilo lineales 	<ul style="list-style-type: none"> • Descomposición • Aglomeración • Disminuye la tensión superficial del agua
MICROBIOLÓGICAS	<ul style="list-style-type: none"> • Bacterias entéricas • Bacterias enteropatógenas • Parásitos 	<ul style="list-style-type: none"> • Bacterias • Bacterias • Parásitos 	<ul style="list-style-type: none"> • Enfermedades • Enfermedades • Intoxicación

Adaptado de Garzón, 2011, p.57.

2.2. Producción de lodos residuales

Rios (2011) expuso como resultado de la eliminación de contaminantes del agua residual doméstica, obtenemos diferentes subproductos: basuras, arenas y lodos. En el tratamiento previo de las aguas residuales domésticas, se desarrollan las etapas de cribado y desarenado (Jiménez, 2012); el objetivo de estas etapas es eliminar los sólidos grandes que puedan deteriorar tuberías, bombas y otros equipos que se encuentran al interior de la planta de tratamiento (Massé, Talbot y Gilbert, 2012, p. 109). El subproducto más importante en el tratamiento de aguas residuales domésticas son los lodos residuales por el volumen y también por el tratamiento posterior que necesitan (Ramalho, 2014). Para poder utilizarlos, es necesario estabilizarlos y deshidratarlos para disminuir su volumen y la atracción de vectores (Rojas, 2005). La figura 2 presenta un diagrama de flujo de una PTAR típica para tratamiento de aguas residuales domésticas.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas

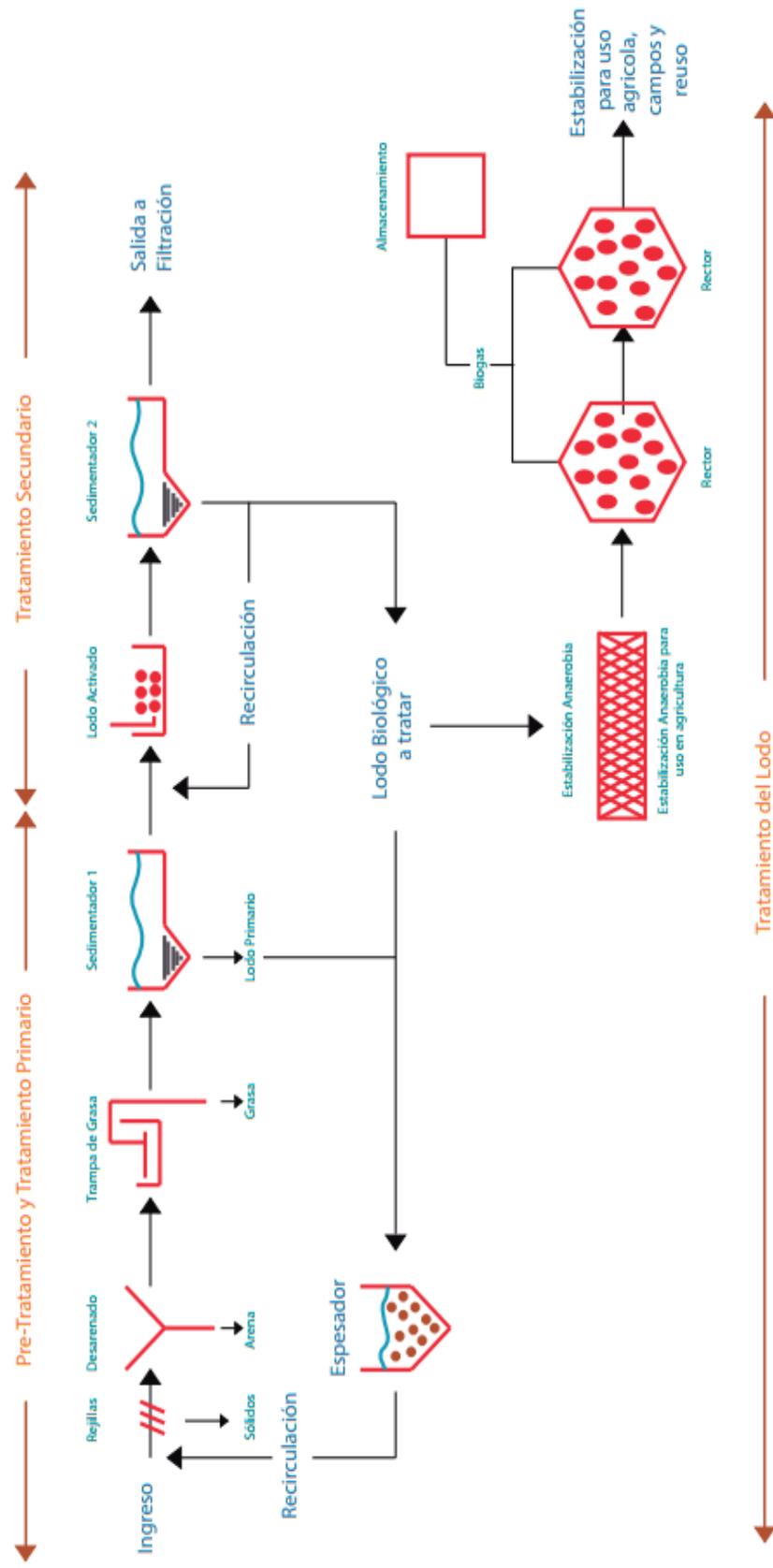


Figura 2. Esquema de un tratamiento de aguas residual y formación de lodos.

Adaptado de Milstein, 2004., Almeida, 2015 y Pacheco 2003

Los lodos primarios se originan en el sedimentador primario, en la cual se encarga de remover los sólidos sedimentables (Asrafuzzaman, Fakhruddin, y Hossain, 2011). La cantidad depende del tiempo hidráulico de retención o la carga superficial (Moreno, Ortiz, y Restrepo, 2014). Un tratamiento químico produce un volumen mayor de lodos, que es producto de una mayor eliminación y de la precipitación química de la materia coloidal (Varilla y Díaz, 2008).

Por otro lado, Poon y Wang (2001) explican que los lodos secundarios se producen en procesos de tratamiento biológicos que convierten los residuos o substratos solubles en biomasa. También es incluida la materia particulada que perdura en el agua después de la sedimentación primaria y que se agrega en dicha biomasa (Nova, 2008). La producción depende de varias causas: eficiencia del tratamiento primario, relación de SST a DBO, cantidad de sustrato soluble, remoción de nutrientes y criterios de diseño del tratamiento (Martín, López, y Monteagudo, 2009). Asimismo, los lodos secundarios se producen en los reactores biológicos y se sedimentan o separan del agua en los sedimentadores secundarios (Sustarsic, 2009). A continuación, en la tabla 4, se presenta una comparación entre las características de un lodo primario y un lodo secundario de un agua doméstica.

Tabla 4

Características de lodos primarios y secundarios, con una valoración promedio \pm desviación estándar.

Parámetro	Lodo primario	Lodo secundario
Sólidos totales (%)	4.99 \pm 0.65	7.14 \pm 1.08
Sólidos volátiles (%)	51.99 \pm 3.13	67.92 \pm 3.85
Carbono (%)	22.28 \pm 2.48	24.04 \pm 1.96
Nitrógeno (%)	2.72 \pm 0.48	7.02 \pm 0.66
Relación C/N	8.86 \pm 1.13	3.64 \pm 0.29
Alcalinidad parcial (mgCaCO ₃ /L)	195 \pm 59	756 \pm 83

Alcalinidad Total (mgCaCO ₃ /L)	960 ± 152	3002 ± 699
Alcalinidad intermedia (mgCaCO ₃ /L)	765 ± 152	2246 ± 616
pH	6.05 ± 0.27	6.50 ± 0.20
Remoción de SV (%)	20.64 ± 0.53	24.79 ± 0.23
Producción de metano (LCH ₄ /gSV adicionado)	0.19 ± 0.01	0.19 ± 0.01

Adaptado de Guerrero, Peláez, y Molina, 2015.

Explicación: es sencillo apreciar que el lodo secundario tiene parámetros de mayor incremento como el porcentaje de nitrógeno el cual es fundamental para emplearlo a una digestión anaerobia.

2.2.1. Tratamiento de los lodos provenientes de las PTARs

En su mayoría los lodos biológicos contienen una gran cantidad de microorganismos y materia orgánica que son favorables para una estabilización (Bacelo, Santos, y Botelho, 2016, p.74); a diferencia de los lodos provenientes de industrias, que contienen metales pesados, hidrocarburos, pesticidas entre otros contaminantes (Juanicó y Milstein, 2004). Composición que deriva en una estabilización más complicada de estos lodos, ya que se debe realizar tratamientos previos para la estabilización de este tipo de lodos peligrosos (Araque, 2006).

Se tiene en cuenta que los lodos son el residuo que se genera al realizar un tratamiento de aguas, el cual es el despojo con mayor volumen dentro de todo el tratamiento, ya que el 75% del agua tratada en las plantas se convierte en lodo residuales (Stamatelatos, 2012). En todo el tratamiento de las aguas residuales, se eliminan los contaminantes que son perjudiciales para el medio ambiente y para la salud de las poblaciones, en el caso del tratamiento de las aguas residuales domésticas son los coliformes y los huevos de helmitos; mientras que, en el tratamiento de aguas industriales son los metales pesados ya que son propensos a generar cáncer (Cain, 2010). Cabe mencionar que los metales pesados tienen la facilidad de acumularse en la mayoría de las cadenas tróficas

(Yang, 2010). Se debe tener en cuenta que los lodos residuales industriales son peligrosos y se los debe tratar con sumo cuidado (Jiménez, 2006).

Según Choy, Prasad, Wu, y Ramanan, (2015) la reutilización de los biosólidos provenientes de los lodos biológicos se encuentra limitada por la cantidad de microorganismos patógenos que estos contengan al finalizar la estabilización. De igual manera sucede con los metales pesados los cuales serán limitantes para la reutilización del biosólido (Wang, 2012). Por lo tanto, la Agencia de Protección Ambiental (2013) clasifica a los biosólidos en tres categorías como se aprecia a continuación en la tabla 5, según el contenido de microorganismos.

Tabla 5

Caracterización de un lodo

Clase	Bacterias	Parásitos
	Coliformes fecales (NMP/g)	Huevos de helminto, (huevos/g)
A	<1,000	<1
B	<1,000	<10
C	<2,000,000	<35

Adaptado de Araque, 2006.y EPA, 2013.

2.3. Procesos de estabilización de lodos

En general, Poyatos (2005) reafirma que los procesos de tratamiento de lodos permiten una reducción del volumen del biosólido a tratar, eliminando así gran cantidad agua e incrementando la concentración en sólidos. El objetivo principal es el aumento de la eficacia y la optimización económica de los procesos posteriores (Mahamud et al, 2011). Zagal (2012, p.342) señala que los

principales procesos de espesamiento son tres: espesamiento por gravedad, espesamiento por flotación y espesamiento mecánico.

Según Turios (2010), existen varios tratamientos como: la digestión anaerobia, digestión aerobia, tratamientos químicos, incineración, entre otros. En la Tabla 6, se presentan las técnicas antes mencionadas. De este grupo se conoce que existen dos técnicas, que son las más usadas para una estabilización de lodos activados, estas son: la digestión aerobia y la digestión anaerobia (Juanicó y Milstein, 2004). Para verificar que tratamiento es más efectivo a la hora de estabilizar y reducir los contaminantes presentes en el lodo activado se toma como referencia la cantidad de microorganismos patógenos presentes al finalizar el tratamiento, el pH del lodo, el porcentaje de sólidos totales y sólidos volátiles (Cain, 2010).

Tabla 6

Diferentes tratamientos de estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales.

ESTABILIZACIÓN	CARACTERÍSTICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
DIGESTIÓN ANAEROBIA	En todo el proceso existe ausencia de oxígeno molecular (O ₂), conforman dos grupos, en el primero se desprende ácidos volátiles lo que conlleva al segundo proceso el cual es la generación de gas metano por parte de las bacterias	-Fácil control y explotación -Riesgos operativos bajos (no inflamables) -Reducción de sólidos volátiles -Reducción de 90% de olores.	-Baja eficiencia en temperaturas bajas. -Resultados bajos en las unidades de secado. -Volúmenes mayores a tratar.
DIGESTIÓN AEROBIA	Proceso en presencia de oxígeno, lo cual genera el crecimiento	- Volumen menor del reactor.	- Proceso lento. -Control exhaustivo de

	de microorganismos aerobios, con la formación de la etapa de síntesis de las células y la de auto-oxidación	-Reducción de biomasa. -Reducción de patógenos. -Menor consumo energético. -Eliminación de olores.	los parámetros críticos.
TRATAMIENTO QUÍMICO	Es una acción bactericida la cual lleva a un bloqueo de la fermentación ácida	-Reducción elevada de patógenos. -Reducción de olor. -Método de respaldo para otros sistemas de estabilización.	-Control de pH para evitar reaparición de olores. -El ajuste de pH puede causar emisión de gases
INCINERACIÓN	Proceso de combustión con el cual se reduce la masa de la materia orgánica de los lodos, las cenizas constituidas únicamente por materias minerales del lodo.	-Tiempo. -reutilización del suelo.	-Costos altos de tratamiento y transporte. -Emanación de gases tóxicos al ambiente.

Adaptado de Vigeras, 2014., Toranco, 2009., y Paredes, 2015.

2.4. Digestión anaerobia

Makkar (2003) señala que la digestión anaerobia es el tratamiento más utilizado a nivel mundial, ya que su proceso de estabilización nos permite reducir considerablemente los contaminantes en un tiempo aproximado de 30 días, dependiendo de la temperatura a la cual se someterá el lodo biológico al reactor

y, de la carga orgánica que contenga este. Las ventajas y desventajas de este tratamiento se mencionan a continuación:

- Las ventajas de la digestión anaerobia incluyen la reutilización de los lodos biológicos en plantaciones agrícolas, así como la reducción del volumen inicial del lodo aproximadamente en un 70% (Amorena, 1994). La generación de gas de metano puede ser utilizada como fuente de energía dentro de las instalaciones (WEF, 1992).
- Los inconvenientes que se presentan en la digestión anaerobia son: los costos altos en la adquisición de los equipos de digestión para el funcionamiento adecuado, la capacitación previa del personal para un manejo correcto de los equipos y de igual manera la limpieza de los reactores por acumulación de metales. Es necesario el control de los gases de liberación de metano, presencia de una digestión ácida en el reactor y finalmente un alto consumo de energía para establecer una temperatura óptima para el crecimiento (Lora, 2010).

Sin embargo, Garzón (2011) expresa que es importante considerar que, a menor temperatura, el tratamiento de los lodos tendrá un mayor tiempo de residencia. Este proceso de digestión anaerobia reduce la cantidad de microorganismos patógenos presentes en el lodo, por lo cual la Agencia de Protección Ambiental (EPA) la señala a esta como la tecnología más eficiente y recomendada para usarse en la estabilización los lodos (Kuchenrither, 1992).

En la digestión anaerobia es importante la temperatura a la cual se va a realizar la estabilización de los microorganismos que se encuentren en el lodo biológico, ya que, dependiendo de esta, va generar un creciente de microorganismos (Sastre, 2014).

Teniendo en consideración que Metcalf (2014) redacta que el crecimiento de los microorganismos benéficos se presenta a una determinada temperatura; por ejemplo: las bacterias termófilas proliferan a una temperatura aproximada de 50°C pero se tiene en consideración que a esta temperatura tan alta generará una mayor eliminación de los microorganismos patógenos, pero de igual manera de los microorganismos benéficos, por lo tanto siempre es recomendable estar en un promedio de 20°C para así poder tener una mejor estabilización, un que esto signifique un tiempo más en el reactor.

Yeow (2012) escribe que la digestión anaerobia propicia la producción de varias etapas que optimizan la estabilización del lodo residual biológicamente, con la finalidad de que los microorganismos puedan asimilar la materia orgánica con mayor facilidad; una de estas etapas fundamentales es la hidrólisis. La hidrólisis depende de la cantidad de materia orgánica presente en el lodo, permitiendo así una rápida asimilación de las proteínas por los microorganismos y así facilitar la estabilización dentro del reactor (Dries, 2003). Después de esta etapa, se produce la fermentación, donde los microorganismos generan gases como el CO₂ que le ayudan a una mayor aceleración de ácidos acéticos para un crecimiento estable (Yeow, 2012).

Considerando a la digestión anaerobia, para reducir la cantidad microbiana, se debe tomar en cuenta factores que optimicen la estabilización tales como la temperatura, volumen, humedad, mezcla, tiempo, pH y nutrientes (Afanador, 2010). Como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 7

Factores para una estabilización anaerobia óptima.

Factores	Características	Descripción
Temperatura	Rango de temperatura de:	

	<ul style="list-style-type: none"> • 10-30°C (psicrofila) • 20-50°C (mesófila) • 37-75°C (termófilas) 	En el tratamiento de la digestión anaerobia existen rangos de temperatura las cuales definen el tipo de microorganismos a proliferar.
Carga Volumétrica	$> VL = > T$	Es un factor que se tiene muy en cuenta al momento de la estabilización anaerobia por el volumen del lodo (VL) y el tiempo (T).
Humedad	Del 70% al 60%	El lodo a tratar debe tener una humedad del 60% para que la estabilización sea óptima y de esta manera también beneficia al costo de operación ya que se obtiene un lodo con menor volumen.
Mezcla	Antes del ingreso del reactor	Se debe tener en cuenta que el mezclado es un factor importante a realizar ya que se debe homogenizar completamente el sustrato nutritivo con el lodo crudo para que todas las bacterias benéficas reciban los nutrientes (Show, 2012).
Tiempo	De 20 - 25 días	Se tiene en cuenta que al realizar una digestión anaerobia mesófila es más estable para los microorganismos a diferencia de una termófila la cual es difícil controlar el crecimiento de los

		microorganismos (Szűcs et al., 2012).
pH	Entre 6.6 y 7.6	El cambio del pH sucede por la fase de acidogénesis y acetogénesis
Nutrientes	Nitrógeno Fosforo Potasio	Es importante saber que los lodos activados tienen una gran cantidad de fosforo y nitrógeno los cuales son indispensables para el crecimiento de los microorganismos; sin embargo, no es suficiente los nutrientes por lo cual se debe colocar en el reactor (Show, 2012). La falta de nutrientes en la estabilización del lodo genera un lodo inestable el cual tiene un mayor tiempo en estabilizarse (García, 2006).

Adaptado de Surroop, 2012., Show, 2012, p.17, García, 2006., Forster, 2003 y Wang, 2012.

3. METODOLOGÍA

3.1. Caracterización del área de estudio

3.1.1. Localización del área de estudio

El presente estudio se realizó en la empresa Vacuumtruck Services S.A., ubicada en la provincia de Francisco de Orellana, ciudad del Coca, km6^{1/2} vía a lago Agrio, situada en la región Amazónica y con una superficie de 146.3 km²; misma que se encuentra aproximadamente a 1 kilómetro del aeropuerto, el cual está en el centro urbano de la ciudad del Coca. En la figura 3 se presenta la ubicación del área de estudio.



Figura 3. Ubicación geográfica de la empresa VTS.

3.1.2. Toma de muestra

La recolección del lodo biológico se realizó en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de la empresa Vacuumtruck Services S.A. Dicha instalación de tratamiento se encuentra conformada por un tanque de almacenamiento, cribas de pretratamiento, un sedimentador primario

(tratamiento primario) y una piscina de lodos activos y un decantador secundario (tratamiento secundario). Los lodos residuales fueron muestreados al interior del sedimentador secundario de la PTAR.



Figura 4. Fotografías de las instalaciones de tratamiento de Vacuumtruck Services S.A.

(a) tanques de almacenamiento de las aguas residuales domésticas que llegan al campamento para su posterior tratamiento

(b) piscina de tratamiento físico y biológico.

De acuerdo a lo establecido por la norma técnica ecuatoriana NTE INEN-ISO 5667, se procedió a recolectar un total de 94,5 litros de lodos biológicos en 5 recipientes plásticos, cada uno de 5 galones, como se indica en la imagen 2; mismos que fueron sometidos a una serie de análisis físicos, químicos y microbiológicos, estos se encuentran detallados en el apartado 3.3. Valoración física, química y microbiológica del lodo residual.

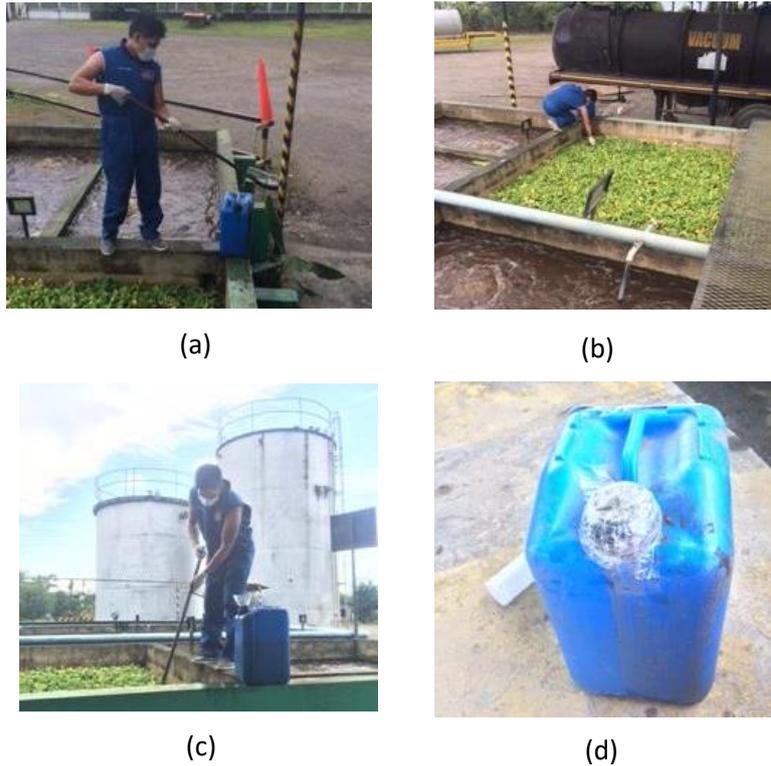


Figura 5. Recolección del lodo biológico de la PTAR.

- (a) recolección de lodo residual
- (b) profundidad de 1.5m a la cual fue tomado el lodo biológico
- (c) proceso de almacenamiento
- (d) almacenamiento lodo residual.

3.1.3. Ubicación geográfica del punto de muestreo

Como se mencionó anteriormente, el punto de muestreo de lodos residuales, fue al interior del sedimentador secundario. A continuación, se indica en la tabla 8, las coordenadas geográficas obtenidas con un GPS.

Tabla 8
Coordenadas del punto de recolección de lodo biológico.

SEDIMENTADOR SECUNDARIO	
Punto	Ubicación geográfica
P1	S 00°04'17.5" W 078°35'35.3"

3.2. Tratamiento de la muestra

3.2.1. Espesamiento

Los lodos residuales domésticos, se caracterizan por tener concentraciones superiores al 90% de agua y escasa cantidad de sólidos en su composición final (Scholz, 2006). Por esta razón, se hace necesaria la realización de un tratamiento previo de espesamiento de este material; logrando así la disminución de su volumen entre un 30% y 80% (Díaz, 2015, p.6), proceso que generará un menor costo en su tratamiento y disposición final (Hara, 2009).

Dentro de las instalaciones de la empresa Vacuumtruck Services S.A., se procedió a realizar un pre-espesamiento de lodo biológico (Lodo 1) por gravedad, a través de la utilización de columnas de sedimentación. El volumen inicial de 94.5 litros de lodo biológico pasó a 25 litros de lodo (Lodo 2) listo para su posterior traslado, a las instalaciones del laboratorio de la Universidad de las Américas.

En el laboratorio se realizó una vez más un espesamiento por gravedad del lodo pre-espesado (Lodo 2), a través de la utilización de un sistema de conos Imhoff, como se observa en la imagen 3, para obtener una mayor cantidad de sólidos totales y reducir así la muestra de 25 litros a 20 litros de lodo biológico (Lodo 3).



Figura 6. Espesamiento por conos del lodo biológico.

- (a) implementación del sistema de conos Imhoff y colocación del lodo
- (b) espesamiento por gravedad con la visualización de la separación del lodo sedimentado.

Posteriormente se realizó un filtrado con papel filtro de celulosa al lodo espesado (Lodo 3), resultando en una reducción de 20 litros a 7 litros lodo (Lodo 4) más espeso. Finalmente, a este lodo espeso (Lodo 4) se lo mezcló con tierra negra (Lodo 5) para conseguir la muestra de lodo final. Cabe destacar que, la tierra negra fue utilizada como un bioespesante y bioacelerador que permite la concentración de la carga orgánica para generar un sistema estable en el digestor (Show, 2012, p.330). A continuación, se presenta en la figura 7, el proceso de espesamiento del lodo biológico.

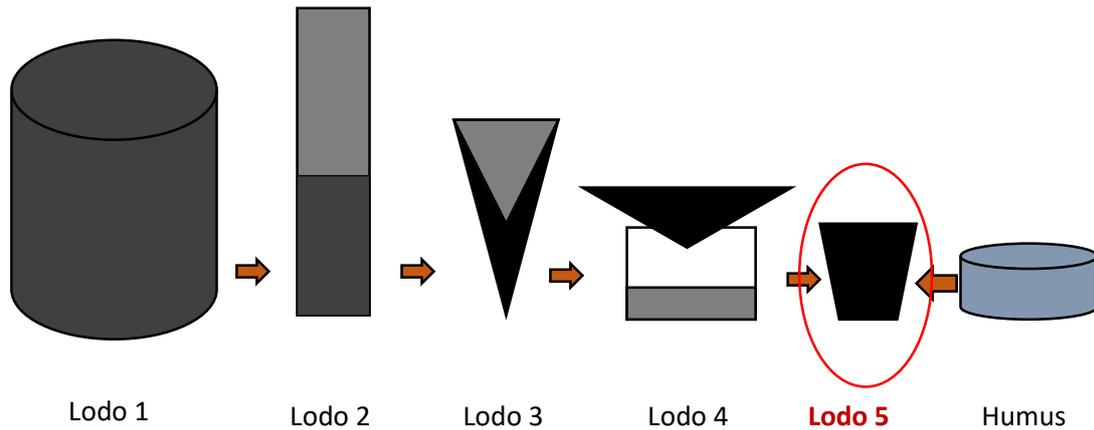


Figura 7. Diagrama de proceso de espesamiento.

3.3. Valoración física, química y microbiológica del lodo residual

3.3.1. Análisis físicos y químicos del lodo

Estos análisis se realizaron para caracterizar previamente la muestra de lodo biológico, durante la digestión anaerobia y, finalmente al terminar el proceso de estabilización. A continuación, se indica las diferentes mediciones realizadas para el control del lodo.

3.3.1.1. Medición de pH y temperatura del lodo

Se realizaron mediciones semanales de pH y temperatura, utilizando el equipo potenciómetro de mesa, marca HANNA Instruments, modelos HI 99127. Previo al análisis de la muestra se verificó que el equipo este calibrado. Asimismo, antes de usarlo y entre medidas se enjuagó el electrodo con agua destilada para evitar la presencia de cualquier impureza.



(a)



(b)

Figura 8. Medición de temperatura y pH en el laboratorio LQ5 de la Universidad de las Américas.

3.3.1.2. Medición de Sólidos Totales (ST)

Se realizó una vez cada semana para determinar los sólidos totales en el lodo, para lo cual se utilizará 10 g de lodo y posteriormente se lo someterá a un secado (estufa) a 105°C la cual tendrá una duración dentro de la estufa de 24 horas. Con la siguiente formula

$$\text{Sólidos Totales (\%)} = \frac{b-c}{a-c} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

a= masa del lodo inicial + cápsula

b= masa del lodo seco + cápsula

c= masa de la cápsula

3.3.1.3. Medición de sólidos Volátiles (SV)

Para obtener el contenido de sólidos volátiles (SV) mediante gravimetría, se colocó la cápsula con lodo seco proveniente del método 2.6.2, en una mufla (Snol E5CN) a una temperatura de 550°C, por 2 horas (calcinación). Una vez fría la cápsula se la volvió a pesar (b) en una balanza analítica (Ohaus Adventurer). El contenido de SV, expresado en porcentaje se calculó con la siguiente fórmula:

$$\text{Sólidos volátiles (\%)} = \frac{a-b}{m} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

a= masa del residuo + cápsula antes de la calcinación

b= masa del residuo + cápsula después de la calcinación

m= masa del lodo inicial colocada en la cápsula previo al secado a 105°C

3.3.1.4. Medición de los metales pesados

Se realizó una medición del lodo 4 con la finalidad de obtener los parámetros iniciales de la concentración de los metales, para posteriormente realizar una comparación con los análisis realizados al mejor tratamiento obtenido en el DCA, los cuales se realizara en el laboratorio LASA.

3.3.1.5. Medición de macronutrientes

Se realizó una medición del lodo al inicio del tratamiento y otra medición al final con el mejor resultado que se obtenga de los tratamientos, los cuales se realizó en el laboratorio LASA que se encuentra certificada en análisis ambientales.

3.3.1.6. Conductividad

La conductividad es una medida indirecta de la cantidad de iones presentes en una solución acuosa; las cuales tienen la capacidad de llevar una corriente eléctrica (Eaton et al., 2012). Cabe resaltar que, para efectuar una medición adecuada, se sugiere que las temperaturas del agua sean referidas de 20 °C. El método consiste en realizar la medición directamente utilizando una celda de conductividad; con lo cual se utilizó nuevamente el equipo marca HANNA 34 *instruments* pero un electrodo diferente al del pH, destinado a la determinación de conductividad como lo indica la siguiente figura.

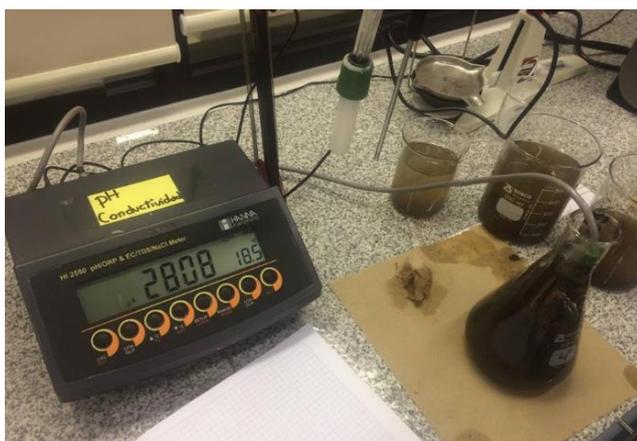


Figura 9. Detector de conductividad.

3.3.2. Análisis microbiológico

Para este análisis se tomaron dos referencias que son: los huevos de helmintos, los cuales se realizaron los análisis en la empresa EISMASTE con un análisis al inicio del lodo y posteriormente con el mejor tratamiento obtenido y análisis de los coliformes totales por el método Petrifilm™ la que se realizara una muestra con el lodo inicial y al final de la digestión anaerobia con todos los tratamientos realizados.

Para el conteo de coliformes totales se utilizó Placas 3M™ Petrifilm™. Estas placas están desarrolladas por un medio modificado de Violeta Bilis, el cual genera un medio gelificante que es soluble en agua fría, además contiene un indicador de tetrazolio, el cual proporciona una mejor enumeración de las colonias de coliformes. En el uso de los Petrifilm™, fue ineludible realizar una dilución a causa del color oscuro que presentaba el lodo.

Para la dilución se procedió a colocar 1 ml de lodo residual doméstico en 9 ml de agua peptonada la cual fue esterilizada con anterioridad. Posteriormente se procede a la incubación. Se coloca 1 ml de la solución realizada en el centro de la placa 3M™ Petrifilm™. Una vez incubadas las placas, se las ubicó en una cámara de incubación a 37°C durante 48 horas, para finalmente, realizar el conteo de las colonias de coliformes totales presentes en la placa. Este resultado fue multiplicado por 10 debido a la dilución preparada.



Figura 10. Análisis microbiológico, metodología placas 3M™ Petrifilm™.

3.4. Diseño experimental completamente aleatorio (DCA)

El presente trabajo de investigación ha considerado la realización de un modelo experimental, a través de un diseño completamente aleatorio (DCA), dado que todas las corridas experimentales han sido realizadas de manera aleatoria completa (Gutiérrez y De la Vara, 2008, p. 63).

La comparación de tratamientos propuesta, involucra 2 etapas que comprenden: la recopilación de datos iniciales mediante la realización de ensayos “testigos” y, la toma de datos de las variables respuestas obtenidas en los 2 tratamientos propuestos: espesamiento del lodo y dosificación nutritiva, cada uno con dos réplicas. Es importante destacar que, los factores constantes empleados en este diseño son el humus y la concentración de lodo residual proveniente de la empresa VTS (espesamiento de lodo residual); mientras que, la variable independiente es la dosificación nutritiva que corresponde al tratamiento complementario seleccionado, como se indica en la tabla 9.

Tabla 9

Factores del DCA.

FACTORES CONSTANTES	VARIABLE INDEPENDIENTE
Concentración de lodo residual (551.1 g)	Dosificación nutritiva
Concentración de tierra de humus (348.9 g)	

El diseño experimental se ha realizado como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 10

DCA, tratamientos de espesamiento de lodos y dosificación nutritiva.

Tratamiento	Reactor			Lodo (g)	Tierra (g)	Tratamiento
	R1	R2	R3			Complementario
Testigo	A1	A2	A3	551.1 g	-	-
1	B1	B2	B3	551.1 g	348.9 g	-
	C1	C2	C3			
2	D1	D2	D3	551.1 g	348.9 g	Dosificación nutritiva
	E1	E2	E3			

Para el mejoramiento del tratamiento complementario (dosificación nutritiva), se ha elaborado un diseño experimental adicional, el cual está enfocado en la optimización del proceso para así obtener un tratamiento con mayor eficiencia en el crecimiento microbiano benéfico. Este consistió en: 2 testigo, el cual nos brindará datos iniciales del lodo y 3 tratamientos que modificarán la dosificación

nutritiva inicial ya preestablecida, con el objetivo de obtener la mejor dosificación para el crecimiento de los microorganismos, como se aprecia a continuación.

Tabla 11

DCA, optimización de dosificación nutritiva.

Tratamiento	Muestra			Lodo (g)	Tierra (g)	Tipo de nutrición
	R1	R2	R3			
Testigo	A1	A2	A3	551.1 g	-	-
1	C1	C2	C3	551.1 g	348.9 g	Dosificación nutritiva inicial + (2.22%N)
2	D1	D2	D3	551.1 g	348.9 g	Dosificación nutritiva inicial + (1.37%P)
3	E1	E2	E3	551.1g	397.8 g	Dosificación nutritiva inicial + (0.16%K)

Tanto el peso de humus, como el peso del lodo residual, han sido calculados a través de un balance de masa para obtener los parámetros óptimos de estabilización del lodo.

3.5. Digestión anaerobia mesófila

Para el montaje de las unidades experimentales, se utilizaron 15 matraces Erlenmeyer de 1 L a manera de reactor, en el cual se colocó el lodo previamente espesado; finalmente, se sellaron los reactores con el fin de que se genere un ambiente anaerobio. Cada muestra espesada fue colocada en su propio reactor, excepto el reactor testigo el cual solo tendrá lodo. Los reactores mantuvieron un

tiempo de retención de 28 días calendario, en los cuales se colocó por única vez en el día uno el sustrato nutritivo a base de fosforo, nitrógeno y potasio.

La siguiente figura, nos presenta visualizar el esquema del tratamiento propuesto en este trabajo de titulación, para determinar el mejor tratamiento obtenido al finalizar los 28 días de experimentación.

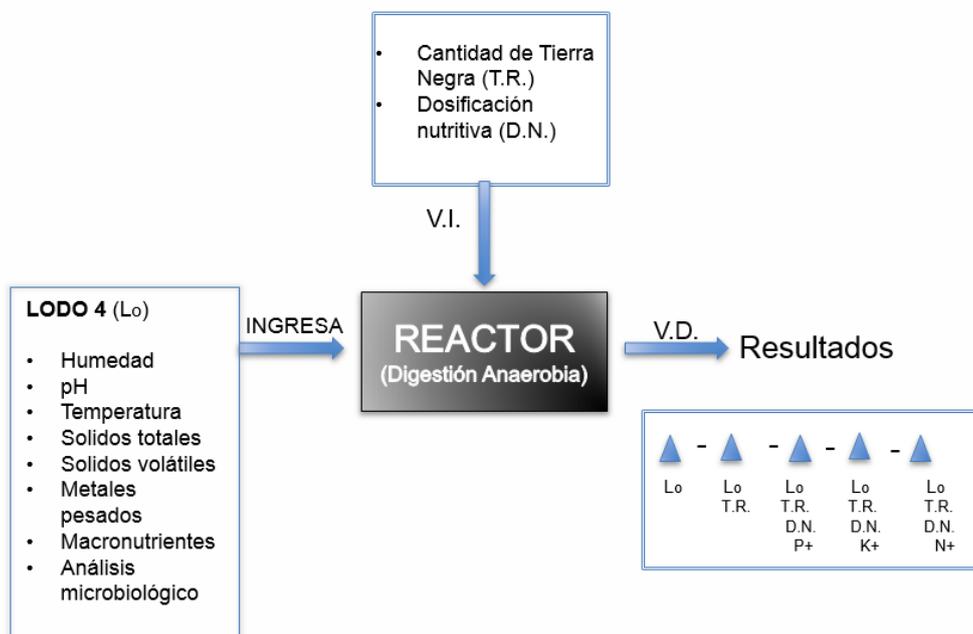


Figura 11. Funcionamiento del tratamiento en función a la digestión anaerobia en el proceso de estabilización del lodo residual doméstico.

3.6. Dosificación nutritiva

El tratamiento complementario de dosificación nutritiva, se realizó en base a diferentes concentraciones de nutrientes que son detallados a continuación:

- Muestra D1 y D2 (4.44% de nitrógeno, 1.35% fosforo y 0.16% potasio).
- Muestra E1 y E2 (2.22% de nitrógeno, 2.7% fosforo y 0.16% potasio).
- Muestra F1 y F2 (.22% de nitrógeno, 1.35% fosforo y 0.16% potasio).

3.7. Monitoreo de la Experimentación

Se procedió a recopilar los resultados obtenidos durante los 28 días de experimentación a escala laboratorio, cuyo procedimiento consistió en realizar un monitoreo cada 7 días, teniendo en consideración los siguientes parámetros: pH, temperatura, sólidos totales, sólidos volátiles, sólidos fijos, humedad, conductividad y coliformes totales. Sin embargo, al mejor DCA obtenido en el tratamiento, se realizó los análisis de metales pesados y huevos de helminto.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Espesamiento del lodo

El lodo residual fue sometido a varios procesos de espesamiento por gravedad, con la finalidad de reducir su porcentaje de humedad y volumen. Obteniendo como resultado un lodo 4 que se presenta a continuación.

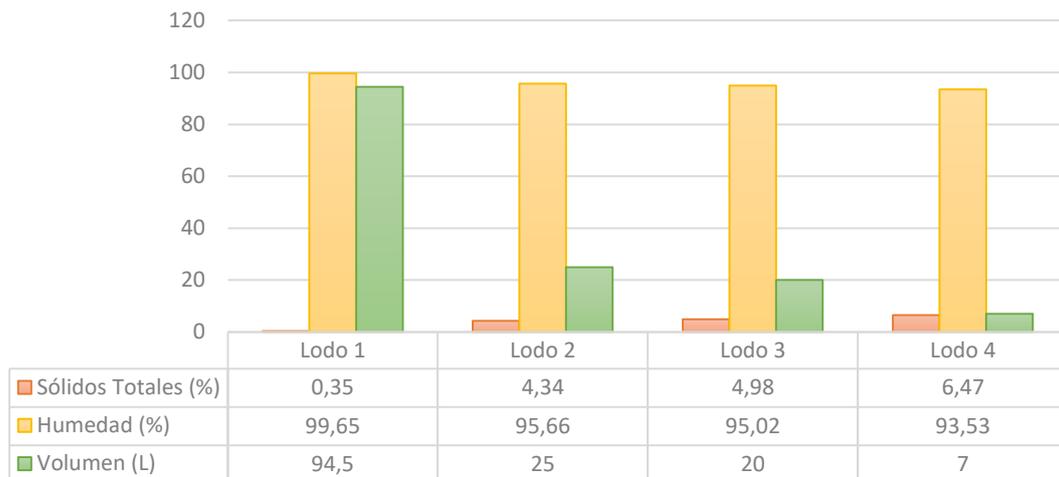


Figura 12. Resultados obtenidos en el proceso de espesamiento del lodo residual doméstico.

Explicación: Los diferentes tratamientos utilizados en el espesamiento, permiten la reducción del volumen, humedad y el aumento de los sólidos totales del lodo previo a la estabilización anaerobia. Teniendo en consideración que en la primera etapa se obtuvieron mejores resultados en la reducción volumétrica del lodo, ya que se utilizó torres de sedimentación.

En el proceso de espesamiento del lodo proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de la empresa VTS. Se determinó que de cada 94.5 L de lodo inicial, se obtuvieron 7 L de lodo deshidratado; es decir, se redujo el volumen del lodo al 7.4%, siendo un valor muy significativo en este pretratamiento, teniendo en cuenta que la empresa VTS tiene una producción de lodos de 757.08 L.d. Por tanto, después del proceso de espesamiento de la sección 3.2.1 se obtuvieron 56.06 L de lodo deshidratado. Optimizando el reactor anaerobio y reduciendo costos administrativos.

El lodo 4, después de haberlo sometido a varios tratamientos de espesamiento, contiene 6,46% de sólidos totales y 93,54 % de humedad, los cuales son

utilizados para la realización del balance de masa presentado a continuación en la figura 13, con la finalidad de obtener un lodo 5 con características preestablecidas idóneas para la realización de una digestión anaerobia.

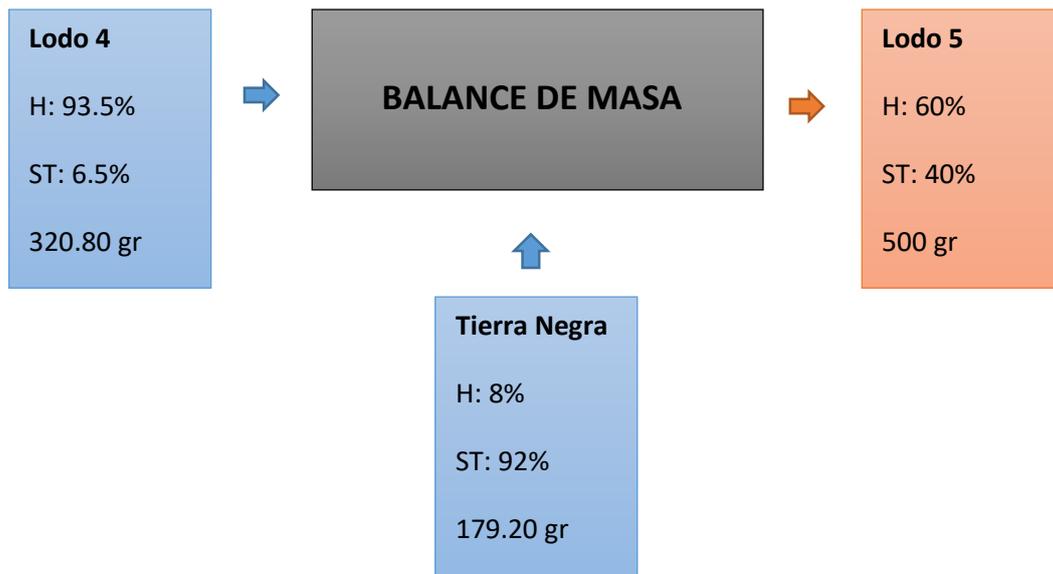


Figura 13.- Balance de masa.

En la obtención del lodo 5, se utilizó tierra negra como un bioacelerador y fuente de nutriente para los microorganismos, el cual por medio de la balanza de masa realizada, se obtuvo los valores en gramos a utilizar en nuestros respectivos reactores. Con la realización de un balance de masa entre el lodo 4 y tierra negra, se obtuvo una humedad del 60%, la cual fue usada para los tratamientos B, C, D y E, y con sus respectivas replicas, ya que previas investigaciones redactan mejores resultados de una estabilización por medio de la digestión anaerobia en lodos semi-secos, los cuales cuentan en un promedio de humedad entre 60% a 85% (National, 1996, p. 52). Es necesario tener en cuenta que un lodo no esté completamente seco ya que el agua permite una rápida circulación de microorganismos, nutrientes y los gases producidos en las reacciones digestivas (You, 2012, p. 330; Show, 2012, p. 331; Szűcs et al., 2012).

4.2. Caracterización inicial del lodo 4

A continuación, se indican los resultados alcanzados durante la caracterización inicial del lodo biológico obtenido de la PTAR. Los datos obtenidos en cada parámetro medido, se presentarán en gráficas con su respectivo análisis; los parámetros considerados son los siguientes: Humedad, Sólidos Totales (ST), Sólidos Totales Volátiles (STV), temperatura (T), pH, coliformes totales, huevos de helminto, Arsénico (As), Plomo (Pb), Cadmio (Cd), porcentaje de nitrógeno (N), porcentaje de potasio (K) y porcentaje de fósforo (P).

En primer lugar, se puede apreciar la tabla 12, el resumen de los valores alcanzados por el lodo residual en relación a los análisis fisicoquímicos y microbiológicos.

Tabla 12.

Características físicasquímicas y microbiológicas iniciales del lodo secundario respecto a valores típicos del mismo.

ANÁLISIS	CONCEPTO	UNIDAD	(LODO 4) SECUNDARIO ANALIZADO	(LODO TÍPICO) SECUNDARIO
FISICOQUÍMICO	Humedad	%	93.53	98.5-99.5
	pH	u. de pH	6.4	6.5-8
	Temperatura	°C	17.5	18-32
	Sólidos Totales	% de ST	6.5	0.83-1.16
	Sólidos Totales Volátiles	% de ST	4.39	59-88

Arsénico	As mg/kg	0.14	1.1-230
Plomo	Pb mg/kg	0.28	13-2600
Cadmio	Cd mg/kg	0.09	1-3410
Nitrógeno	N % de ST	3.36	2-6
Fósforo	P ₂ O ₅ % de ST	1.84	3-7
Potasio	K ₂ O % de ST	0.08	0.1-0.4
Coliformes Totales	NMP/g	12,560	200,000
MICROBIOLÓGICO			
Huevos de Helminto	Huevos/g	0	≤35

Adaptado de Limón, 2013., Metcalf, 2014. Wang, 2012, p.78

4.2.1. Humedad

La cantidad de humedad, en su mayoría depende del volumen del lodo. Un lodo secundario contiene un porcentaje de humedad entre el 98.5% y 99.5%, teniendo en consideración un valor típico de 99.2% de humedad (Metcalf & Eddy, 2003). A diferencia del valor obtenido en el lodo 4 el cual es de 93.53 % de humedad, se demostró que el proceso de pretratamiento al cual se le sometió espesamiento por gravedad si tuvo efecto en la reducción de la humedad, como se puede observar en la figura 14.

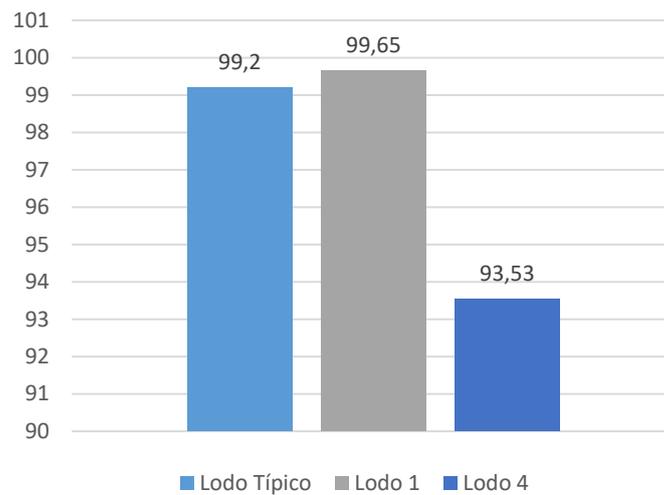


Figura 14. Cantidad de humedad registrada

Teniendo en consideración que para someter un lodo a un proceso de digestión anaerobia óptima este deberá contar con una humedad del 60% (Merki, 2012). Sin embargo, el porcentaje obtenido en el lodo 4 aún no es suficiente para poder ser sometido a una estabilización por digestión anaerobia.

4.2.2 Relación de Temperatura y pH

La temperatura del lodo residual inicial fue de 17.5°C; en contraste con la temperatura de un lodo secundario común, la cual varió entre los 18°C a 32°C, teniendo en consideración un valor típico de 22 °C. Se puede observar que la temperatura es inferior y esto puede deberse a que existe una alta actividad microbiana, los cuales están directamente relacionados con la temperatura y el pH, el cual registró una medición bajo el valor típico de un lodo secundario. Esto puede provocar que la degradación de la MO ocurra de manera más lenta.

4.2.3 Sólidos Totales

El resultado obtenido de sólidos totales es de 6.47% el cual se encuentra por encima de valor típico de un lodo secundario ya que este valor oscila entre 0.83% y 1.16% demostrando la eficiencia de un pre tratamiento de sedimentación por gravedad al cual se sometió previamente al lodo 1 para la obtención del lodo 4, provocando así una mayor consistencia en el sustrato (Palas, 2010).

4.2.4. Metales

Los resultados presentados en este apartado, están directamente relacionados con la calidad del agua residual, teniendo en cuenta que son aguas residuales domesticas no debería existir presencia de metales, sin embargo podemos observar que tenemos muy baja presencia de estos metales en los análisis realizados los cuales son: plomo 1.28 mg/l, cadmio 3.36 mg/l y arsénico 0.14 mg/l los cuales se encuentran muy por debajo de las medidas típicas mencionadas. Provocando así una mejor calidad en nuestro lodo 4 ya que permitiría el crecimiento normal de los microorganismo sin provocar daño a los lípidos de las proteínas de la membrana plásticas (Makkar, 2003).

4.2.5. Nutrientes

Está compuesta por tres macronutrientes los cuales son Nitrógeno (N), Fosforo (P) y Potasio (K) en los cuales los valores iniciales respectivamente son: del Nitrógeno es de 3.36%, Potasio 1.84% y Fosforo 0.08%; en contraste con los valores típicos de un lodo secundario de Nitrógeno al 4%, Potasio al 5% y Fosforo al 2%, se puede observar que los macronutrientes se encuentran muy

por debajo de los valores típicos; Moeller (2011), nos menciona que esto puede deberse a que existe muy poca materia orgánica y los microorganismos se encuentran en una base estacionaria. Esto puede provocar un incremento en el tiempo de estabilización del lodo secundario.

4.2.6. Coliformes Totales y Huevos de Helmintos

Los análisis realizados indican que no existen huevos de Helmintos en el lodo 4, obteniendo así una mejor calificación en el reusó del suelo al finalizar el tratamiento, a diferencia de los coliformes obtenidos en el análisis, el cual indica una presencia de 12,560 UFC, que se encuentra debajo de un valor típico de coliformes presentes en un lodo residual doméstico

4.3. Condiciones de Estabilización

4.3.1. Temperatura y pH

Los resultados obtenidos de temperatura y pH, desde la primera semana hasta la cuarta semana de tratamiento del lodo residual doméstico por medio de una digestión anaerobia pueden ser observados de manera individual o global desde la figura 15 hasta la figura 17.

López (2011), expresa que la temperatura en la digestión anaerobia es de suma importancia ya que es un factor que acelera o disminuye el crecimiento de bacterias benéficas. A continuación se presenta la figura 15, con las variaciones

de las temperaturas de los diferentes tratamientos en el transcurso de 28 días de experimentación.

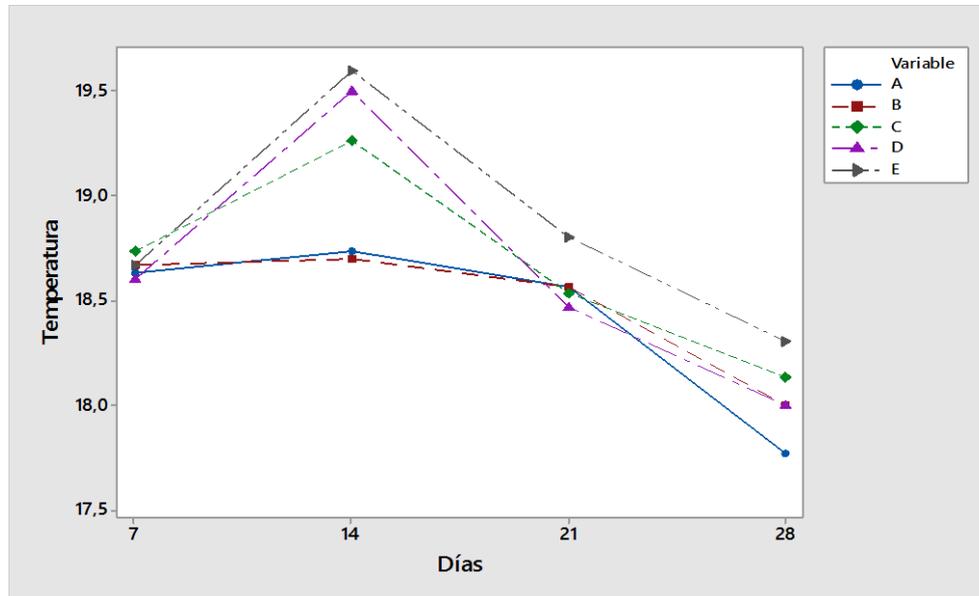


Figura 15. Tiempo de medición en [días] de la temperatura de los 5 tratamientos sometidos a una digestión anaerobia.

Entre los cinco tratamientos realizados se detalla un rango de temperatura entorno a las 4 semanas de tratamiento, el cual oscila entre el tratamiento A, el cual obtuvo la temperatura más bajo dentro de toda la expedientación de 17.77 °C y el tratamiento E que obtuvo la temperatura más alto a 19.6 °C. Con lo cual, la temperatura de operación se encontró en un rango de crecimiento mesófito como lo indica la siguiente tabla (Cabrera, 2014, p 33).

Tabla 13.

Características de temperaturas típicas de un tratamiento de digestión anaerobia Mesófito, respecto al rango de temperatura obtenido en todo el tiempo de experimentación (28 días) con los tratamientos de menor y mayor temperatura registrados.

DESCRIPCIÓN	RANGO DE TEMPERATURAS			TIEMPO DE RETENCIÓN (Días)
	Mínimo	Óptimo	Máximo	

Psicrofílicas	4	15	25	≥100
Mesofílicas	15	28	35	30-60
Termofílicas	25	50	75	10-16
Tratamiento A	17.77	28	18.73	28
Tratamiento E	18.31	28	19.6	28

Adaptado de Santianes, 2006.

Se puede observar en la figura 15 previamente presentada, que el tratamiento A y tratamiento B disminuye de manera general al alcanzar un pico máximo de temperatura en el día 21, llegando a 18.73 °C en el tratamiento A y 18.70 °C en el tratamiento B, indicado que el proceso de estabilización se prorroga a comparación de los tratamiento C, D y E, los cuales tienen su pico máximo de temperatura en el día 14, llegando a 19.27 °C en el tratamiento C, 19.50 °C en el tratamiento D y 19.60 °C en el tratamiento E. Teniendo en cuenta que el tratamiento A y B tienen una menor carga de nutrientes (NPK) a diferencia de los tratamientos C, D y E, los cuales tuvieron una dosificación nutritiva superior como lo representa la siguiente tabla 14. Al poseer un porcentaje mayor de nutriente los microorganismos aceleran su metabolismo, provocando un crecimiento en la población microbiana.

Tabla 14.

Características de la dosificación nutritiva respecto a los tratamientos A, B, C, D y E en la estabilización de los lodos biológicos mediante la digestión anaerobia mesófila.

TRATAMIENTO	DOSIFICACIÓN NUTRITIVA			
	Unidad	N	P	K
A	%	3.36	1.84	0.08
B	%	2.22	1.35	0.16
C	%	4.44	1.35	0.16
D	%	2.22	2.70	0.16
E	%	2.22	1.35	0.32

En la tabla 15 se muestra el análisis estadístico de la temperatura en los diferentes tratamientos. Según el análisis de la varianza, no existe una diferencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$) en cuanto a la temperatura entre los tratamientos, como se ve en la Figura 15. Esto se debe a que todos los tratamientos trabajaron bajo las mismas condiciones de temperatura, aproximadamente 18.5°C. Este equilibrio térmico se logró por el propio comportamiento de la digestión anaerobia. Además, se muestra que el coeficiente de variación es alto debido a que, al igual que el pH, la temperatura está relacionada a un proceso de degradación natural en función del tiempo, la variación del tratamiento E es mayor al resto.

Tabla 15

Análisis de temperatura a partir de ANOVA.

Análisis de varianza de los factores A; B; C; D; E						
Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor p	
		Ajust.	Ajust.			
Factor	4	0.4356	5.1089	0.45	0.773	No
Error	15	3.6342	0.2436			significativo
Total	19	4.0898				

Por lo tanto. Se realiza el método Tukey, en él se confirma que la temperatura no es significativa en los tratamiento A, B, C, D y E.

Tabla 16

Análisis Tukey, comparación entre grupos de temperatura

Factor	N	Media	Agrupación
A	4	18.843	A
B	4	18.667	A
C	4	18.642	A
D	4	18.483	A
E	4	18.425	A

Es importante expresar que en la digestión, la temperatura del lodo es un indicador directo del comportamiento del sistema y es esencial mantener la temperatura lo más constante posible, debido que los cambios bruscos de temperatura son perjudiciales para los sistemas anaeróbicos afectando el desempeño de las bacterias formadoras de metano y causando desequilibrio en la población microbiana (Show, 2012, pp. 326, 331; Surroop, 2012 p. 253).

La digestión anaerobia se basa en las reacciones bioquímicas. La cual consta de 4 etapas que son: etapa de hidrólisis, etapa acidogénica, etapa acetogénica y finalmente la etapa de metanogénica (Moreno, 2011, p.19). En cada una de las etapas se producen ácidos orgánicos que se manifiestan cambiando el pH del medio. Al terminar la fase de hidrólisis el pH comienza a disminuir para las fases de acidogénesis y acetogénesis, volviendo a aumentar gradualmente cuando las bacterias metanogénicas empiezan a trabajar (Surroop, 2012, pp. 252-253). Por lo tanto, el monitoreo del pH presentado en la figura 16, a lo largo de los 28 días de digestión, permite inferir que el proceso está siendo sometido a cambios bioquímicos generados por los microorganismos tanto del lodo residual como del bioacelerador (tierra de negra). Cabe recalcar que el comportamiento del pH, que se analiza a continuación, no son indicadores de estabilización del biosólido; al contrario demuestran que, en efecto, durante los 29 días de tratamiento se produjo un proceso de transformación bioquímico, que se traduce en la evolución del pH en el tiempo, lo que demuestra que no es un cambio espontáneo sino debido a un metabolismo microbiano (demostrado por la temperatura). A continuación se presenta la figura 16, la cual detalla el cambio registrado de pH durante la digestión anaerobia para los 5 tratamientos.

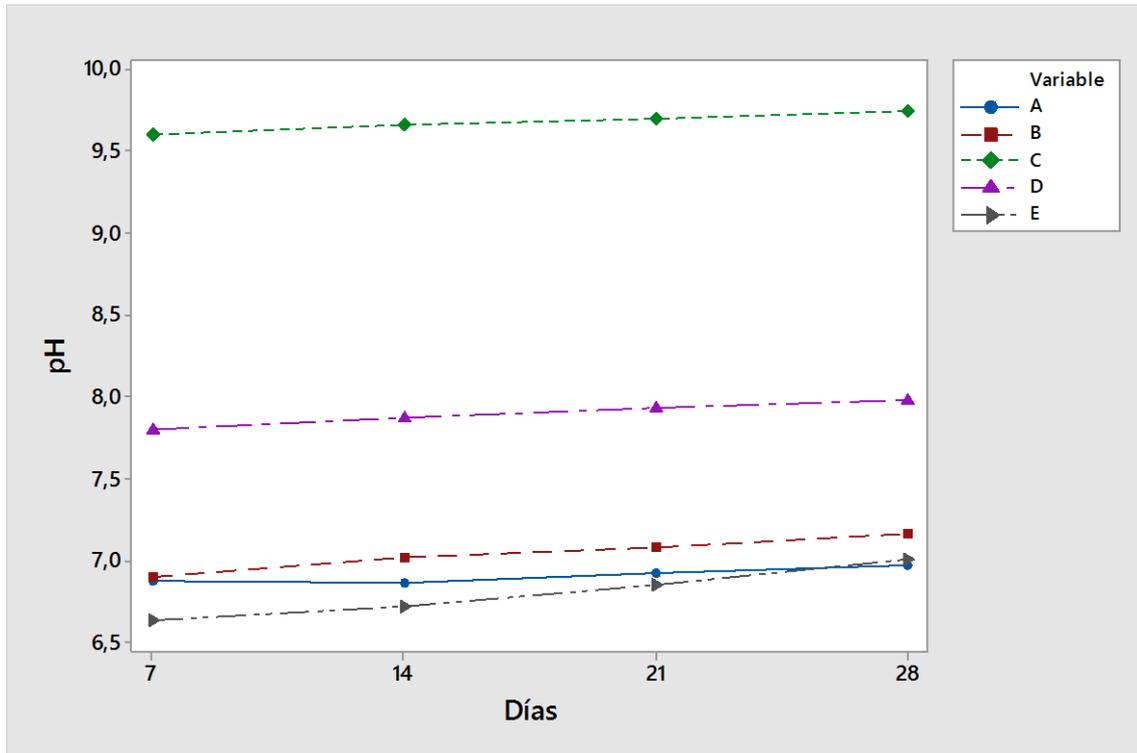


Figura 16. Tiempo de medición en [días] del pH de los 5 tratamientos sometidos a una digestión anaerobia.

Se puede observar que existe un decrecimiento en el tratamiento A del pH de 6.86 dentro de la segunda semana de tratamiento que ocurre por la producción de ácidos grasos y orgánicos, indicando que el proceso ha pasado por la hidrólisis y ha alcanzado la acidogénesis. Posteriormente empieza a incrementar el pH empezando la fase metanogénica produciendo metano a partir de los ácidos orgánicos degradados por las bacterias hasta llegar a pH máximo de 6.97 (Surroop, 2012, p.252; Aviles, 2011, p. 23).

Al contrario, los lodos B, C, D y E los cuales no sufren una disminución del pH, por lo que se puede decir que la fase de hidrólisis fue corta. Los tratamientos B, D y E llegan a un punto de estabilidad equivalente al pH neutro, lo que explica que ya no existe una producción de ácidos, pues el proceso de digestión ha finalizado.

Teniendo en cuenta que el tratamiento C, tuvo un incremento exorbitante del pH inicial, por una reacción química provocada por el suplemento de urea como se indica a continuación

En la Tabla 17, se presenta el análisis estadístico del pH para los tratamientos A, B, C, D y E. El pH está relacionado con un metabolismo de la degradación de la materia orgánica. Siendo esto un proceso no controlado, existe una variación significativa en relación al tiempo, demostrado con el coeficiente de variación. En el caso del pH existe una diferencia estadística ($p < 0.05$) entre los tratamientos. Esto quiere decir que los tratamientos C tuvieron una producción de pH (alcalina) no esperada, como se puede observar en la Figura 17 (c). Se debe a que el lodo C inició con un tratamiento de dosificación nutritiva de nitrógeno (urea), por esta razón las bacterias formadoras de metano fueron eliminadas.

Tabla 17

Análisis del pH a partir de ANOVA.

Análisis de varianza de los factores A; B; C; D; E						
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	
Factor	4	23.3363	5.83408	579.28	0.000	significativo
Error	15	0.1511	0.01007			
Total	19	23.4874				

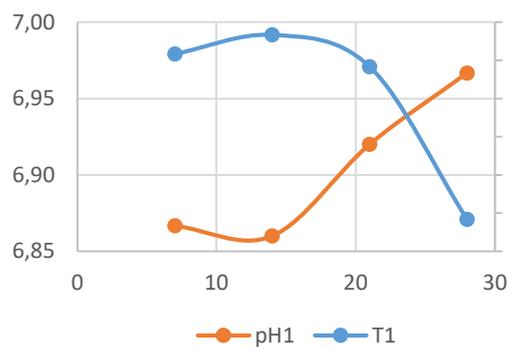
Por lo tanto. Se realiza el método Tukey, en él se confirma que la pH si es significativa en los tratamiento A, B, C, D y E.

Tabla 18

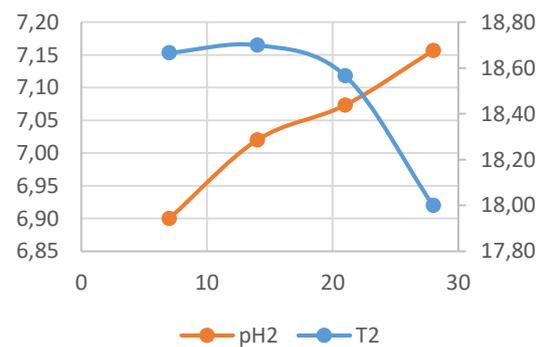
Análisis Tukey, comparación entre grupos de pH

Factor	N	Media	Agrupación
A	4	9.6792	A
B	4	7.8967	B
C	4	7.0375	C
D	4	6.9033	CD
E	4	6.7992	D

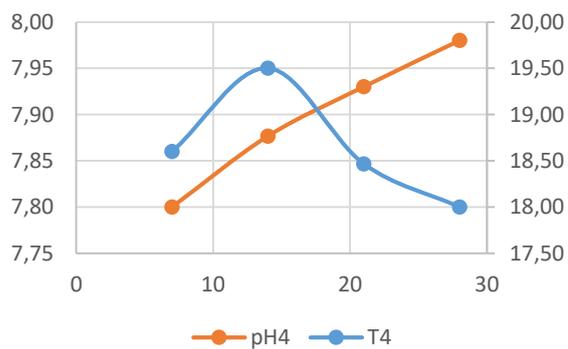
A continuación en la figura 17, se presenta un análisis de estabilización entre la temperatura obtenida en el transcurso de los 28 días y la variación del pH en toda la expedientación.



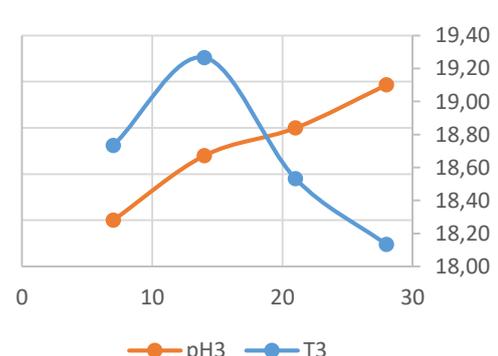
(a)



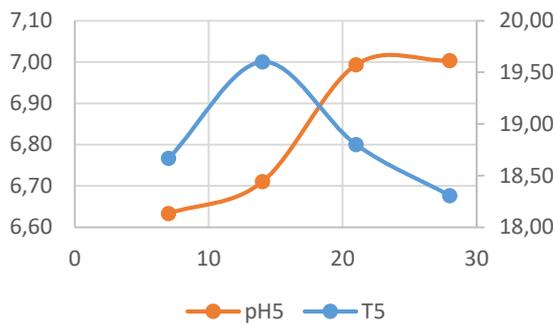
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 17. Interacción de la temperatura vs pH.

Como se observa en la figura 17, el punto máximo de temperatura para los 5 tratamientos se establece a los 14 días de experimentación sin embargo el tratamiento A y tratamiento B que fueron sometidos a una digestión anaerobia mesófila tienen un tiempo más prolongado en el decaimiento de la temperatura y de igual manera prolongando el tiempo de incremento del pH, obteniendo un cruce de variables a los 24 días de la experimentación, a diferencia de los demás tratamientos C, D y E, los cuales tienen una actividad más acelerada en función de la temperatura y pH, obteniendo el cruce de variables en el día 17. Comprobado así que existió mayor actividad microbiana en los tratamientos C, D y E. considerando que estos tratamientos fueron sometidos a una dosificación nutritiva mencionada anteriormente en el apartado 3.6, el cual aporta los nutrientes necesarios para una mayor actividad microbiana ya que se comprobó anteriormente que el lodo 4 no suplía con los parámetros de NPK establecidos es un lodo secundario típico.

Se puede concluir que el tratamiento con mayores resultados en esta etapa fue el tratamiento E ya que este presenta un crecimiento de temperatura y pH en menor tiempo que los demás tratamientos llegando a un pH de 7 siendo óptimo para el crecimiento de microorganismos.

4.3.2. Sólidos Totales y Sólidos Volátiles

A continuación, se presenta los resultados obtenidos durante 28 días de expedientación de sólidos totales en cada tratamiento A, B, C, D y E.

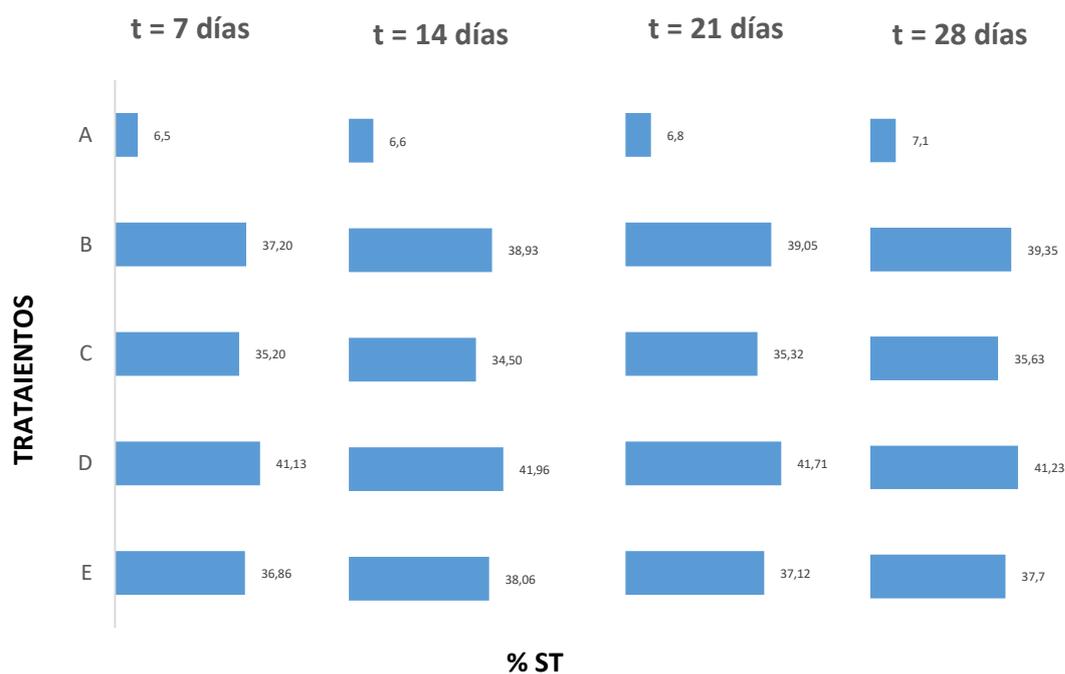


Figura 18. Representación de los sólidos totales respecto al tiempo referente a cada tratamiento realizado.

Como se observa en la figura 18 el tratamiento A, contiene el menor porcentaje de sólidos totales al finalizar los 28 días, con un valor de 7.1% ST, a comparación de los demás tratamientos los cuales cuentan con un mayor porcentaje de sólidos totales registrados en el transcurso de los 28 días de experimentación.

Los tratamientos B, C, D y E, fueron sometidos a un pre tratamiento de bioacelerador (tierra negra) el cual permitió que el lodo biológico se estabilice

antes de realizar la digestión anaerobia permitiendo así obtener mayor porcentaje de sólidos totales a diferencia del tratamiento A, el cual fue un lodo crudo. Existe el mismo análisis en la valoración de los resultados obtenidos respecto a los sólidos volátiles como se indica a continuación en la figura 19.

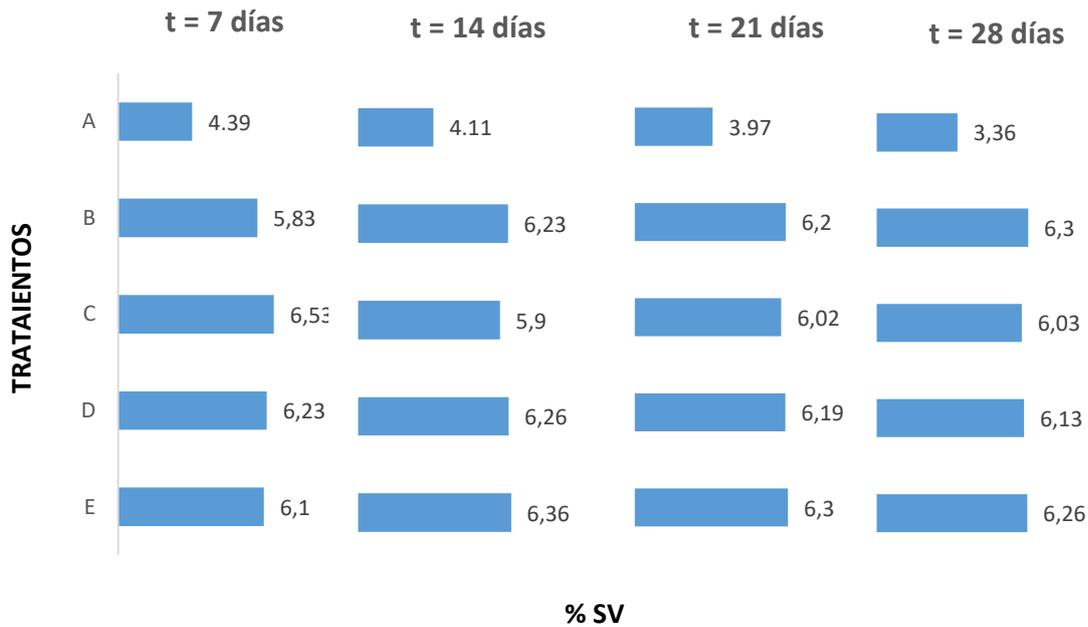


Figura 19. Representación de los sólidos volátiles respecto al tiempo referente a cada tratamiento realizado.

A su vez se presentan las relaciones entre sólidos volátiles y totales (SV/ST) como evidencia de la bioestabilización (Figura 20). Para que un lodo sea considerado estable, el coeficiente debe ser igual o menor a 0.6 (Wang, 2012). Entre menor sea su coeficiente, se lo considerará estable, pues éste sugiere que la materia orgánica ha sufrido procesos de biotransformación.

En la figura 20, se observa la relación entre los sólidos volátiles y sólidos totales en relación al tiempo experimental de 28 días para todos los tratamientos A, B, C, D y E.

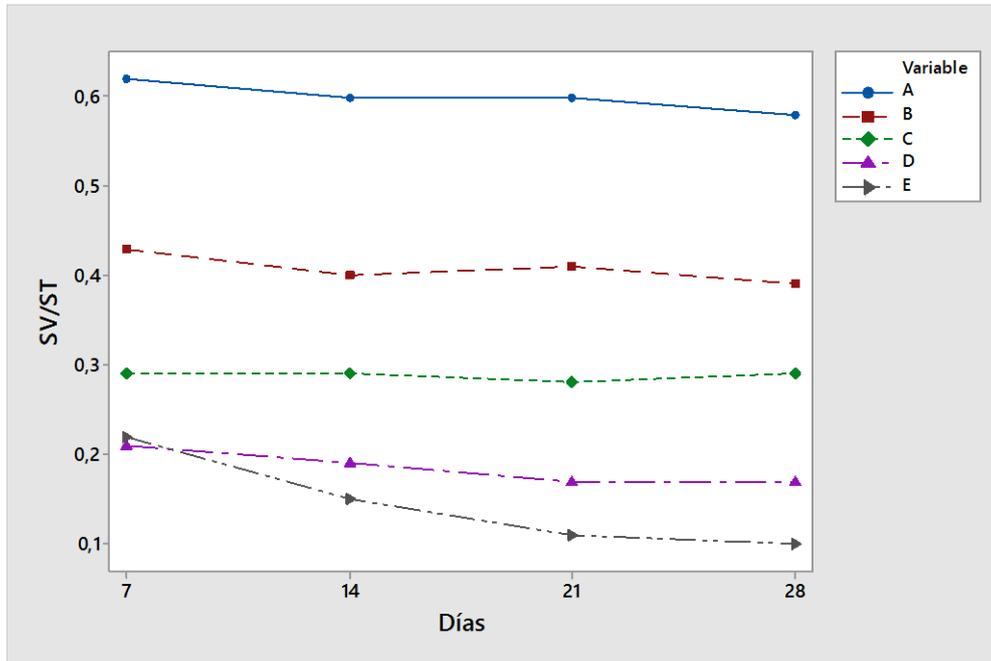


Figura 20. Tiempo de medición en [días] del coeficiente (SV/ST) de estabilización para los 5 tratamientos sometidos a una digestión anaerobia.

Los resultados obtenidos en la figura 20, demuestran que los tratamientos B, C, D y E, obtuvieron el coeficiente (SV/ST) por debajo del 0.6 a los 7 días, alcanzando así la estabilización. En comparación del tratamiento A, el cual consigue un coeficiente (SV/ST) por debajo del 0.6 al obtener un valor (SV/ST) de 0.58 a los 21 días, alcanzado así la estabilización. Por otro lado, se comprueba que la adición de tierra negra y la dosificación nutritiva si presenta un efecto positivo en la estabilización del lodo, pues los lodos que recibieron el bioacelerador (B, C, D y E) lograron la estabilización en un tiempo entre 7 días.

Los tratamientos C, D y E, los cuales tuvieron una dosificación nutritiva presentan mejores resultados a los 7 días de tratamiento, obteniendo en el tratamiento C un coeficiente (SV/ST) de estabilización del 0.28, el tratamiento D un coeficiente (SV/ST) de estabilización del 0.21 y el tratamiento E un coeficiente (SV/ST) de estabilización del 0.23. Al finalizar los 28 días de tratamiento, el lodo E obtuvo el

mejor porcentaje, obteniendo un coeficiente de estabilización del 0.14. La implementación de una dosificación nutritiva fue con la finalidad de acelerar el proceso metabólico de los microorganismos. Esto ocurre debido a que las bacterias necesitan la cantidad necesaria de nutrientes ya sean estos macro o micro nutrientes para desarrollarse (Show, 2012, p. 325). En la dosificación realizada se añadió nitrógeno, fósforo y potasio; con los cual el nitrógeno les ayuda a los microorganismos a simplificar los anillos de purina y pirimidina; el fosforo ayuda a los microorganismos a simplificar los ATP y los ácidos nucleicos y final mente el potasio ayuda a los microorganismos a mantener el balance osmótico (Wang, 2012, p.28).

Según el análisis de varianza el cual fue realizado con los datos de la Figura 20, da como resultado la tabla 19, la reducción del coeficiente SV/ST entre los cinco tratamientos es estadísticamente significativa ($p < 0.05$). La diferencia significativa entre todos los tratamientos se puede observar en la Figura 20; el tratamiento A tiene el promedio del coeficiente SV/ST más alto similar a la condición inicial lo cual es desfavorable para la estabilización del lodo. En el tratamiento B, en promedio, se obtuvo una estabilización de la relación SV/ST por debajo de 0.6 lo cual es favorable para la estabilización. Por último, los tratamientos C y D permitieron obtener las relaciones SV/ST más bajas en promedios cercanos a 0.2, tomando en cuenta las cuatro semanas de tratamiento.

Tabla 19

Análisis de SV/ST a partir de ANOVA.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p	
Factor	4	0.54335	0.135838	173.41	0.000	significativo
Error	15	0.01175	0.000783			
Total	19	0.55510				

Por lo tanto. Se realiza el método Tukey, en él se confirma que el coeficiente de estabilización (SV/ST) si es significativa en los tratamientos A, B, C, D y E.

Tabla 20

Análisis Tukey, comparación entre grupos de SV/ST.

Factor	N	Media	Agrupación
A	4	0.6600	A
B	4	0.40750	B
C	4	0.28750	C
D	4	0.18500	D
E	4	0.1450	D

4.3.3 Reúso del biosólido

Con los análisis previos realizados en el literal 4.3.2., se obtiene que se a realizado un proceso de estabilización del lodo biológico, mediante la digestión anaerobia mesófila. Se tiene presente que para la reutilización del biosólido, es importante conocer los limitantes que existen en nuestro lodo, los cuales dependen de la cantidad de coliformes totales y metales pesados presentes en el lodo.

4.3.3.1. Análisis microbiológico del lodo

La EPA clasifica a los biosólido en tres grupos A, B o C, dependiendo la concentración de microorganismos patógenos, como lo indica anteriormente en el apartado 2.2.1. Las aguas residuales domesticas contienen gran cantidad de microorganismos patógenos las cuales quedan encapsuladas en los lodos

residuales. A continuación, en la figura 21 se presenta los resultados obtenidos del conteo de coliformes totales.

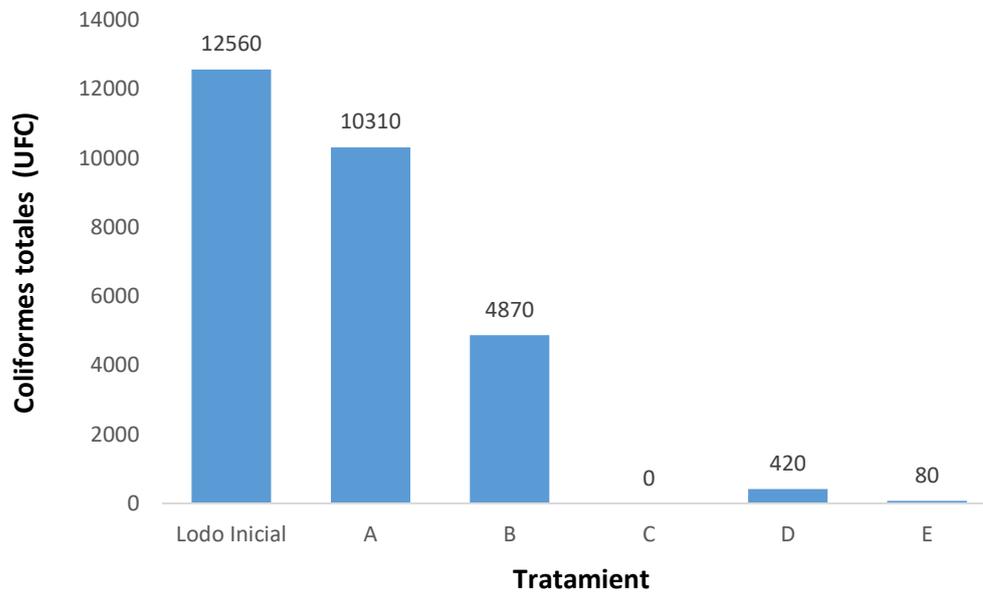


Figura 21. Conteo inicial y final de coliformes totales (UFC)

Como se puede observar en la figura 21, el tratamiento A presenta una ligera reducción en el número de coliformes siendo el testigo de los demás tratamientos realizados. Por otro lado, el tratamiento B demuestra que el bioacelerador (tierra negra) ayudada a la estabilización de los microorganismos reduciendo los patógenos (coliformes) perjudiciales para la reutilización del biosólido. A diferencia de los tratamientos D y E los cuales obtuvieron una reducción del 97% y 99.5% respectivamente de coliformes totales, siendo atribuida a la adición de la dosificación nutritiva en fósforo y potasio y clasificándolos en un lodo clase A. Sin embargo, el tratamiento C presentó reacciones químicas ya que la adición de urea provocó el aumento del pH de 6.4 a 9.3, provocando que el medio se extremadamente alcalino y reduciendo el crecimiento bacteriano ya sean benéficas o patógenas.

En cuanto a los huevos de helminto, como se puede ver en la Tabla 21, el lodo residual estudiado es libre de este parásito antes y después del proceso de estabilización.

Tabla 21

Resultados de análisis de huevos de helmintos

Descripción	Unidades	Huevos de helminto
Lodo inicial	HH/g	0
Tratamiento E	HH/g	0

4.3.3.2. Metales pesados

El análisis de los metales propuesto anteriormente en la sección 3.3.1.4. Se consideró a partir de que existen parámetros que clasifican si un lodo secundario es excelente o bueno.

La EPA ha determinado la cantidad máxima permisible para que un biosólido sea reutilizado (Dendooven, 2011). Con lo cual se presenta la siguiente tabla 22, en el que se puede observar al lodo inicial el cual ya es categorizado en una clase excelente por la baja concentración de los metales, sin embargo, el tratamiento E logro reducir estos porcentajes.

Tabla 22

Eficiencia de remoción de metales pesados con el tratamiento E.

Valores resultantes	Rango EPA
----------------------------	------------------

Metales pesados	Lodo inicial (lodo 4) (mg/kg)	Lodo del tratamiento E (mg/kg)	Excelentes (mg/kg)	Buenas (mg/kg)
Arsénico	0.14	0.01	17	41
Plomo	0.28	< 0.02	300	840
Cadmio	0.09	0.001	39	85

La remoción de metales pesados en la digestión anaerobia de los lodos tratados sucedió principalmente por adsorción, gracias a que se trata de un proceso biológico. Esto ocurre por la interacción entre la materia orgánica, los microorganismos y los metales, y en este caso, como se ha aumentado tierra negra y por lo tanto materia orgánica, se estimuló a una mejor remoción. Los metales pesados son absorbidos por los microorganismos por las proteínas en su materia celular, o por la interacción entre los iones del metal y la carga negativa de la superficie microbiana. Los iones metálicos también son complejados por el grupo carboxilo de los polisacáridos microbianos (Wang, 2012, p. 57).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se estableció que las condiciones de estabilización de los lodos biológicos, los cuales son producidos en el tratamiento de las aguas residuales domésticas para optimizar el proceso se utilizó un bioacelerador (tierra negra) con el cual se consiguió una humedad del 60% y a su vez, la adición de una dosificación nutritiva (Nitrógeno, Fosforo y Potasio).

Se implementó un Diseño Completamente Aleatorio (DCA), el cual consistió en la elaboración de cinco tratamientos, cada uno con sus dos respectivas réplicas. Del DCA se obtuvo, que el tratamiento E logró optimizar el proceso de estabilización, teniendo en consideración las condiciones apropiadas las cuales son: lodo 4 + bioacelerador (tierra negra) + dosificación nutritiva (Potasio). Considerando que estas condiciones generaron que el tratamiento E lograra una estabilización a los 7 días, teniendo presente que el tiempo esperado para una estabilización típica sea de 46 días. El biosólido proveniente del tratamiento E, se lo puede reutilizar en cultivos como; un excelente fertilizante, recuperación de suelos deforestados, relleno de quebradas. Teniendo en consideración que es un biosólido clase A y los resultados obtenidos de metales pesados arrojaron que se encuentra en una clasificación excelente.

Para identificar el progreso del tratamiento de la digestión anaerobia mesófila, al inicio del mismo se llevó a cabo la caracterización del lodo residual doméstico (lodo 4) a partir de métodos ya preestablecidos. Con lo cual se obtuvo un bajo contenido de sólidos totales (6.5%), un pH de 6.4, una humedad alta (93.53%) y una temperatura de 17.5°C. A más de, no presentar huevos de helminto y un conteo de coliformes totales de 12.560 UFC. Al finalizar el tratamiento de estabilización anaerobia, el lodo E, el cual fue el más óptimo en todo el tratamiento DCA presentó un pH de 7.01, una temperatura de 18.3°C, una humedad del 62.3% y un conteo de coliformes totales de 80 UFC.

Se verificó la eficiencia del proceso de estabilización mediante monitoreos realizados semanalmente de los parámetros de pH, temperatura, sólidos totales y sólidos volátiles en todos los tratamientos DCA. Y con la comparación del mejor tratamiento obtenido al finalizar el proyecto con respecto al lodo inicial (lodo 4) en los análisis de: microorganismos patógenos, metales pesados y macronutrientes.

En la estabilización del lodo biológico, se puede observar que la adición de un bioacelerador (tierra negra) es efectiva. Tomando en consideración que si influye la dosificación nutritiva porque genera un menor tiempo en la estabilización del lodo con lo cual disminuye la retención del lodo dentro del reactor. Por lo tanto, se considera en la dosificación nutritiva al Potasio (k) como la mejor opción, porque forma lodos más estables y en una velocidad mayor de sedimentación.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda implementar un mejor proceso de espesamiento del lodo a gran escala para reducir tiempos de sedimentación, con la implementación de un lecho de secado, filtro prensa, entre otros.

Para aplicar una óptima digestión anaerobia es importante que el pH inicial no esté por debajo de 6.5 y se pueda producir biogás. Teniendo presente que esto se lo puede realizar mediante soluciones buffers.

Es recomendable realizar mediciones de pH y temperatura cada 3 días para obtener mayores datos sobre la actividad microbiana y sin afectar la digestión anaerobia por la presencia de oxígeno al abrir los reactores.

REFERENCIAS

- Ahmed, M., Idris, A. y Omar, S. (2007). Physicochemical characterization of compost of the industrial tannery sludge. Recuperado el 21 de noviembre de 2017 de <http://industrial/10014.org/10.2166/wst.2014.469>
- Aktar, W. (2009). *Sewage Sludge Disposal - Land Application – Environmental Problems - An Overview. In Waste and Waste Management: Sewage Treatment: Uses, Processes and Impact*. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- Araque, M. (2006). Evaluación del tratamiento térmico alcalino en la desinfección del lodo generado en la PTAR El Salitre. Universidad de Los Ándes, Bogotá.
- Arboleda Ruales, R. P. (2012). Estudio de la sedimentabilidad de biosólidos en una planta de tratamiento de aguas residuales. Universidad San Francisco de Quito, Quito. Recuperado el 8 de octubre de 2017 de <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/1942>
- Ávila, L., Guerrón, M., Carolina, A., Flores, L. y Andrade, L. (2014). Programa para la Descontaminación de los Ríos de Quito. Recuperado el 4 de noviembre de 2017 de http://www.aguaquito.gob.ec/sites/default/files/documentos/programa_para_la_descontaminacion_de_rios_ene_2016.pdf
- Aviles, E. (2011). Determinación de la efectividad del proceso de lombricultura como tratamiento para la estabilización de Lodos Residuales provenientes de una Planta de Tratamiento de Aguas. Universidad

Politécnica Salesiana, Cuenca. Recuperado el 5 de diciembre de 2017 de <http://lodosresiduales/a144/tratamientos/hhst/wst.2017.pdf>

Bermeo, M. e Idrovo, E. (2014). Aprovechamiento de lodos deshidratados generados en plantas de tratamiento de agua potable y residual como agregado para materiales de construcción. Universidad de Cuenca, Cuenca. Recuperado el 1 de Agosto de 2017 de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/20868>

Bermúdez, R., Rodríguez, S., Martínez, M. y Terry, A. I. (2003). Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás. Tecnología Química. Recuperado el 18 de octubre de 2017 de <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223121549002.pdf>

Bueno, P., Díaz, M. J., Cabrera, F. (2008). Factores que afectan al proceso de compostaje. Recuperado el 1 de enero de 2018 de <http://digital.csic.es/handle/10261/20837>

Cain, G. D. (2010). *Sanitizing Sewage Sludge: The Intersection of Parasitology, Civil Engineering, and Public Health. Journal of Parasitology.* Recuperado el 8 de noviembre de 2017 de <http://www.journalofparasitology.org/doi/ab11s/10.1645/GE-2631.1?code=asp-site>

Castro, J. C. (2014). Determinación de hidrocarburos en lodos residuales del tanque de almacenamiento de lodos usados de Etapa EP., posterior al tratamiento con ECOSOIL, SPHAG SORB y Compostaje. Universidad del Azuay, Cuenca. Recuperado el 1 de diciembre de 2017 de <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/3699/1/10370.pdf>

- Chaudhari, A., Suryawanshi, P. y Kothari, R. (2012). Microbial Aspects of Anaerobic Digestion for Biogas Production. *In Environmental Science, Engineering and Technology: Anaerobic Digestion: Processes, Products and Applications*. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- Chavarro, M., Garces, J. P., Guerrero, J. y Salas, D. (2006). Evaluación de la tratabilidad de los lixiviados en el Relleno Sanitario de Pereira mediante filtros anaerobios de flujo ascendente a escala piloto. *Scientia et Technica*. Recuperado el 10 de octubre de 2017 de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10534/1/CD-6234.pdf>
- Castrejón, A., Barrios, J. A., Jiménez, B., Maya, C., Rodríguez, A. y González, A. (2000). Evaluación de la calidad de lodos residuales de México. Recuperado el 8 de octubre de 2017 de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaidis/mexico13/061.pdf>
- Chicón, L. (2000). Especiación de metales pesados en lodos de agua residual de origen urbano y aplicación de lodos como mejoradores de suelo. Málaga. Recuperado el 9 de diciembre de 2017 de <file:///C:/Users/aula/Downloads/Dialnet-TratamientosParaLaRemocionDeMetalesPesadosComunmen-5432290.pdf>
- Environmental Protection Agency. (2013). Biosolids Rule 503. *Land Application of Biosolids*. Recuperado el 12 de octubre de 2017 de http://water.epa.gov/scitech/wastetech/biosolids/upload/2002_06_28_mtb_biosolids_503pe_503pe_2.pdf
- Espinosa, M. y Campoverde, M. (2013). Evaluación del desempeño de los espesadores a gravedad de la planta de aguas residuales de Ucubamba. Universidad de Cuenca. Recuperado el 21 de diciembre de 2017 de <file:///C:/Users/aula/Downloads/Tesis.pdf>

Fixen, P. y West, F. (2002). Nitrogen Fertilizers: *Meeting Contemporary Challenges*. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. Recuperado el 3 de octubre de 2017 de <http://doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.169>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2008). *Long-term scenarios of livestock-crop-land use interactions in development*. Recuperado el 19 de diciembre de 2017 de <http://www.fao.org/docrep/W5146E/w5146e09.htm>

Forster, T., Fernández, M., García, M. P., García, L. R., Gallego, C. Á., & Sales, D. (2003). Diseño y optimización de la fase de arranque del proceso SEBAC en el tratamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. Recuperado el 5 de enero de 2018 de https://www.researchgate.net/profile/Tania_Forster-Carneiro/publication/253329455_Disenoyoptimizaciondelafase_dearranquedelproceso_SEBAC_eneltratamiento_delafraccionorganica_de_residuos_solidos_urbanos/links/02e7e51f850327b847000000/Diseno-y-optimizacion-de-la-fase-de-arranque-del-proceso-SEBAC-en-el-tratamiento-de-la-fraccion-organica-de-residuos-solidos-urbanos.pdf

Forster, T., Isaac, R., Pérez, M. y Schwartz, C. (2012). *Anaerobic Digestion: Pretreatments of Substrates In Biogas Production: Pretreatment Methods in Anaerobic Digestion*. Somerset, NJ, USA: John Wiley & Sons.

Galvis, J. y Rivera, X. (2013). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) de la empresa jugos hit de la ciudad de Pereira. Recuperado el 13 de diciembre de 2017 de

<http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/1305/Laura%20Lizeth%20Gomez%20Molina.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

García, O. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*. Recuperado el 8 de noviembre de 2017 de http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006_Vol_1/Num_1/NO_Vol_I_21-30_2006.pdf

Guía Ambiental. (s.f.). Tratamiento de lodos. Recuperado el 24 de noviembre de 2017 de <http://www.guiaambiental.com.ar/conocimiento-calidad-de-aguatratamiento-lodos.html>

Guzmán, D. (2014). Estudio de Factibilidad para Minimizar los Impactos Ambientales que son Generados por los lodos en el Tratamiento de Aguas Residuales de la Empresa Tropifrutas. Universidad de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado el 11 de diciembre de 2017 de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/4013>

Houdoková, L., Borán, J. y Elsaber, T. (2009). *Sewage Sludge Treatment in the European Union In Air, Water and Soil Pollution Science and Technology*. New York, NY, USA: Nova Science Publishers, Incorporated.

Jenicek, P., Kutil, J., Benes, O., Todt, V., Zabranska, J. y Dohanyos, M. (2013). *Energy self-sufficient sewage wastewater treatment plants: is optimized anaerobic sludge digestion the key? Water Science & Technology*. Recuperado el 1 de diciembre de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24185054>

Jiménez, B., Barrios, J. A. y Maya, C. (s.f.). Estabilización alcalina de lodos generados en un tratamiento primario avanzado. Recuperado el 2 de

noviembre de 2017 de
<http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v61n1/a19v61n1.pdf>

Jurado, P., Luna, M. y Barretero, R. (2004). Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos. Recuperado el 11 de diciembre de 2017 de <file:///C:/Users/aula/Downloads/art6.pdf>

Laos, F., Mazzarino, M. J., Satti, P. y Costa, G. (1996). Liberación de nutrientes de residuos orgánicos derivados de actividad pisícola y urbana en la región Andino-Patagónica Argentina. Recuperado el 7 de noviembre de 2017

Li, C., Li, H. y Zhang, Y. (2015). *Alkaline treatment of high-solids sludge and its application to anaerobic digestion*. Recuperado el 2 de diciembre de 2017 de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25607671>

Lituma, P. (2010). Biodigestion anaerobia de lodos residuales, de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ucubamba. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca. Recuperado el 21 de agosto de 2017 de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1522>

López, J. (2011). Evaluación de la eficiencia de un reactor anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos UASB para el tratamiento de aguas residuales escala laboratorio. Universidad San Francisco de Quito, Quito. Recuperado el 1 de diciembre de 2017 de <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/750/1/98208.pdf>

Lozada, P., Escobar, J. C., Pérez, A., Imery, R., Nates, P., Sánchez, G. y Bermúdez, A. (2005). Influencia del material de enmienda en el compostaje de lodos de Plantas de tratamiento de aguas residuales-PTAR. Recuperado el 11 de octubre de 2017 de

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingenv/article/viewFile/14637/18639>.

Lozada, P., Rodríguez, J., Barba, L., Morán, A. y Narváez, J. (2005). Tratamiento Anaerobio de Lixiviados En Reactores UASB. *Ingeniería & Desarrollo* (18). Recuperado el 5 de enero de 2018 de <http://www.bvsde.paho.org/bvsAIDIS/PuertoRico29/arratia.pdf>

Lue-Hing, C.; Matthews, P.; Nàmer, J.; Okuno, N. y Spinosa L.. (1996). *Sludge management in highly urbanized areas. En: A Global Atlas of wastewater sludge and biosolids use and disposal*. Recuperado el 25 de noviembre de 2017 de https://esa.un.org/iys/docs/san_lib_docs/habitat2008.pdf

Mahamud, M., Gutierrez, A. y Sastre, H. (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas. Recuperado el 7 de diciembre de 2107 de <file:///C:/Users/aula/Downloads/2703-7936-1-PB.pdf>

Massé, D., Talbot, G. y Gilbert, Y. (2012). *A Scientific Review of the Agronomic, Environmental and Social Benefits of Anaerobic Digestion. In Environmental Science, Engineering and Technology: Anaerobic Digestion: Processes, Products and Applications*. New York: Nova Science Publishers, Inc.

Medina, E., Rojas, N., Rodríguez, A. V. y Fabila, M. G. (2009). Análisis básico del reuso de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en suelos de Pradera del Parque Nacional Nevado de Tolouca, Quivera. Recuperado el 1 de diciembre de 2017 de <file:///C:/Users/aula/Downloads/An%C3%A1lisis%20de%20los%20lodos%20provenientes%20de%20la%20PTAR%20de%20Guatavita.pdf>

Ministerio del Ambiente Ecuador. (2013). Estudio para conocer los potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos en el sector productivo del Ecuador. Recuperado el 12 de noviembre de 2017 <http://www.ambiente.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2013/03/PART4.pdf>

Moreano, M. (2010). La biografía secreta de las aguas quiteñas. Terra Ecuador. Recuperado el 14 de noviembre de 2017 de <https://slides.tips/la-biografia-secreta-de-las-aguas-quiteas.html>

Mosquera, J. (2004). Caracterización de un lodo residual como biosólido para uso agrícola. Universidad de Guayaquil, Guayaquil. Recuperado el 18 de diciembre de 2017 de http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/3177/1/T_%20Lodo%20residual%20agr%C3%ADcola%20J.J.%20Mosquera.pdf

Ochoa, I. (s.f.). Curso de Compostaje en la UNAM Tipos de Compost. Recuperado el 5 de noviembre de 2017 de <http://www.resol.com.br/cartilha5/Manual%20de%20Compostaje-SERMANAT-Mexico.pdf>

Organización Mundial de la Salud. (2012). Organización Mundial de la Salud. Recuperado el 1 de noviembre de 2017 <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs372/es/>

Organización Mundial de la Salud. (2013). Organización Mundial de la Salud. Recuperado el 8 de noviembre de 2017 <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs361/es/>

- Pacheco, J. y Magaña, A.. (2003). Arranque de un reactor anaerobio Ingeniería. Recuperado el 2 de enero de 2018 de <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen7/arranque.pdf>
- Pérez, I. y Armas, F. (2010). Elaboración de un plan de manejo de desechos sólidos y líquidos para el campamento San Rafael del proyecto Hidroeléctrico coca Codo Sinclair. Universidad de las Américas, Quito. Recuperado el 1 de diciembre de 2017 de <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/2288>
- Rodrigo, P. y Barajas, C. (2012). Efecto de la adición de lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales PTAR's a suelos agrícolas y salinos del estado de Guanajuato. Recuperado el 2 de diciembre de 2017 de <file:///C:/Users/aula/Downloads/30992-672018-1-PB.pdf>
- Rodríguez, M. & Aguilar, G. (s.f.). Aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de agua residuales de Irapauto para la producción de biogás. Recuperado el 2 de diciembre de 2017 de <http://www.academicos.ugto.mx/memoria/PDF/s203-210.PDF>
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2013). Manejo de Lodos. Secretaría Regional Ministerial de Salud de Antofagasta. Recuperado el 8 de noviembre de 2017 de http://transparencia.redsalud.gov.cl/transparencia/public/seremi2/2013/12/res4936O_2013.pdf
- Show, K., Lee, D. y Tay, J. (2012). *Anaerobic Digestion of Sewage Sludge In Biological Sludge Minimization and Biomaterials/Bioenergy Recovery Technologies*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons

- Stamatelatou, K., Antonopoulou, G, Ntaikou, I. y Lyberatos, G. (2012). *The Effect of Physical, Chemical, and Biological Pretreatments of Biomass on its Anaerobic Digestibility and Biogas Production In Biogas Production: Pretreatment Methods in Anaerobic Digestion*. Somerset, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Vera, A., Sánchez, E., Ortiz, M., Peña, J. y Ortega, M. (2006). Estabilización de lodos residuales municipales por medio de la técnica de lombricompostaje. Recuperado el 2 de diciembre de 2017 de [file:///C:/Users/aula/Downloads/30992-67208-1-PB%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/aula/Downloads/30992-67208-1-PB%20(1).pdf)
- Viteri, L. (2012). Estudio del sistema de alcantarillado sanitario para la evaluación de las aguas residuales en el caserío El Placer de la parroquia Río Verde de la provincia de Tungurahua. Recuperado el 28 de noviembre del 2017 de <http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/3790/1/TESIS%20FINAL.pdf>
- Wang, J. (2012). *Fundamentals of Biological Processes for Wastewater Treatment In Biological Sludge Minimization and Biomaterials/Bioenergy Recovery Technologies*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Yáñez, F. (s.f.). Digestión anaeróbica de lodos. Recuperado el 1 de octubre de 2017 de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2992/cabezadevacainclan.pdf?sequence=1>
- Ye, F., Liu, X. y Li, Y. (2014). Extracellular polymeric substances and dewaterability of waste activated sludge during anaerobic digestion. Recuperado el 1 de enero de 2018 de <http://doi.org/10.2166/wst.2018.401>

Zhao, K., Wang, J. (2012). *Oxic-Settling-Anaerobic*. Recuperado el 24 de octubre
de 2017 de
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118309643.ch4/pdf>

ANEXOS



Anexo 1. Planta de tratamiento de aguas residuales Vacuumtruck Services S.A.



Anexo 2. Tamizado de tierra negra



Anexo 3. Determinación de sólidos volátiles



Anexo 4. Reactores (digestión anaerobia).

INFORME DE RESULTADOS

INF LASA-22-09-17-2620
ORDEN DE TRABAJO No. 0033967-17

SOLICITADO POR : DIEGO SEBASTIÁN CATTANI PÉREZ
DIRECCIÓN : AV. ZAMORA Y RÍO CORRIENTES
TELÉFONO/FAX : 2869853
TIPO DE MUESTRA: LODO
PROCEDENCIA: PLANTA DE TRATAMIENTO
IDENTIFICACIÓN: LODO 4
CÓD DE MUESTRA: 12244-17

FECHA DE RECEPCIÓN: 14/09/2017
FECHA DE ANÁLISIS: 14/09-22/09/2017
FECHA DE ENTREGA: 22/09/2017
NÚMERO DE MUESTRAS: UNA (1)
MUESTREO POR: SOLICITANTE
CÓDIGO: M1

REPORTE DE ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO

ITEM	PARÁMETROS	UNIDADES	MUESTRA	INCERTIDUMBRE U (k=2)	MÉTODO DE ENSAYO
1	FÓSFORO	mg/kg	18436,58	N.A.	Espectrofotometría
2	NTK	mg/kg	33666,22	N.A.	Kjeldahl
3	POTASIO	mg/kg	824,74	N.A.	Absorción Atómica

N.A.: No Aplica



Dr. Marco Suárez Ruales,
GERENTE DE LABORATORIO

LASA se responsabiliza exclusivamente de los análisis, el resultado se refiere únicamente a la muestra recibida en el laboratorio.
Los incumplimientos de los resultados para los análisis se encuentran disponibles en los registros de Laboratorio LASA.
Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del Laboratorio.

Pág. 1 de 1

Av. de la Prensa N53-113 y Gonzalo Gallo • Teléfonos: 2469-814 / 2269-012
Juan Ignacio Pareja OES-97 y Simón Cárdenas • Teléfono: 2290-815
Celular: 099 9236 287 • e-mail: info@laboratoriolasa.com
web: www.laboratoriolasa.com • Quito - Ecuador



Anexo 5. Análisis de macronutrientes


LABORATORIO LASA
 CONTROL AMBIENTAL

INFORME DE RESULTADOS

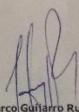
INF. LASA 21/09/2017-6835
ORDEN DE TRABAJO No. 33967

SOLICITADO POR: DIEGO CATTANI PÉREZ
DIRECCIÓN: AV. ZAMORA Y RÍO CORRIENTES
TELÉFONO: 2869853
TIPO DE MUESTRA: ESPECIAL
PROCEDENCIA: PLANTA DE TRATAMIENTO
IDENTIFICACIÓN: LODO 4 M1
CÓD. DE MUESTRA: 12244-17

FECHA RECEPCIÓN: 14/09/2017
FECHA DE ANÁLISIS: 14 al 21/09/2017
FECHA DE ENTREGA: 21/09/2017
NÚMERO DE MUESTRA: UNA (1)
MUESTREO POR: SOLICITANTE

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

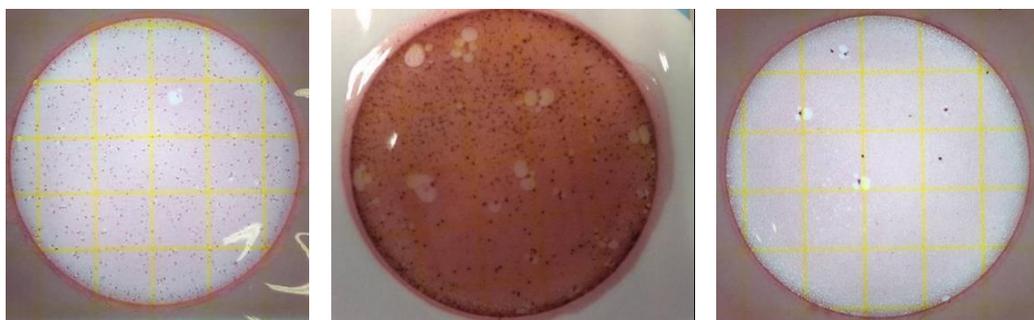
PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADO DE ENSAYO	MÉTODO DE ENSAYO	INCERTIDUMBRE %U (K=2)
HUEVOS DE HELMINTO	AUSENCIA/PRESENCIA	AUSENCIA	MICROSCOPIA	NO APLICA

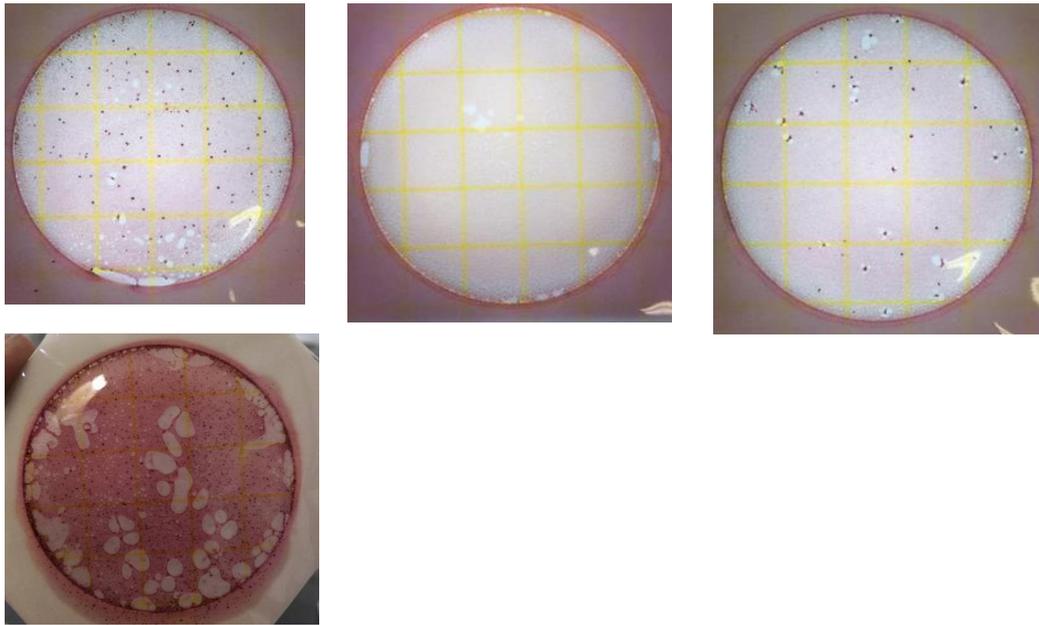

Dr. Marco Guájaro Ruales
 GERENTE DE LABORATORIO

Las incertidumbres de los resultados para los ensayos se encuentran disponibles en los registros de Laboratorio LASA.
 LASA se responsabiliza exclusivamente de los análisis, el resultado se refiere únicamente a la muestra recibida en el laboratorio.
 Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del Laboratorio.
 NOTA 1. Opiniones e Interpretaciones: **Dr. Marco Guájaro Ruales** • Teléfono: 2469-814 / 2269-012
 Juan Ignacio Pareja OJES-97 y Simón Cárdenas • Teléfono: 2290-815
 Celular: 099 9236 287 • e-mail: info@laboratoriolasa.com
 web: www.laboratoriolasa.com • Quito - Ecuador



Anexo 6. Análisis de microorganismos





Anexo 7. Crecimiento de coliformes en los diferentes tratamientos realizados

