



**ESTUDIO DE LA CANTIDAD Y CALIDAD DE LOS LODOS GENERADOS EN EL
SISTEMA ELECTROFLOX PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADO EN UN
RELLENO SANITARIO REGIONAL**



**ESTEPHANIA BOTERO VANDERBILT
ANDRÉS MAURICIO RAMÍREZ ROSERO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
ÁREA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2018**

**ESTUDIO DE LA CANTIDAD Y CALIDAD DE LOS LODOS GENERADOS EN EL SISTEMA DE
ELECTROFLOX PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADO EN UN RELLENO SANITARIO REGIONAL**

**ESTEPHANIA BOTERO VANDERBILT
ANDRÉS MAURICIO RAMÍREZ ROSERO**

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de
INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL**

**Directores:
CARLOS ARTURO MADERA PARRA, Ingeniero Sanitario, MSc. Ph.D
LUZ EDITH BARBA HO, Química. MSc.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE
ÁREA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2018**

LISTADO DE SIGLAS

A.A: Absorción Atómica

As: Arsénico

B.S.: Base Seca

CC: Coagulación Química

C.L⁻¹: Carga Eléctrica aplicada (Columbio por Litro de Lixiviado tratado)

COD: Carbono Orgánico Disuelto

DQO: Demanda Química de Oxígeno

EC: Electrocoagulación

Hg: Mercurio

LX: Lixiviado

M.O: Materia Orgánica

NTK: Nitrógeno Total Kjeldahl

PAM: Poliacrilamida

Pb: Plomo

ppm: Partes por millón o mg.L⁻¹

RESPEL: Residuo Peligroso

RPM: Revoluciones por minuto

ST: Sólidos Totales

STV: Sólidos Totales Volátiles

UFC: Unidades Formadoras de Colonia

UND: Unidades

VFe: Flujo de Hierro

VLx: Flujo de Lixiviado

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	12
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2.1	DEFINICIÓN	14
2.2	EVIDENCIA	14
3	JUSTIFICACIÓN.....	16
4	OBJETIVOS.....	18
4.1	OBJETIVO GENERAL	18
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
5	MARCO TEÓRICO	19
5.1	RESIDUOS SÓLIDOS	19
5.2	RELLENO SANITARIO	19
5.3	LIXIVIADOS	20
5.3.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS LIXIVIADOS.....	21
5.4	PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS	21
5.4.1	Proceso combinado de Electrodisolución-Floculación – ELECTROFLOX®.....	22
5.4.2	Heterocoagulación	23
5.4.3	Variables que influyen en el proceso.....	24
5.5	LODOS DE TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS.....	24
5.6	ESTUDIOS DE TOXICIDAD	24
6	ANTECEDENTES.....	26
6.1	CASO DEL VALLE DEL CAUCA	26
6.2	TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS.....	28
6.3	ESTUDIO DE LODOS PROVENIENTES DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS	30
7	METODOLOGÍA.....	33
7.1	SITIO DE ESTUDIO	33
7.2	SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	34
7.2.1	Descripción del proceso Electrofloxx®	34
7.2.2	Condiciones de operación de la planta piloto de ELECTROFLOX®	36
7.3	CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS LODOS	37
7.3.1	Toma de la Muestra	37
7.3.2	Preservación de la muestra.....	38

7.3.3	Preparación de la muestra	39
7.3.4	Características fisicoquímicas y microbiológicas del lodo	40
7.3.5	Cantidad de Lodo	41
7.4	EVALUACIÓN DE LA CANTIDAD DE LODOS GENERADOS EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO Y SU CALIDAD MEDIANTE NORMATIVAS NACIONALES E INTERNACIONALES.....	43
8	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	44
8.1	ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE LODO GENERADO.....	44
8.2	CARACTERISTICAS FISICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL LODO	45
8.2.1	pH.....	48
8.2.2	Humedad.....	48
8.2.3	Conductividad Eléctrica (<i>k</i>).....	49
8.2.4	Sólidos Totales y Sólidos Volátiles Totales	49
8.2.5	Materia Orgánica, Nitrógeno y Fósforo Total	50
8.2.6	Parámetros Microbiológicos	51
8.2.7	Metales.....	52
8.3	CARACTERISTICAS TOXICOLÓGICAS DEL LODO.....	55
8.3.1	Ensayo de Ecotoxicidad aguda	55
8.4	VALORIZACIÓN DEL LODO	56
9	CONCLUSIONES	63
10	RECOMENDACIONES.....	65
11	BIBLIOGRAFÍA.....	66
12	ANEXOS.....	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características típicas de los lixiviados de rellenos sanitarios.....	20
Tabla 2. Características del Lixiviado del relleno sanitario regional de Presidente para los años 2010 y 2011.....	27
Tabla 3. Características del Lixiviado del relleno sanitario regional de Presidente para el 2014.....	27
Tabla 4. Antecedentes de tecnologías de tratamiento para lixiviados	28
Tabla 5. Estudios de los lodos generados por tratamientos de Lixiviados.....	30
Tabla 6. Condiciones de operación empleadas	36
Tabla 7. Recolección y preservación de la muestra para los análisis del lodo.....	39
Tabla 8. Parámetros de muestreo para análisis de calidad de los lodos del Lixiviado.....	40
Tabla 9. Niveles registrados de lodo en las canastillas de muestreo	44
Tabla 10. Volumen generado de lodo durante el tratamiento	44
Tabla 11. Tabla de cálculos para determinar la producción de lodo	45
Tabla 12. Características del lixiviado y sobrenadante en la Planta de ELECTROFLOX®.....	45
Tabla 13. Resultados metales y Ecotoxicidad para cada muestra de lodo	46
Tabla 14. Resultados parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para cada muestra de lodo.....	47
Tabla 15. Resultados parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para cada muestra de lodo.....	50
Tabla 16. Límites máximos permisibles para metales en lodos y biosólidos	53
Tabla 17. Concentraciones y cantidad de Hierro, Calcio y Magnesio en la muestra de lodo.....	54
Tabla 18. Ensayo de Ecotoxicidad aguda con <i>Daphnia pulex</i>	55
Tabla 19. Evaluación del cumplimiento de las normas nacionales e internacionales del Lodo-Biosólido estudiado.....	56
Tabla 20. Límites nacionales e internacionales para parámetros microbiológicos.....	57
Tabla 21. Parámetros a cumplir para una Enmienda orgánica no húmica.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso ELECTROFLOX®	23
Figura 2. Ubicación del relleno sanitario regional (Fuente: Propia).....	34
Figura 3. Esquema del proceso de tratamiento del ELECTROFLOX® al lixiviado	35
Figura 4. Laguna de lixiviado para alimentación Planta ELECTROFLOX® (Fuente: Propia)	36
Figura 5. Planta Piloto de ELECTROFLOX® para tratamiento del lixiviado	37
Figura 6. Zona de acumulación de lodos primer sedimentador (V-303)	37
Figura 7. Muestra de lodo recolectada del primer sedimentador	38
Figura 8. Muestra de lodo secada a 105 °C durante una hora.....	39
Figura 9. Canastillas recolectoras del lodo	48

ANEXOS

Anexo 1. Toma de muestra de Lixiviado en la planta piloto de ELECTROFLOX®.....	72
Anexo 2. Descarga de lodo de primer tanque sedimentador – ELECTROFLOX®.....	72
Anexo 3. Ensayos de digestión de la muestra para la determinación de metales en el lodo	72
Anexo 4. Balanza Analítica con muestra de lodo empleada para los ensayos de laboratorio	73
Anexo 5. Determinación de Materia Orgánica en la muestra de lodo.....	73
Anexo 6. Coagulador No. 3 y Floculador No.2 Planta ELECTROFLOX®	73
Anexo 7. Tanque de Lechada de Cal V-202 Planta ELECTROFLOX®.....	74
Anexo 8. Tanque sedimentador de Planta ELECTROFLOX®.....	74
Anexo 9. Muestra de lodo secada a temperatura ambiente en el relleno sanitario	74
Anexo 10. Zona de dosificación de polímero para el tratamiento de lixiviado	75
Anexo 11. Ubicación de las canastillas para recolección de lodo.....	75
Anexo 12. Medición de los niveles de lodo en las canastillas de recolección.....	75
Anexo 13. Informe de laboratorio prueba de ecotoxicidad para muestra de semana 3.....	76
Anexo 14. Resultados obtenidos prueba de ecotoxicidad para lodo obtenido de semana 3.....	77
Anexo 15. Informe de laboratorio prueba de ecotoxicidad para muestra semana 7.....	78
Anexo 16. Resultados obtenidos prueba de ecotoxicidad para lodo de semana 7.....	79
Anexo 17. Informe de laboratorio prueba de ecotoxicidad muestra semana 8.....	80
Anexo 18. Resultados prueba de ecotoxicidad muestra semana 8.	81
Anexo 19. Informe de laboratorio parámetros microbiológicos lodo semana 3	82
Anexo 20. Resultados de laboratorio parámetros microbiológicos lodo semana 3.....	83
Anexo 21. Definición de las categorías y clases de Biosólidos	84

NOTA DE ACEPTACIÓN JURADOS

Nota de aceptación

Jurado 1

Jurado 2

Director 1

Director 2

DEDICATORIAS

A Dios por haber patrocinado mi sueño, por haberme colocado en el hogar que me apoyó hasta el final, que cada vez que quise flaquear me fortaleció y motivó a seguir adelante, por ser mi fuerza, mi motor y mi vida entera, porque sin Él nada de esto hubiera sido posible, y gracias a Él seguiré soñando para alcanzar miles de metas.

A mis padres por haberme apoyado en todo momento, por haber creído en mí cuando nadie más lo hizo, por estar a mi lado y sacrificarse tanto para verme avanzar y crecer. A mi hermano que me dio su apoyo, y que sin su ayuda no hubiera logrado ingresar a la Universidad. A toda mi familia por siempre tener palabras de aliento y motivación.

Estephanía Botero Vanderbilt

A Dios primeramente, por darme la oportunidad de tener la bendición de poder realizar esta carrera, de brindarme su amor incondicional, la fortaleza y la salud, el deseo para salir adelante y colocarme una excelente familia y personas que pudieran contribuir enriquecer cada área de mi vida y también por alimentar mi espíritu de su gran amor y misericordia, por mostrarme el camino y darme la vida que me dio. A Él gracias y que espero de aquí en adelante pueda ser parte de cada uno de los proyectos que en mi vida emprenda.

A mis padres Fanor y Deyanira por su constante amor, apoyo y dedicación en el transcurso de mi formación profesional y humana, que aun en medio de innumerables sacrificios dieron lo mejor de sí para que yo pudiera seguir adelante y persistir sin importar las dificultades que se pudieran presentar en el camino, por sus buenas enseñanzas y valores inculcados dentro del hogar, para en mi día a día ser una mejor persona.

A mis hermanos John Jairo y Victoria quienes compartieron mis logros pero de igual manera, mis frustraciones. Por sus palabras de aliento, sus consejos, su compañerismo, su amistad y la guía en el camino para formar disciplina y carácter necesario para enfrentar lo que la vida me prepara

A mis familiares, amigos y compañeros de estudio cercanos, quienes estuvieron también presentes a lo largo de cada etapa de mi vida y contribuyeron por hacerme cada día mejor persona en el día a día, muchas gracias a todos.

Andrés Mauricio Ramírez Rosero

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, por sus infinitas bendiciones.

Gracias a nuestros padres por ofrecernos una vida incondicional de amor y apoyo.

A nuestros directores de Trabajo de Grado los profesores Carlos Arturo Madera Parra y Luz Edith Barba Ho, por sus enseñanzas, constante estímulo, apoyo y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de grado.

Al profesor Nilson Marriaga y a la Ing. Química, MSc. Dayana Donneys de la Escuela de Ingeniería Química por su acompañamiento y asesoría frente a las inquietudes y obstáculos que se pudieron presentar para culminar este trabajo de grado.

Al profesor Héctor Mario Gutiérrez y al Ing. Químico, MSc. Christian Álvarez por su evaluación, observaciones y aportes realizados que permitieron enriquecer más los conocimientos plasmados en este trabajo de grado.

A Laura García, Jazmín Carabalí, Gloria Lasso y Nhora Suaterna por el apoyo suministrado en las capacitaciones para realizar los ensayos a nivel de laboratorio durante el desarrollo de la fase experimental y también por la motivación realizada para sacar adelante la misma.

A la Ingeniera Diana Cobo y todo el personal de la Empresa BUGASEO E.S.P. por brindarnos la atención adecuada y el espacio para desarrollar el trabajo de campo.

A todo el personal del Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales (LARA) y del Laboratorio de Análisis y Procesos en Ingeniería Química (LAPIQ) y el Laboratorio de CINARA de la Universidad del Valle por su colaboración con el préstamo de insumos, equipos y demás para la realización de los ensayos.

A nuestros familiares, compañeros, amigos y todas aquellas personas que hicieron posible la realización de este proyecto de grado.

Los Autores

RESUMEN

Esta investigación se realizó con el propósito de determinar de manera exploratoria la cantidad y calidad de los lodos generados durante el tratamiento del lixiviado del relleno sanitario regional de Presidente, mediante la operación de la planta piloto de ELECTROFLOX®. Se recolectaron un total de 8 muestras de lodos en el primer tanque de sedimentación en el periodo septiembre – diciembre de 2016. Adicionalmente, se evaluaron características fisicoquímicas del lodo tales como: pH, Humedad, Materia Orgánica (M.O.), Nitrógeno, Fósforo, contenido de metales como Arsénico, Plomo, Mercurio, Calcio, Hierro y Magnesio, Sólidos Totales, Sólidos Volátiles Totales y características microbiológicas tales como Coliformes Fecales, Totales, Huevos de Helmintos y ensayos de ecotoxicidad empleando como organismo indicador *Daphnia pulex*.

El tratamiento ELECTROFLOX® generó una cantidad de lodo entre 65.32 y 83.32 kg Lodo.h⁻¹ y de igual forma entre 100.61 y 135.52 kg de Lodo.m⁻³ de lixiviado tratado. Las cantidades determinadas para los metales tóxicos como Arsénico, Plomo y Mercurio, fueron inferiores a las exigidas por las normatividad nacional e internacional vigente (Colombia, México y E.U.). Además, ninguno presentó características ecotóxicas por lo que se caracterizó como biosólido categoría A, con una calidad excelente según las normas evaluadas.

Para el aprovechamiento del lodo es necesario realizar una etapa de secado preliminar por su alto contenido de humedad. El lodo seco puede usarse potencialmente como aditivo en el acondicionamiento de suelos debido a los contenidos de M.O., nitrógeno y fósforo. Otros usos alternativos son como material de cobertura en rellenos sanitarios, soporte físico y sustrato biológico en sistemas de filtración, estabilización de taludes de la red vial, y generación de *biochar*.

Palabras clave: Calidad de Lodos, ELECTROFLOX, Lixiviados, Lodos de lixiviado, Relleno Sanitario, Tratamiento de Lixiviados, Residuos Sólidos Municipales.

1 INTRODUCCIÓN

El manejo y la eliminación de los residuos sólidos generados a nivel urbano se han convertido en uno de los problemas críticos que actualmente se presenta en América Latina. En Colombia, según el SSPD (2015), entre los sistemas de disposición final más utilizados en el país se encuentran los rellenos sanitarios, el 81% de los residuos sólidos urbanos (RSU) generados en el país, tienen como sistema de disposición final este tipo de alternativa. Aunque en Colombia los rellenos sanitarios son el método de disposición final legal más común, es imperioso implementar o buscar nuevas alternativas, pues según las estadísticas, los rellenos sanitarios regionales (cada vez más demandados y subutilizados), están llegando al tope de su viabilidad (Carranza & Mendoza, 2016). Adicionalmente, los rellenos que existen en la actualidad poseen diversidad de problemas operativos, los encontrados con mayor frecuencia son un inadecuado tratamiento de los lixiviados, la emisión de olores desagradables y un manejo pobre de la cobertura de los residuos sólidos. Aunque es necesario mejorar la operación y el mantenimiento de los rellenos, también es urgente incrementar el compromiso de las Agencias Ambientales y de Salud en programas que disminuyan la producción de residuos sólidos y promuevan el uso sostenible de aquellos residuos con valor económico (Noguera y Olivero, 2010).

En los rellenos sanitarios, se generan dos subproductos: lixiviados y biogás. En el caso de los lixiviados, estos se definen como el efluente acuoso generado como consecuencia de la percolación del agua de lluvia a través de los desechos, los procesos bioquímicos en las células de los desechos y el contenido de agua inherente de los propios desechos. Los lixiviados pueden contener grandes cantidades de materia orgánica (no solo biodegradable, sino también refractarios a la biodegradación), donde los constituyentes de tipo húmico consisten en un grupo importante, así como amoníaco-nitrógeno, metales pesados, sales orgánicas e inorgánicas cloradas (Renou et al., 2008) y pueden representar un riesgo potencial para la salud, tanto de los ecosistemas comprometidos con su vertimiento como de las poblaciones humanas (Salem *et al.*, 2008; citado por Torres *et al.*, 2010).

Debido a que los lixiviados son líquidos caracterizados por ser muy contaminantes, es necesario realizar un tratamiento previo con el fin de evitar la contaminación de las fuentes de aguas subterráneas y superficiales, así como los suelos. Es por esta razón, que se han desarrollado para el tratamiento de los lixiviados diversas tecnologías que van desde fisicoquímicas y biológicas, pero el tipo de tratamiento que se pueda emplear dependerá de las características, la edad y la calidad del lixiviado.

Una alternativa para el tratamiento de los lixiviados consiste en emplear un proceso conocido como ELECTROFLOX®, que ha sido patentado por investigadores de la Universidad del Valle (Colombia Patente No 20130153509). Es un método electrolítico que implica tres etapas: una electrodisolución, una oxidación y una floculación; el orden de estas etapas puede variar de acuerdo a las condiciones de experimentación. El proceso puede ser in-situ, si se realiza la electrodisolución directamente en el agua a tratar, o ex-situ, si la electrodisolución se lleva a cabo en un efluente distinto (Puenguenán & Segura, 2013). Además, según Marriaga & Machuca (2010), el proceso de ELECTROFLOX® presenta las siguientes ventajas: se desarrolla a temperatura y presión ambiente, no se utilizan microorganismos ni agentes químicos costosos, elimina bacterias, es de bajo consumo de electricidad (menos de 1 kW-h/m³), no tiene partes móviles (escaso

mantenimiento), económico (equipos compactos), genera muchos menos lodos que la coagulación química y requiere muy poca automatización.

Los lodos generados por el sistema ELECTROFLOX® aplicado al lixiviado de un relleno sanitario regional, cuyas características en cantidad y calidad no están totalmente conocidas permitirán definir alternativas de manejo final (aprovechamiento, tratamiento y/o disposición) y por lo tanto se desconocen los posibles impactos que podrían representar para la salud del ser humano y el ambiente. En el presente trabajo de grado se evaluó mediante un estudio exploratorio la cantidad y calidad del lodo generado luego de aplicar el proceso ELECTROFLOX® a escala piloto para tratar el lixiviado de un relleno sanitario ubicado en el departamento del Valle del Cauca, mediante el análisis de algunas características fisicoquímicas, microbiológicas y toxicológicas del lodo, recolectadas del primer sedimentador de la planta ELECTROFLOX® en las instalaciones del relleno durante el periodo septiembre – diciembre de 2016 y así mismo proponer alternativas de manejo final para dichos lodos que permitan llevar a cabo un manejo ambientalmente seguro y adecuado, sin revestir efectos negativos a la salud de la población y el ambiente por la generación de estos lodos como residuos.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 DEFINICIÓN

Se han realizado diversos estudios empleando el sistema ELECTROFLOX® como tecnología de tratamiento de aguas residuales que incluyen: Industrias de productos de aseo (Timana, 2016), molienda húmeda de maíz (Pastás & Balanta, 2015), hidrólisis ácida de almidón de maíz (Sánchez, 2014), vinazas (García & Marriaga, 2014), curtiembres (Puenguenán & Segura, 2013), producción de tintas flexográficas (Leal, 2012) y lixiviados (Donneys, 2013). En el caso particular de lixiviados, el sistema ELECTROFLOX® ha mostrado resultados tratando este tipo de aguas complejas a la hora de generar un efluente de mejor calidad. En su estudio, Donneys (2013) reporta reducciones promedio de turbidez, color, DQO, y COD en el lixiviado de 99.7%, 76.2%, 81.8% y 37.2 % respectivamente; además de reducciones de hierro y magnesio superiores al 94% al emplear este tipo de tecnología. Sin embargo, tras un proceso de revisión acerca de la literatura existente sobre este tipo de alternativa tecnológica, en términos de cantidad, calidad y toxicidad existe poca información académica y científica sobre los lodos generados como subproducto del tratamiento mediante ELECTROFLOX®.

2.2 EVIDENCIA

Durante el proceso de recopilación de información realizado en trabajos de grado de la Universidad del Valle, artículos en bases de datos como Scopus, Science Direct, etc. y fuentes académicas como Google Scholar. (fuentes primarias y secundarias, tesis, documentos en línea, artículos, libros, etc.), se ha evidenciado que los estudios para determinar la cantidad y calidad de los lodos que se derivan como resultado de la aplicación de un tratamiento electroquímico a un lixiviado son escasos, debido a que el enfoque de la caracterización independientemente del tipo de tratamiento empleado, se encuentra más asociado al propio lixiviado en lodos generados en plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), principalmente de origen doméstico. Además, existe poca información asociada sobre estudios de calidad de los lodos generados como resultado de emplear ELECTROFLOX® para tratar los lixiviados provenientes de un relleno sanitario.

Autores como Silva-Filho *et al.* (2006), Øygard *et al.* (2008), Ôman & Junestedt (2008) y Al-Wabel *et al.* (2011), han realizado estudios relativamente recientes en países como Brasil, Noruega, Arabia Saudita y Suecia con enfoque en lodos procedentes de lagunas de lixiviados en rellenos sanitarios, principalmente hacia el estudio de metales pesados. Morozesk *et al.*, (2016) en su estudio, evaluaron las características fisicoquímicas y toxicológicas de un lodo procedente de un vertedero luego de emplear un proceso de electrocoagulación al lixiviado y encontraron que este tipo de tratamiento demostró ser efectivo debido a la posibilidad de mejorar las características adversas del efluente y producir un lodo con potencial para ser usado como acondicionador de suelos, sin embargo, a pesar de la baja citotoxicidad, el residuo presentó efectos genotóxicos y mutagénicos.

Otro estudio realizado por Flórez (2007), evaluó las características fisicoquímicas, microbiológicas, toxicológicas y nutricionales de los lodos generados como subproducto del tratamiento fisicoquímico de un lixiviado empleando 2 tipos de coagulantes: Cloruro Férrico y Neutraolor (este último comercial) y que sirvió

como punto de partida para proponer alternativas de manejo final que se le podían dar a estos con base en la caracterización realizada. En este trabajo de investigación se pudo concluir que los lodos generados no se categorizaban como residuos tóxicos ni peligrosos y que debido a la alta concentración de nutrientes (N, P, C) podrían emplearse como materia prima para compostaje o acondicionador de suelos.

Donneys (2013), en su estudio presenta gráficamente la producción de lodos que se obtiene en kilogramo de lodo seco por metro cúbico de lixiviado tratado luego de emplear el proceso ELECTROFLOX® al lixiviado del relleno sanitario contra las concentraciones empleadas de magnesio (0, 150 y 300 mg.L⁻¹) y la carga eléctrica aplicada (0, 200 y 400 C.L⁻¹), reportando una desviación máxima de los datos de 1.2%. Adicionalmente, también en este estudio se reporta que la producción de lodos se incrementó con el aumento en la concentración de magnesio debido al proceso de hidrólisis que ocurre durante el tratamiento, sin embargo, no se profundiza sobre los lodos generados en el mismo sistema de tratamiento.

Como se puede observar, los estudios enfocados a lodos que se generan como subproducto del tratamiento de lixiviados son escasos y más específicamente aquellos que se enfocan en el sistema de tratamiento empleando ELECTROFLOX®, ya que no existe mucha información en términos de producción (cantidad) y calidad en este tipo de subproducto.

3 JUSTIFICACIÓN

Los rellenos sanitarios han sido la alternativa de disposición y eliminación de residuos sólidos más utilizada a nivel mundial debido a que fueron diseñados para minimizar y controlar los impactos ambientales. Sin embargo, uno de los problemas asociados a su operación es la producción y manejo de lixiviados (Kulikowska & Klimiuk, 2008) y las variaciones significativas tanto en el flujo volumétrico como en su composición química, lo que constituyen una desventaja importante (Renou *et al.*, 2008). Para minimizar los impactos ambientales que puede tener el lixiviado sobre los ecosistemas y seres humanos se ha optado por reducir la carga contaminante de este tipo de residuo generado.

Al realizar énfasis en la generación de lixiviados y el manejo que se le da a este matriz contaminante, se puede mencionar como ejemplo el lixiviado producido en un relleno sanitario regional ubicado en el municipio de San Pedro (Valle del Cauca). De acuerdo a un estudio realizado en el año 2008 por Bugaseo S.A E.S.P., empresa operadora del relleno sanitario, donde se disponen los residuos sólidos de 18 municipios del Valle del Cauca, de la cantidad de residuos sólidos dispuestos se tiene que alrededor del 77% son material orgánico y se genera entre 2 y 5 L.s⁻¹ de lixiviado (Bugaseo, 2009 citado por Cerón, 2014). En este relleno sanitario, se han propuesto diferentes tecnologías de tratamiento para tratar los lixiviados, entre las que se incluyen actualmente: una laguna algal de alta tasa, un tratamiento primario intermedio del lixiviado por medio de un biorreactor laguna anaerobia de alta tasa (BLAAT®), una planta de ósmosis inversa y el proceso ELECTROFLOX®.

Particularmente, el proceso ELECTROFLOX® se ha implementado a escala piloto como una alternativa tecnológica e innovadora para el tratamiento primario de los lixiviados en el relleno sanitario. Donneys (2013) en su investigación, usando esta tecnología reportó reducciones promedio de turbidez, color, DQO, hierro y magnesio superiores al 90% en el lixiviado, exceptuando COD cuya eficiencia de reducción promedio fue del 37.2%. Sin embargo, como subproducto del sistema de tratamiento mediante este tipo de tecnología, se generan lodos de cantidad y calidad desconocida que fueron objeto de estudio, con la finalidad de proponer alternativas de aprovechamiento, tratamiento y/o disposición final.

Es importante tener en cuenta que los diversos tratamientos de los residuos líquidos, como las aguas residuales y los lixiviados generados en los sitios de disposición final de residuos sólidos, generan lodos, los cuales deben ser tratados, porque en ellos queda la mayor fracción contaminante de los efluentes líquidos (Narea, 2004; EPA, 1993; citados por Flórez, 2007).

Adicionalmente, Flórez (2007) en su estudio afirma que el lodo generado en el tratamiento de los lixiviados se encuentra compuesto de los elementos constituyentes del lixiviado, los cuales son agua, materia orgánica, bacterias, virus, metales y otros elementos que pueden estar presentes en la composición de los residuos sólidos. Por esta razón, los lodos como subproducto del tratamiento de los lixiviados representan una problemática ambiental, ya que pueden contaminar los recursos naturales como el agua, aire y suelo, ocasionando un deterioro del entorno ambiental y de la salud de la población expuesta, si no se conocen las características fisicoquímicas, microbiológicas y toxicológicas de este tipo de subproducto y no se le da un manejo adecuado. En algunos rellenos, los lodos son manejados como residuos peligrosos (RESPEL)

mientras que en otros lugares son depositados ahí mismo en los rellenos sanitarios (Øygard *et al.*, 2008). De ahí surge la necesidad de tratar estos residuos y acondicionarlos para darles un manejo ambientalmente seguro.

Otro estudio realizado por Silva-Filho *et al.*, 2006 confirmó la presencia y acumulación de compuestos tóxicos en los sedimentos de lixiviados que no son detectados directamente en los lixiviados, lo que evidencia que los lodos de los lixiviados representan una matriz importante para la detección de compuestos tóxicos (Öman & Junestedt, 2008). Factores como el país, la variabilidad climática, el tipo de desecho que se dispone en el relleno sanitario, la operación del mismo, entre otros van a hacer que las características de éstos lodos varíen y no se puedan comparar fácilmente unos con otros (Renou *et al.*, 2008).

De igual forma, aunque diversos autores han realizado estudios empleando el sistema ELECTROFLOX® como tecnología de tratamiento de aguas residuales (Timana, 2016; Pastás & Balanta, 2015; Sánchez, 2014; García & Marriaga, 2014; Donneys, 2013; Puenguenán & Segura, 2013; Leal, 2012) y que presentan las bondades del tratamiento ELECTROFLOX® logrando disminuir la carga contaminante en el afluente del proceso, no se han realizado estudios más detallados sobre el lodo que genera como subproducto en el sistema de tratamiento y al no existir mucha información en la literatura asociada a estudios de la cantidad y la calidad (características fisicoquímicas, microbiológicas y toxicológicas) de este material, se desconoce qué tipo de manejo se le podría dar al mismo (aprovechamiento, tratamiento y/o disposición final). Este residuo puede estar compuesto en mayor porcentaje de sólidos, compuestos químicos y metales provenientes del lixiviado, haciendo que este sea una fuente posible de contaminación al ambiente y la salud humana. Por estas razones esta investigación es importante, como una contribución al conocimiento de las características físicas, químicas, microbiológicas y ecotoxicológicas sobre los lodos de tratamiento de lixiviados por ELECTROFLOX® para finalmente contribuir en la formulación de opciones de aprovechamiento, tratamiento o disposición final de este subproducto generado en el sistema de tratamiento.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar a nivel exploratorio la cantidad y la calidad de los lodos generados como subproducto de la aplicación del proceso de ELECTROFLOX® al lixiviado proveniente del relleno sanitario regional de Presidente, Valle del Cauca, Colombia y proponer alternativas de manejo final.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las propiedades físicas (pH, Conductividad eléctrica, Humedad), químicas (Materia Orgánica, DQO del lixiviado, Fosforo Total, Nitrógeno total, Sólidos totales, Sólidos volátiles totales, Calcio, Hierro, Magnesio, Arsénico, Plomo, Mercurio) y microbiológicas (Coliformes fecales, E. Coli y huevos de helmintos) del lodo proveniente del tratamiento del lixiviado mediante ELECTROFLOX® y la cantidad que se produce del mismo en el sistema durante la jornada de operación de la planta.
- Determinar la toxicidad de los lodos generados por el tratamiento de ELECTROFLOX® aplicado al Lixiviado del relleno sanitario regional de Presidente.
- Plantear alternativas de manejo final para los lodos que se genera durante el tratamiento de lixiviado del relleno sanitario de Presidente en el sistema ELECTROFLOX® de acuerdo con la cantidad y calidad obtenida.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 RESIDUOS SÓLIDOS

El Decreto 2981 del 2013 reglamentado en Colombia por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, define los residuos sólidos como cualquier objeto, material, sustancia o elemento principalmente sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador presenta para su recolección por parte de la persona prestadora del servicio público de aseo. Igualmente, se considera como residuo sólido, aquel proveniente del barrido y limpieza de áreas y vías públicas, corte de césped y poda de árboles. Los residuos sólidos que no tienen características de peligrosidad se dividen en aprovechables y no aprovechables (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2013).

Un residuo sólido es un sobrante, un producto o material excedente de valor nulo o marginal para su propietario y que éste quiere descartar (Christensen, 2011). También son aquellos subproductos generados por algún tipo de actividad antropogénica, dentro de éstos hay varias clases, como residuos sólidos peligrosos, aquellos que se pueden reciclar, aquellos que son biodegradables, y aquellos que no son biodegradables. Encierran un rango muy amplio de materiales, toxicidades, estados y orígenes. En Colombia para el año 2014 se obtuvo un volumen total de residuos de 21.1 millones de toneladas con una generación de la industria de 12.2 millones de toneladas y de los hogares de 8.9 millones de toneladas (DANE, 2016). En el Departamento del Valle del Cauca se generan diariamente alrededor de 2667 toneladas (MADS, 2016), en la ciudad de Santiago de Cali se generan alrededor de 1700 toneladas diarias de residuos sólidos (DAGMA, 2017; citado por El País, 2017).

Los residuos una vez recolectados pueden ser asignados a diversos procesos de transformación; incluyendo el reciclaje, el aprovechamiento energético, la elaboración de compost, la producción de biogás y la formulación de combustibles alternos, entre otros. Estos procesos deben estar enmarcados dentro de una Gestión Integral de Residuos Sólidos, de tal forma que representen beneficios sanitarios, ambientales, sociales, económicos e inclusive culturales. Cuando el aprovechamiento de los residuos sólidos no es posible, el relleno sanitario, y en algunos casos la incineración, aparecen como opciones para la disposición final de los mismos (Noguera & Olivero, 2010).

5.2 RELLENO SANITARIO

En el Decreto 838 del 2005, se entiende como relleno sanitario, al lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

5.3 LIXIVIADOS

El lixiviado (LX) de relleno sanitario es un agua residual compleja producida por la degradación química y biológica de la materia contenida en los residuos, así como por la infiltración de agua lluvia a través de los residuos sólidos. La presencia de agua permite una combinación de procesos físicos, químicos y microbiológicos para transferir contaminantes del residuo sólido en descomposición al líquido, resultando así la formación del lixiviado (Lei *et al.*, 2007 citado por Madera *et al.*, 2014). Son aguas complejas que contienen en su composición una alta cantidad de nitrógeno amoniacal, materia orgánica, metales pesados, compuestos recalcitrantes y xenobióticos (Monje-Ramírez & Orta de Velásquez, 2004; citado por Cerón, 2014; Renou *et al.*, 2008 citado por Cerón, 2014; Flórez, 2007) y su tratamiento inadecuado o la ausencia de este contaminan las matrices agua, suelo y aire (Calvo, 2003; citado por Cerón, 2014).

Los metales pesados a diferencia de los contaminantes orgánicos, pueden persistir en la naturaleza y dada su disposición en el suelo se puede llegar a predecir su presencia en un horizonte de más de 100 años (Rao *et al.*, 2005 citado por Cerón, 2014). Estos metales pueden ser perjudiciales si se vierten en las corrientes hídricas, convirtiéndose a mediano y largo plazo en un riesgo para la salud humana (Kadrivelu *et al.* 2001; Obersteiner *et al.* 2007; citados por Cerón, 2014). Un ejemplo, son las malformaciones congénitas, derivadas en la mayoría de los casos por exposición a metales pesados, pesticidas y solventes, los que se encuentran en los lixiviados, convirtiendo a este residuo en un agente teratogénico, el cual afecta principalmente a las comunidades que se encuentran cerca de los vertederos y expuestas por largos periodos de tiempo. Sin embargo, esta alteración genética, se presenta si es superado el umbral del efecto teratogénico (Dolk *et al.*, 1998; citado por Cerón, 2014; Méndez *et al.*, 2006; citado por Cerón, 2014).

Los lixiviados son considerados como jóvenes en el caso de tener una biodegradabilidad (DBO_5/DQO) > 0,6 que en tiempo es equivalente a que sea menor de uno o dos años. Si el lixiviado tiene una biodegradabilidad (DBO_5/DQO) < 0,3 es considerado como maduro, o de un tiempo mayor de 10 años (Franco & Guiffo, 2012). Los factores descritos anteriormente determinarán qué tipo de tratamiento se le aplicarán a los lixiviados, los cuales se resumirán por medio de la **Tabla 1**.

Tabla 1. Características típicas de los lixiviados de rellenos sanitarios.

Característica	Lixiviado joven	Lixiviado intermedio	Lixiviado viejo/maduro
Edad (años)	<5	5-10	>10
pH (Und)	<6.5	6.5-7.5	>7.5
DQO (mg.L ⁻¹)	>10000	4000-10000	<4000
DBO ₅ /DQO	0.5-1	0.1-0.5	<0.1
Compuestos orgánicos	80% AGV	5-30% AGV+Ácidos húmicos y fúlvicos	Ácidos húmicos y fúlvicos
N-NH ₃ (mg.L ⁻¹)	<400	N.A	>400
TOC/DQO	< 0.3	0.3-0.5	>0.5
NTK (g. L ⁻¹)	0.1-0.2	<2 (bajo)	N.A
Metales pesados (mg.L ⁻¹)	>2 (bajo-medio)	Media	<2(bajo)
Biodegradabilidad	Alta	Media	Baja

Característica	Lixiviado joven	Lixiviado intermedio	Lixiviado viejo/maduro
Color	Café-pardo-grisáceo	-	Negro-viscoso
Potencial REDOX	Bajo	-	Alto

Fuente: Adaptado de Foo & Hameed, 2009; Kurniawan *et al.*, 2009; Iván *et al.*, 2009; Renou *et al.*, 2008; citados por Cortés, 2014

Todos estos factores han generado medidas de recolección y tratamiento de lixiviados, por distintos métodos, para mitigar el impacto ambiental que han generado. Se han implementado tecnologías para su recolección, también la impermeabilización de los fondos de los rellenos, para alivianar sus efectos en las aguas subterráneas y fuentes hídricas cercanas, como el impacto en los suelos (Franco & Guiffo, 2012).

5.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS LIXIVIADOS

Las características de los lixiviados van ligadas a las propiedades de los residuos depositados y de las condiciones que en el predominan, como la temperatura, humedad, capacidad del suelo para remover contaminantes y la calidad y cantidad del agua que entra en contacto con la masa de los residuos dispuestos (Flórez, 2007).

La composición química de los lixiviados variará según la antigüedad del vertedero (diferencias enunciadas en la tabla 1), y la fase en la que se encuentre el lixiviado en el momento del muestreo. Si se toman las muestras en la fase ácida, por consiguiente se tendrá un pH bajo, y las concentraciones de DBO₅, COT, DQO, nutrientes y metales pesados serán altas; mientras si se toma la muestra en fase de fermentación el pH estará de 6,5 a 7,5 y los valores de DBO₅, COT, DQO, nutrientes y metales pesados serán bajos (Flórez, 2007).

5.4 PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS

Los lixiviados por las características que se enunciaron anteriormente requieren de un tratamiento para su vertimiento a un acuífero o a un suelo específico. Estos pueden ser removidos del relleno sanitario para un tratamiento fisicoquímico, biológico, o por membrana.

Las alternativas de tratamiento de lixiviados se pueden categorizar de acuerdo con varias características como por ejemplo a los niveles de tratamiento que se logren con cada una de ellas, o por el tipo de contaminación que puedan remover (Giraldo, 2001). Entre las opciones de tratamiento que se pueden contemplar está la reutilización de estos para mantener el contenido de humedad en los rellenos sanitarios, el tratamiento in situ (aerobio, anaerobio o fisicoquímico), la descarga a plantas de tratamiento municipales, o una combinación entre las anteriores (Méndez *et al.*, 2009).

Los métodos fisicoquímicos implican el consumo de reactivos como coagulantes, siendo los más utilizados FeCl₃, Fe₂ (SO₄)₃, Al₂ (SO₄)₃ y Ca (OH)₂. Los métodos biológicos aerobios o anaerobios son efectivos para la remoción de materia orgánica y nitrógeno sólo cuando el índice de biodegradabilidad del lixiviado (DBO₅/DQO) es mayor a 0.5, es decir para un lixiviado joven (Donneys, 2013).

Según Flórez (2007), existen también métodos de tratamiento de lixiviados que incluyen procesos de membrana, adsorción por carbón activado y foto-oxidación. Se han realizado distintas investigaciones en donde se busca concluir qué proceso es más efectivo para cada tipo de lixiviado, Kan & Hwang (2000); Renou *et al.*, (2008), mencionan que los tratamientos biológicos son más efectivos en los lixiviados jóvenes, por su alta biodegradabilidad. Mientras que los procesos fisicoquímicos son más eficientes para los lixiviados antiguos.

5.4.1 Proceso combinado de Electrodisolución-Floculación – ELECTROFLOX®

La electrodisolución y floculación es un proceso de operaciones secuenciales de producción electroquímica de hierro como coagulante y su posterior floculación que hace parte del proceso conocido como ELECTROFLOX®, desarrollado y patentado por investigadores de la Universidad del Valle en el año 2010.

Es un método electrolítico que implica tres etapas: una electrodisolución, una oxidación y una floculación; el orden de estas etapas puede variar de acuerdo a las condiciones de experimentación. El proceso puede ser in-situ, si se realiza la electrodisolución directamente en el agua a tratar, o ex-situ, si la electrodisolución se lleva a cabo en un efluente distinto. En la electrodisolución se realiza una dosificación de hierro, mediante una vía electrolítica, en el efluente que se somete al tratamiento; en esta etapa se pretende alcanzar concentraciones específicas de Fe^{+2} en la muestra variando las condiciones de densidad de corriente, pH inicial y tiempo de residencia. Posteriormente se produce una oxidación sencilla con H_2O_2 , para oxidar el Fe^{+2} remanente y por consiguiente producir Fe^{+3} , que es un mejor agente coagulante debido a su menor solubilidad; en esta etapa, la relación $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{+3}$ es la variable controlada con el fin de disminuir la carga orgánica total de la muestra tratada. Por último, se realiza una floculación con un agente que precipita tanto el hierro disuelto como el material orgánico; un análisis de color y turbidez de la muestra tratada mide indirectamente la eficiencia de esta etapa. La importancia del proceso radica en el bajo costo tanto de los electrodos como de los agentes químicos que se adicionan para promover la floculación y la oxidación. Además, ninguno de los agentes requeridos es tóxico y no se forman compuestos clorados como en otras técnicas de oxidación (Puenguenán & Segura, 2013).

El proceso ELECTROFLOX® es un procedimiento empleado para reducir la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Carbono Orgánico Total (COT), y los sólidos totales de aguas residuales. Este tipo de tecnología no solo se emplea en aguas residuales de tipo industrial, debido a que su campo de aplicación también se puede encontrar en: a) drenaje ácido de minas de carbón, b) vinazas producidas en destilerías de etanol, c) lixiviados procedentes de los vertederos de residuos sólidos urbanos, d) aguas contaminadas con tintas flexográficas o colorantes textiles, e) vinazas producida en plantas de producción de levadura. Además el proceso ELECTROFLOX® se caracteriza porque consume poca energía eléctrica ($<1,5 \text{ kWh/m}^3$) debido a las bajas densidades de corriente que emplea, lo que lo sitúa de manera ventajosa frente a un proceso electrocoagulación convencional. De igual forma la dosificación de coagulante (hierro o aluminio) a través de esta ruta genera menos costos que la dosificación con sales inorgánicas a diferencia de un proceso fisicoquímico como coagulación-floculación. En la etapa separada de floculación se controla la formación de flóculos mediante la adición de un agente coadyuvante y un control de pH apropiado.

A diferencia de otros procesos de tratamiento de oxidación conocidos como ozono, electro-oxidación, Fenton, entre otros, esta tecnología emplea la oxidación como tratamiento final opcional para eliminar la carga de desechos orgánicos e inorgánicos y en consecuencia reducir el consumo de agentes oxidantes al mínimo y debido a que es un proceso físico-químico, las variaciones en las características del efluente alimentado no afectan sensiblemente la eficiencia de la técnica como es el caso con los tratamientos biológicos (WIPO, s.f.). La **Figura 1** presenta el esquema del proceso ELECTROFLOX®.

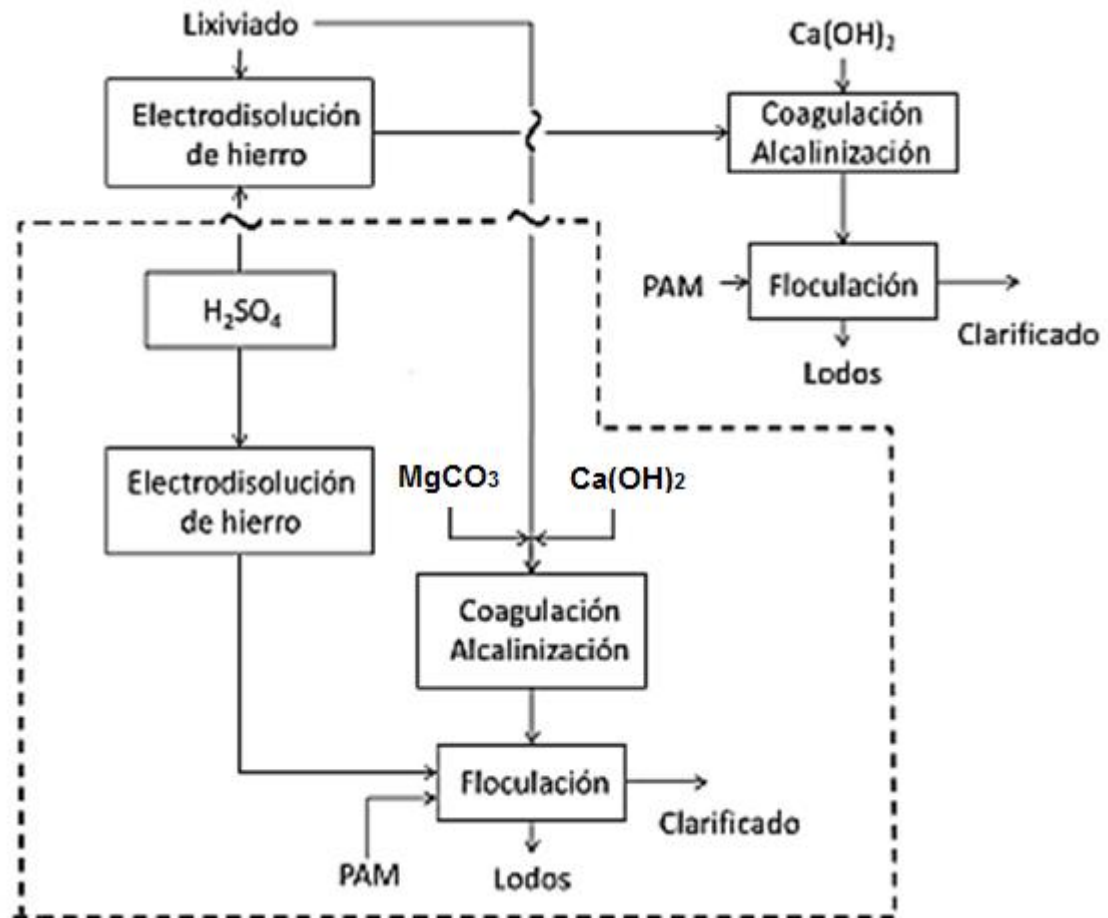


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso ELECTROFLOX®

Fuente: Donneys (2013)

5.4.2 Heterocoagulación

En la heterocoagulación se adiciona cal y carbonato de magnesio para la agregación de las especies insolubles presentes en el lixiviado al igual que las especies de hierro, también llamada como la coagulación simultánea de varias especies, por otra parte, la oxidación de Fe^{+2} a Fe^{+3} genera especies menos solubles (Paz-Pino, Barba-Ho, & Marriaga-Cabral, 2014).

5.4.3 Variables que influyen en el proceso

- **pH:** La floculación ve afectada por el pH debido las partículas coloidales poseen cargas positivas a pH bajo y cargas negativas a pH alto (Puenguenán & Segura, 2013).
- **Temperatura:** Al incrementar la temperatura hay un incremento en la eficiencia de la corriente, por ende, las reacciones proceden con mayor velocidad.
- **Densidad de corriente:** La densidad de corriente determina qué tan rápido van a ocurrir las reacciones, debido a que a través de los electrodos se provoca la disolución de los iones metálicos, que reaccionan con los radicales OH^- en el agua; como también, la producción de burbujas de hidrógeno, en el cátodo, y de oxígeno, en el ánodo (Puenguenán & Segura, 2013).

5.5 LODOS DE TRATAMIENTOS DE LIXIVIADOS

La mayoría de los procesos para el saneamiento de aguas de desecho producen partículas sólidas sedimentables y decantables, constituidas por minerales inertes y materiales orgánicos fermentables, sobre los que se absorben y adsorben sales minerales y algunos patógenos (bacterias, parásitos, etc.) que se encuentran en las aguas de desecho (Gamrasni, 1985; citado por Robledo, 2010). Estos materiales se separan del agua y forman un lodo biológicamente inestable (lodos residuales), con alto contenido de humedad. Cuando este lodo residual recibe un tratamiento físico, químico o biológico para estabilizarlo y reducir su potencial contaminante, se le denomina biosólido (US EPA 1993; NOM-004-SEMARNAT-2002) (Robledo *et al.*, 2010).

Los tratamientos fisicoquímicos como: coagulación, floculación, agotamiento, precipitación química, adsorción y oxidación química (Donneys, 2013), además de tener un costo asociado a los reactivos que se deben emplear, tienen también otra dificultad y es que a través de estos tratamientos que se realizan a los lixiviados, se genera un lodo, que deberá disponerse de forma adecuada (Méndez *et al.*, 2009).

5.6 ESTUDIOS DE TOXICIDAD

Las sustancias ecotóxicas son aquellas que, al ser liberadas en el ambiente, producen un impacto ambiental significativo, de naturaleza reversible o irreversible, debido a procesos conocidos de toxicidad como la bioacumulación, la persistencia y la residualidad. Por consiguiente, la ecotoxicología no se enfoca a que cierto agente haga desaparecer a la mitad de los individuos de una especie, sino a determinar el impacto ecológico que produce, ya que muchos contaminantes no tienen efectos sobre los organismos individualmente, pero aun así su consecuencia ecológica es digna de tenerse en cuenta (Escobar, 2009; citado por Pinto & Sánchez, 2011) (Groth *et al.*, 2016).

Los estudios de toxicidad son una herramienta de gran utilidad en el campo de la ecotoxicología para evaluar el efecto de los agentes tóxicos a los ecosistemas acuáticos y terrestres, estableciendo relaciones de concentración-respuesta bajo condiciones controladas. Los bioensayos se han utilizado en estudios

ecotoxicológicos de lixiviados generados en rellenos sanitarios sin tratar y tratados. Estos estudios indican que los lixiviados de un relleno sin tratar a menudo son tóxicos, aunque el grado de toxicidad depende de la naturaleza de los lixiviados, el organismo de ensayo y el sistema de ensayo empleado (Kjeldsen *et al.*, 2002).

Para la evaluación de la toxicidad de un residuo, se han considerado seis pruebas diferentes: TCLP, SPLP, bioluminiscencia bacterial, quimioluminiscencia bacterial, toxicidad aguda para *Daphnia* y ensayo de inhibición de algas. Estos ensayos, como se ha mencionado anteriormente estudian dos enfoques diferentes de la toxicidad de un residuo, aquel referido a la salud humana bien sea en forma directa o indirecta, que incluye los ensayos de TCLP, SPLP, bioluminiscencia bacterial y quimioluminiscencia bacterial, y aquel que involucra la toxicidad hacia el medio ambiente, específicamente la toxicidad acuática, que se basa en los procedimientos de toxicidad aguda para *Daphnia* y ensayo de inhibición de algas (IDEAM, 2007).

La población de organismos escogida debe encontrarse en buenas condiciones de salud, desde luego deben ser aclimatados previamente a las condiciones del ensayo, la posibilidad de controlar muchas de las variables hace posible la eliminación de las fluctuaciones propias de las condiciones naturales, que generalmente oscurecen o interfieren con la finalidad principal del estudio llevado a cabo. Las condiciones de los cultivos y los ensayos deben estar altamente estandarizadas para permitir la comparación de los resultados. Adicionalmente, se debe contar con un grupo de estos organismos como control, es decir, que no se expongan al tratamiento (Díaz, 2004; citado por Muñoz, 2017). En estos ensayos de toxicidad se miden y se registran principalmente los efectos biológicos como mortalidad, inmovilidad, inhibición del crecimiento poblacional o alteración del comportamiento en los organismos expuestos, estos datos permiten efectuar cálculos estadísticos para determinar la concentración letal 50 [LC50] e inhibición [CI50], que representan la concentración del toxico que es letal o inhibe el 50% de la población expuesta al tratamiento (Ramírez *et al.*, 2007; citado por Muñoz, 2017).

6 ANTECEDENTES

6.1 CASO DEL VALLE DEL CAUCA

El Valle del Cauca gestiona la disposición final de los residuos sólidos generados por medio de los rellenos sanitarios, estos están ubicados en diferentes sitios del departamento. Para dicha disposición actualmente se cuenta con dos rellenos sanitarios legales: Yotoco y Presidente, además del vertedero de Navarro. Se toma en cuenta este último, ya que, al enfocarse en el interés de generación de lixiviados, a pesar de que se encuentre actualmente clausurado, sigue generando lixiviados.

En el caso de los rellenos de Yotoco y Presidente, se tiene estimado un tiempo de vida útil de 31 años, y para el tratamiento de sus lixiviados se tienen entre 5 y 7 lagunas de lixiviados, para Presidente se cuenta con una planta de ósmosis inversa que está en funcionamiento actualmente (Donneys, 2013). La composición de los residuos sólidos en el caso del Relleno de Presidente como en los otros, varía en función de distintos factores, entre los que destacan los hábitos de vida de la población, los factores ambientales y su ubicación geográfica (Aulestia, 2012).

El relleno sanitario regional Presidente, funciona desde el año 1998 y ocupa actualmente una extensión de diecinueve punto ocho (19.8) hectáreas, recibiendo diariamente quinientas setenta (570) toneladas de residuos domiciliarios que le aportan varios municipios del Valle y empresas, este es un relleno diseñado para operar con el sistema de terrazas de llenado por niveles, en el cual se disponen principalmente residuos sólidos domiciliarios y en una baja proporción, residuos industriales no peligrosos (Alcaldía de Buga, 2011; Ramírez, 2014). De acuerdo con un estudio realizado en el año 2008 por Bugaseo S.A ESP, empresa operadora del relleno sanitario Presidente (San Pedro), donde se disponen los residuos sólidos de 18 municipios del Valle del Cauca, de la cantidad de residuos sólidos dispuestos se tiene que aproximadamente el 77% es material orgánico y se genera entre 2 y 5 L s⁻¹ de lixiviado (Bugaseo, 2009 citado por Cerón, 2014). La carga contaminante del lixiviado del relleno es biodegradable, aunque los niveles de mercurio, cromo hexavalente (Cr⁶⁺) y fenol, sobrepasan la norma de vertido establecida en el Decreto 1594 de 1984 (Donneys, 2013).

En el relleno sanitario regional de Presidente, actualmente se cuenta con varias unidades para el tratamiento del lixiviado, entre las cuales se encuentran una laguna algal de alta tasa, un tratamiento primario intermedio del lixiviado por medio de un biorreactor laguna anaerobia de alta tasa (BLAAT®), una planta de ósmosis inversa, y el tratamiento del lixiviado por medio de ELECTROFLOX®. Otro estudio realizado por Aulestia (2012), muestra que el lixiviado de Presidente además de poseer los contaminantes anteriormente mencionados, posee cadmio (Cd⁺²) y plomo (Pb⁺²).

Tabla 2.Características del Lixiviado del relleno sanitario regional de Presidente para los años 2010 y 2011

PARÁMETRO PARA LX CRUDO	2010(*)							2011(**)				
	feb- 23	mar- 01	mar- 08	mar- 15	mar- 23	mar- 29	abr- 05	feb- 23	abr- 26 (1)	abr- 26 (2)	abr- 28	jun- 03
Edad (años)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
pH (UND)	-	-	-	-	-	8.6	8	-	-	-	-	-
DQO (mg O ₂ .L ⁻¹)	5367	6141	6537	6811	6537	7228	6000	5367	5367	6141	6537	6811
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DBO ₅ (mg.L ⁻¹)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmio(mg.L ⁻¹)	<0.53	<0.53	<0.53	<0.53	<0.53	<0.53	<0.53	<0.53	-	-	-	-
Cromo VI (mg.L ⁻¹)	<2.87	<2.87	<2.87	<2.87	<2.87	<2.87	<2.87	<2.87	-	-	-	-
Mercurio(µg.L ⁻¹)	<0.48	<0.48	<0.48	14	<0.48	<0.48	50.6	<0.48	-	-	-	-
NTK (mg.L ⁻¹)	2.297	2.016	1.727	1.962	1.990	1.772	1.757	2.297	-	-	-	-
Nitrógeno amoniacoal (mg.L ⁻¹)	1.835	1.856	1.995	1.883	1.712	1.425	1.572	1.835	-	-	-	-
Plomo (mg.L ⁻¹)	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	-	-	-	-

Fuente: Aulestia (2012)*; Caracterización de los lixiviados en estudio del 2011, citado por Donneys (2013) **.

Tabla 3. Características del Lixiviado del relleno sanitario regional de Presidente para el 2014

PARÁMETRO PARA LX CRUDO	Estudio del 2014
pH (UND)	5-10
DQO (mg O ₂ .L ⁻¹)	8,100
DQO filtrada (mg.L ⁻¹)	6193.1
DBO ₅ (mg.L ⁻¹)	5519.9
Cadmio(mg.L ⁻¹)	2714.3
Mercurio(µg.L ⁻¹)	5.5
Nitrógeno amoniacoal (mg.L ⁻¹)	2005.5
Alcalinidad Total (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	33.3
CE (mS.cm ⁻¹)	1264.1
Sulfatos (mg.L ⁻¹)	24.3
Hierro (mg.L ⁻¹)	275.01
Fosfatos (mg.L ⁻¹)	21.3
DBO ₅ /DQO (mg.L ⁻¹)	46.4
COD (mg.L ⁻¹)	0.43

Fuente: Ramírez (2014)

Acorde con los datos presentados en la **Tabla 2** y **Tabla 3**, obtenidas de los distintos estudios realizados en el 2010, 2011 y 2014, se definió un índice de biodegradabilidad (DBO₅/DQO) mayor a 0,4. De acuerdo con este índice, el lixiviado crudo del relleno sanitario Presidente se clasifica como joven, mientras la muestra 1 del 26 de abril de 2011 corresponde a un lixiviado de edad intermedia (Donneys, 2013).

6.2 TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS

En cuanto a las diferentes tecnologías que se han empleado en el tratamiento de los lixiviados, se tiene gran variedad, y se puede decir que todas las tecnologías empleadas para el tratamiento de agua residual se han empleado para el tratamiento de lixiviados (Giraldo, 2001), su elección va ligada a la capacidad económica, espacio disponible, y operación de las distintas tecnologías. En cuanto al uso de ELECTROFLOX® para el tratamiento de lixiviados se encuentra la patente producida por la Universidad del Valle (Colombia Patente nº 20130153509, 2013) aplicada en el relleno sanitario regional, sin embargo, se encontró que esta tecnología ha sido aplicada a las aguas residuales industriales. La **Tabla 4** presenta información acerca de los tratamientos empleados para lixiviados.

Tabla 4. Antecedentes de tecnologías de tratamiento para lixiviados

Tecnología de Tratamiento	Lugar de implementación	Descripción de la tecnología	Resultados obtenidos
Tratamiento primario de lixiviado intermedio de relleno sanitario mediante biorreactor laguna anaerobia de alta tasa (BLAAT®): evaluación del desempeño a escala piloto en ambiente tropical (Ramírez, 2014).	Municipio de San Pedro, Valle del Cauca, Colombia	El BLAAT® tiene como objetivo principal la reducción de contenido de sólidos y de materia orgánica.	La eficiencia de reducción en DQO filtrada tuvo un promedio del 10% y la eficiencia en términos de COD tuvo una de eliminación de 8,8%, lo cual está acorde con lo reportado por la literatura.
Evaluación del desempeño de humedales construidos subsuperficial de flujo horizontal sembrados con especies nativas tropicales para la eliminación de Cr (vi) y Cd (ii) de lixiviado de relleno sanitario (Cortés, 2014).	Municipio de San Pedro, Valle del Cauca, Colombia.	Se construyeron en concreto con paredes verticales cuatro HC-FSS a escala piloto que funcionaron en paralelo con una pendiente longitudinal de 1%. Se utilizaron tres especies de plantas: <i>Gynerium sagittatum</i> -Gs (caña brava), <i>Heliconia psittacorum</i> -He (heliconia) y <i>Colocasia esculenta</i> -Ce (oreja de burro).	El sistema de humedales construidos mostraron ser una alternativa para la fitorremediación de lixiviados de rellenos sanitarios de edad intermedia con un buen potencial de eliminación de materia orgánica, nutrientes y metales (Cr (VI), Cd (II) y Fe).
Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados (Méndez <i>et al.</i>, 2009).	Mérida, México	Se presentan los resultados de cuatro tratamientos fisicoquímicos aplicados a los lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Mérida: coagulación-floculación, flotación, adsorción y oxidación Fenton.	El tratamiento más eficiente fue el proceso de oxidación obteniendo remociones del 78 % para la DQO y 87 % para COT.
Fotofenton solar (Vilar <i>et al.</i>, 2010 citado por Franco & Guiffo, 2012).	Portugal	Aplicando fotofenton solar a pH entre 2,6y 2,9 con un exceso de 500ppm de H ₂ O ₂ , el tratamiento se complementó aplicando métodos biológicos.	La DQO disminuyó un 60%.

Tecnología de Tratamiento	Lugar de implementación	Descripción de la tecnología	Resultados obtenidos
Descontaminación de lixiviados pretratados, por Electrodisolución y floculación, aplicando oxidación Fotofenton (Franco & Guiffo, 2012).	Realizado en la ciudad de Cali-Colombia, en las instalaciones de la Universidad del Valle.	Se implementó en el lixiviado un pre-tratamiento de electrodisolución, luego se realizó una filtración para así minimizar la turbidez del lixiviado, para su posterior tratamiento con Fotofenton.	Se obtuvo una reducción cercana a 49 % en COD, 42 % en DQO, 33% en DBO ₅ , 86% de turbidez y 81% de color, pero se incrementó 43% la concentración de nitrógeno amoniacal.
Proceso ELECTROFLOX® en el tratamiento de aguas residuales de curtiembre (Puenguenán & Segura, 2013)*	Realizado en la ciudad de Cali-Colombia, en las instalaciones de la Universidad del Valle.	El proceso implicó tres etapas: primero una electrodisolución in-situ con electrodos de acero al carbón, luego una oxidación con peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) y finalmente una floculación con poliacrilamida (PAM).	Los máximos porcentajes de reducción de turbidez, DQO y COT obtenidos mediante el proceso ELECTROFLOX® fueron de 99%, 96% y 66%.
Uso combinado de electrodisolución y floculación para el tratamiento de lixiviados (Donneys, 2013)	Municipio de San Pedro, Valle del Cauca, Colombia.	Se evaluó un proceso compuesto por una etapa de electrodisolución de acero al carbono y una etapa de floculación como alternativa de tratamiento para el lixiviado.	Se encontró que empleando 300 mg.L ⁻¹ de magnesio y 59.37 mg.L ⁻¹ de hierro se alcanzaron reducciones promedio de turbidez, color, DQO y COD en el lixiviado del 99.7%, 76.2%, 81.8% y 37.2%; además de reducciones de hierro y magnesio superiores al 94%.
Tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU por procesos de membranas (García <i>et. al.</i>, 2008)	Onda, España	El tratamiento del lixiviado se basó en la combinación un tratamiento físico-químico del lixiviado, filtrando el mismo por un sistema de filtros de cartucho previo a una ultrafiltración (UF), y por último sometido a un proceso de ósmosis inversa (OI) en dos etapas.	Los rendimientos medios de eliminación fueron 98.67 % para la conductividad, 99.40% en cuanto a eliminación de DQO y 99.85 % para el nitrógeno amoniacal.

(*) El tratamiento que se aplicó no fue al lixiviado sino a un agua residual con composición diferente.

Acorde con los estudios evidenciados anteriormente, se puede afirmar que el tratamiento electroquímico o a fines, presentó una remoción de DQO mayor al 40%, y en algunos estudios mayores al 90%. Lo cual implica que la tecnología tiene un alto rendimiento en la eliminación de materia orgánica, y que es factible emplearla en aguas residuales con altos valores de la misma.

Para el caso de ELECTROFLOX® otros parámetros con altos porcentajes de remoción para ésta tecnología fueron el color, turbidez, sales, hierro y magnesio. En cuanto a nutrientes se encontró que la tecnología generó una remoción del nitrógeno amoniacal, combinándola con procesos de filtración.

Al emplearse la tecnología como pretratamiento e implementándose como método de oxidación el Fotofenton se encontró un incremento de la concentración de nitrógeno amoniacal (Franco & Guiffo, 2012). Por otra parte, para una mayor remoción del nitrógeno amoniacal, se han utilizado sales de magnesio en el tratamiento de lixiviados crudos y pretratados, a través de la formación de estruvita. En un estudio acerca de la

precipitación de estruvita para el tratamiento de un lixiviado joven se alcanzaron reducciones del 92% y el 12% para N-NH₃ y DQO respectivamente a pH=8.42 (Kabdasli, et al., 2008; Citado por Donneys, 2013).

Algunas investigaciones reconocen como superior el desempeño de la electrocoagulación frente a la coagulación química en el tratamiento de lixiviados, debido a que los cationes electrogenerados presentan mayor capacidad de adsorción que los provenientes de sales de hierro o aluminio (Mariam & Nghiem, 2010; Veli, et al., 2008; citados por Donneys, 2013).

6.3 ESTUDIO DE LODOS PROVENIENTES DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS

A partir de una búsqueda de información con base a las características o la calidad de los lodos que se generaron (como subproductos) por el tratamiento de los lixiviados, mediante el tratamiento físico-químico y electroquímico de éstos se presentan los datos enunciados en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Estudios de los lodos generados por tratamientos de Lixiviados.

Autores	Tecnología	Tipo de Lixiviado	Lugar	Escala	Metodología	Lodos
Morozesk et al, 2016	Electrocoagulación	Lixiviado estabilizado (Antiguo)	Brasil	Laboratorio	El proceso de electrocoagulación (CE) se realizó utilizando un Becker de 4 L (como reactor), un electrodo de acero inoxidable y un agitador mecánico. Se usó una fuente de alimentación de corriente continua (ICEL, PS-6000) para proporcionar corriente (densidad de corriente: 207 A/m ² ; I: 9A; tiempo de reacción: 1 h).	El proceso de EC demostró ser un tratamiento efectivo debido a la posibilidad de mejorar las características adversas del efluente y producir lodo con potencial para ser usado como aditivo para el suelo. A pesar de la baja citotoxicidad, el residuo presentó efectos genotóxicos y mutagénicos
Ricorde & Djelal (2014)	Electrocoagulación	Lixiviado Joven	Francia	Piloto	El estudio consistió en emplear una celda electrolítica equipada con dos placas-electrodos paralelas, después se analizaron las fases de velocidad de sedimentación del lodo.	El estudio arrojó altas velocidades de sedimentación del lodo cuando se empleó un corto tiempo en la electrocoagulación (30min). De acuerdo con la Ley Faraday, el menor volumen de lodo (0.2L) se obtuvo con el tiempo más corto de electrocoagulación, donde la fase entre el lodo y el sobrenadante se marcó fuertemente.

Autores	Tecnología	Tipo de Lixiviado	Lugar	Escala	Metodología	Lodos
Bouhezila, <i>et al.</i> (2011)	Electrocoagulación	Lixiviado Joven	Argelia	Laboratorio	Se emplearon electrodos de Fe y Al para remover DQO, turbidez, color y nitrógeno total de lixiviados (DQO inicial 28,200–34,200 mg/l, DBO5/DQO = 0.09–0.12)	La producción de lodos se incrementó en un 30% con electrodos de Aluminio, respecto al uso del Electrodo de hierro.
Renou, <i>et al.</i> (2008)	Precipitación con Cal-Prefiltración-Ósmosis inversa	Lixiviado estabilizado (Antiguo)	Francia	Piloto	El proceso combinado consistió en una precipitación química del lixiviado, seguido de una filtración y una fase final compuesta por la ósmosis inversa.	Los lodos generados por el pretratamiento y el filtro vacuum mostraron características de estabilidad, los obtenidos en el concentrado de ósmosis inversa no fueron considerados estables.
Veli, <i>et al.</i> (2008)	Coagulación química y Electrocoagulación	Lixiviado antiguo	Turquía	Piloto	Fe y Al para el tratamiento de lixiviado crudo y diluido (DQO inicial 4,022.5 mg/l).	Lixiviado crudo: 90%, 99% y 68% de la DQO, Color y COT y disminución en producción de lodos al utilizar EC (1,500 mg/l de Fe ²⁺). 56% ~ 70% y ~50% de la DQO, Color y COT al utilizar coagulación química (~1,400 mg/L de Fe ²⁺). El Fe ²⁺ mostró mayor capacidad de adsorción que el Fe(OH) ₃ , obtenido de la hidrólisis de FeSO ₄ .

Fuente: Morozesk, (2016); Ricorde & Djelal (2014); Bouhezila *et al.* (2011), Renou *et al.* y Veli *et al.* (2008)

En el caso de estudios similares regionales que se han realizado en el tema de los lodos provenientes del tratamiento de lixiviados, se encontró un estudio realizado por Flórez (2007) con el lixiviado proveniente del botadero clausurado de Navarro, ubicado dentro del municipio de Cali, en el departamento del Valle del Cauca. El estudio consistió en la caracterización de los lodos provenientes del tratamiento de coagulación-floculación de los lixiviados, ensayo realizado en laboratorio, en donde se compararon dos tipos de coagulante (Cloruro férrico y Neutraolr).

Según los resultados obtenidos en el estudio, se observó que los lodos generados por el Neutraolr presentaron mayor concentración de sólidos totales, con respecto al otro coagulante, sin embargo el valor de dicho parámetro para ambos casos es elevado y denotó un gran potencial contaminante para transferir al

suelo si éstos lodos se llegasen a disponer o aprovechar de una forma incontrolada e inadecuada; adicionalmente se concluyó que los lodos generados debían ser sometidos a una estabilización previa a su aprovechamiento, ya que para ambos coagulantes el valor de humedad excedió el 95%. También se encontró que para ambos coagulantes se cumplen los límites establecidos en las normas nacionales e internacionales (México, Chile y E.U) para los metales pesados, categorizándose como lodos NO PELIGROSOS, por el contrario, para el caso de los parámetros microbiológicos, los lodos presentaron un valor elevado de Coliformes Fecales, limitando así las opciones para su aprovechamiento.

A partir de la revisión bibliográfica que se realizó, evidenciada en las **Tabla 4** y **Tabla 5**, se logró concluir que la información acerca de los lodos generados por los tratamientos de lixiviados es escasa, incluso en el mayor número de estudios ni siquiera se mencionan o se consideran en los resultados y análisis. Con base a esto, es necesario empezar a investigar sobre las características de dichos lodos, para conocer qué clase de impactos se pueden generar en el ambiente y la salud humana, como también conocer el manejo que se debe realizar en cuanto a su aprovechamiento, tratamiento y/o disposición final.

7 METODOLOGÍA

Este trabajo de grado hace parte del proyecto financiado por Colciencias, titulado “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE UNA PLANTA PILOTO PARA EL TRATAMIENTO PRIMARIO DE LIXIVIADOS POR ELECTROFLOX®” de la convocatoria 642 - 2013 LOCOMOTORA DE LA INNOVACIÓN PARA EL APOYO DEL DESARROLLO TECNOLÓGICO con número interno de radicación en la Vicerrectoría de Investigaciones (2830) – Universidad del Valle, que cuenta con la participación de los grupos de Investigación de Procesos Avanzados para Tratamientos Químicos y Biológicos (GAOX) y Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA).

La parte experimental del proyecto de investigación a nivel exploratorio se llevó a cabo en la planta piloto de ELECTROFLOX® ubicada en un relleno sanitario regional del departamento del Valle del Cauca (Colombia) en el periodo septiembre – diciembre de 2016. Los análisis fisicoquímicos fueron realizados en el laboratorio de Química Ambiental del Área de Ingeniería Sanitaria y Ambiental perteneciente a la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente - EIDENAR y el Laboratorio de Análisis y Procesos en Ingeniería Química (LAPIQ), de la Facultad de Ingeniería en la Universidad del Valle. Adicionalmente, algunos ensayos fueron realizados por el personal del Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales de la misma universidad y los parámetros microbiológicos se realizaron por parte del personal del laboratorio de CINARA ubicado en la planta de tratamiento de Agua Potable de Puerto Mallarino en Cali, Valle del Cauca.

El estudio se realizó en las siguientes etapas:

1. Reconocimiento del sitio y de la operación del sistema de tratamiento
2. Caracterización de los lodos y cuantificación de su producción
3. Evaluación de la calidad de los lodos mediante normativas, nacionales e internacionales
4. Valorización de los lodos generados

7.1 SITIO DE ESTUDIO

El sitio donde se llevó a cabo el estudio fue en las instalaciones del relleno sanitario regional de Presidente ubicado en el departamento del Valle del Cauca, Colombia (3°56'01.54" N y 76°26'26.05"O). El relleno sanitario opera desde el año de 1998 y recibe los residuos sólidos domésticos, comerciales e industriales no peligrosos de 18 municipios del departamento del Valle del Cauca con un promedio de 570 ton.d⁻¹ y genera un caudal de 2 a 5 L.s⁻¹ de lixiviados. Tiene un área de aproximadamente 21.4 Ha, es llenado por niveles y posee 9 celdas de disposición de residuos. En esta zona de estudio se evaluaron los lodos que se generaron en el primer sedimentador de una planta a escala piloto de ELECTROFLOX® para el tratamiento de lixiviado. En la **Figura 2**, se esquematiza la ubicación del relleno sanitario regional con una foto del mismo.

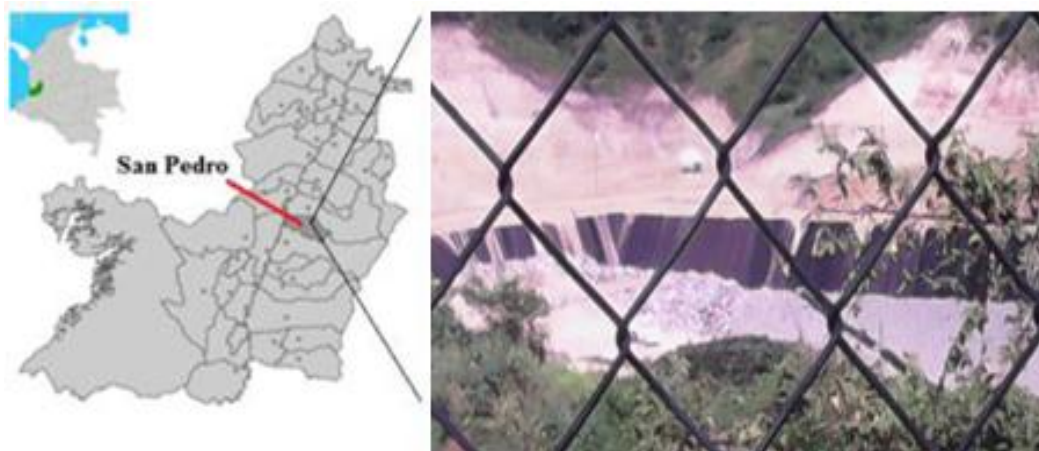


Figura 2. Ubicación del relleno sanitario regional (**Fuente:** Propia)

7.2 SISTEMA DE TRATAMIENTO

7.2.1 Descripción del proceso Electrofloxx®

La planta piloto para el tratamiento de lixiviados mediante el proceso ELECTROFLOXX®, implementada en el relleno sanitario cuenta con dos secciones de proceso, la primera es el reactor electroquímico donde se producen el coagulante-floculante (Sección 100) y la segunda es el tren de floculación-sedimentación (Sección 300) en donde ocurre la remoción de los contaminantes a través de los lodos generados. Además, incluye una sección de almacenamiento y dosificación de materias primas (Sección 200). La planta fue diseñada y construida con una capacidad de $1200 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ para tratar el lixiviado generado en el relleno sanitario.

La electrodisolución de los electrodos de hierro (sección 100) en el reactor electrolítico se lleva a cabo en una solución de ácido sulfúrico a una densidad de corriente de 2 mA/cm^2 . En la sección 300, el lixiviado crudo se mezcla con lechada de cal de alta densidad (35% en sólidos) para elevar el pH. Luego se mezcla con la solución de hierro que se bombea desde el reactor electrolítico para promover la coagulación. El lixiviado continúa en un tanque de floculación donde se agrega polímero aniónico para promover el crecimiento de los flóculos. El proceso continúa hacia un sedimentador laminar donde se produce la separación de las dos fases, una fase de lodo que se elimina por la parte inferior del sedimentador y el sobrenadante que se elimina por la parte superior y se almacena para alimentar el sistema de ósmosis inversa (Adaptado de Marriaga-Cabrales *et al.*, 2017).

El esquema del tratamiento ELECTROFLOXX® empleado en la planta de tratamiento de lixiviados (PTL) ubicada en el relleno sanitario y la ruta de operación de la que se tomó la muestra de lodo se presenta en la **Figura 3**.

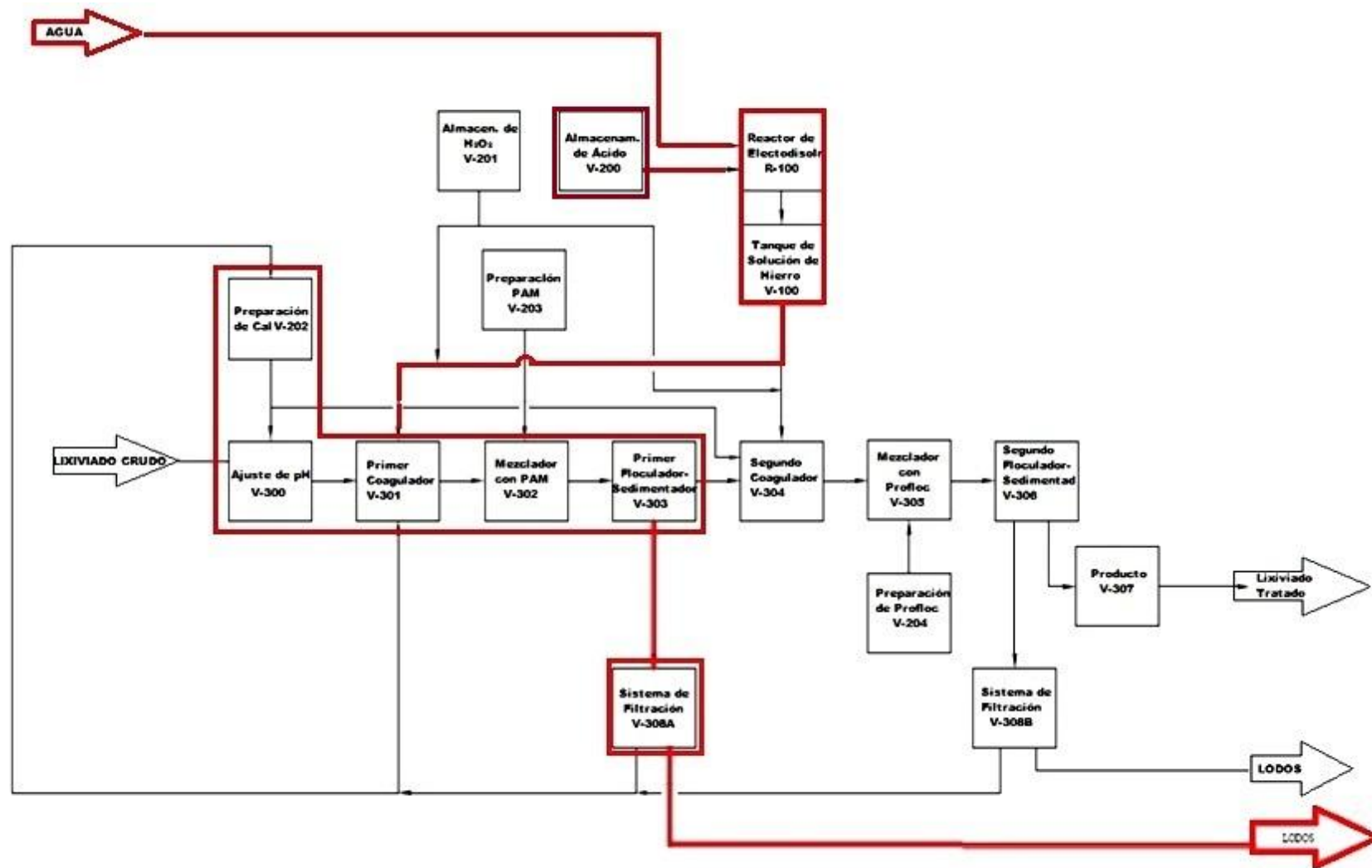


Figura 3. Esquema del proceso de tratamiento del ELECTROFLOX® al lixiviado

Es importante aclarar que la Planta de ELECTROFLOX® se encarga de tratar el lixiviado proveniente de la laguna auxiliar de mantenimiento del relleno la cual contiene lixiviado joven y viejo (ver **Figura 4**).



Figura 4. Laguna de lixiviado para alimentación Planta ELECTROFLOX® (**Fuente:** Propia)

7.2.2 Condiciones de operación de la planta piloto de ELECTROFLOX®

En la **tabla 6** se presenta las condiciones de operación empleadas para la planta piloto de ELECTROFLOX® ubicada en las instalaciones del relleno sanitario durante el periodo septiembre – diciembre de 2016.

Tabla 6. Condiciones de operación empleadas

Coagulación y floculación N° 1					
Coagulador N° 1 (V-300)		Coagulador N° 2 (V-301)		Floculador N° 1 (V-302)	
Volumen, L	350.5	Volumen, L	462.40	Volumen, L	23.16
Concentración lechada de cal, %	35	Relación Vfe/VLx	0.20	Concentración de PAM, ppm	1000
Concentración de cal, ppm	8000	Relación Vdil/VLx	0.25	Concentración de polímero, ppm	20
Agitación, rpm	60	Agitación, rpm	45	Agitación, rpm	100
Tiempo de residencia, min	33.96	Tiempo de residencia, min	37.53	Tiempo de residencia, min	1.85
Flujos de Entrada a la Planta					
Flujo de LX, L.h ⁻¹	600	Flujo de Fe, L.h ⁻¹	120	Flujo de Cal, L.h ⁻¹	19.2
Flujo de PAM, L.h ⁻¹	12				

La planta piloto empleada para el tratamiento del lixiviado del relleno sanitario regional se presenta en la **Figura 5** y en las **Figuras 6** y **7** el punto de acumulación de los lodos muestreados para los ensayos fisicoquímicos y microbiológicos.



Figura 5. Planta Piloto de ELECTROFLOX® para tratamiento del lixiviado



Figura 6. Zona de acumulación de lodos primer sedimentador (V-303)

7.3 CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS LODOS

7.3.1 Toma de la Muestra

La toma de la muestra de lodo se realizó del primer sedimentador de la planta piloto de ELECTROFLOX® ubicada en las instalaciones del relleno sanitario (ver **Figura 5**), previo proceso de filtración del lixiviado de la muestra que se depositaba en las canastillas de recolección. Es necesario aclarar que la muestra que se retiraba al final de la jornada de operación de la planta con ayuda del operario y se dejaba en las canastillas filtrando y secando a temperatura ambiente un día antes de ser almacenada y transportada hasta el laboratorio para sus respectivos análisis (ver **Figura 7**). Se llevó a cabo un muestreo simple, debido a que la recolección del lodo se realizó desde un punto específico, como se mencionó previamente.



Figura 7. Muestra de lodo recolectada del primer sedimentador

Debido a las condiciones de operación, la planta Piloto de ELECTROFLOX® no operó en régimen continuo, sino de forma intermitente tratando un caudal de lixiviado de 600 L.h⁻¹. El periodo de recolección de las muestras se llevó a cabo entre septiembre y diciembre de 2016, con un total de 8 muestras de lodo para realizar los respectivos análisis fisicoquímicos, microbiológicos y toxicológicos (1 por semana), con las frecuencias de análisis determinadas en la sección 7.3.4 del presente capítulo. El punto de recolección para la muestra fue el primer tanque sedimentador teniendo en cuenta que en este punto es donde se genera la mayor cantidad de lodo y se encuentra la mayor carga orgánica que se retira del lixiviado y que adicionalmente la planta estaba en fase de optimización de la primera etapa de floculación, razón por la cual se evaluó las características de estos lodos. Es importante aclarar que no se realizó la toma de muestra de lodo para el segundo sedimentador ya que al evacuar el lodo de esta unidad implicaba desocupar completamente el tanque y todo el lixiviado tratado saldría con él.

7.3.2 Preservación de la muestra

Para los análisis fisicoquímicos de ciertos parámetros como pH y conductividad, se realizó la toma de muestra en campo y posteriormente se procedió a realizar el análisis in situ (empleando una relación 1:1, es decir, 5 gramos de lodo en 5 mL de Agua destilada). La preservación y el análisis para los demás parámetros se realizó de acuerdo con los métodos establecidos en el Process Design Manual de la USEPA (1995), la resolución No. 0062 del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2007) y las recomendaciones del personal del Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales de la Universidad del Valle. En la **Tabla 7** se presenta el proceso de la recolección y preservación de la muestra para los parámetros a medir.

Tabla 7. Recolección y preservación de la muestra para los análisis del lodo

Parámetros para análisis	Recolección y preservación
Materia Orgánica, Sólidos, Humedad, Metales, Ecotoxicidad y microbiológicos	En recipientes de vidrio y plástico, se recolectó alrededor de 500 gramos de lodo y se preservó la muestra refrigerada a una temperatura $<4^{\circ}\text{C}$, para su posterior transporte y análisis. Para el caso de los parámetros microbiológicos, la toma de la muestra se realizó en un recipiente plástico esterilizado (aproximadamente 300 gramos).
Nitrógeno y Fosforo Totales	Se recolectaron alrededor de 100 gramos de lodo en frascos de vidrio y se preservó la muestra refrigerada a una temperatura $<4^{\circ}\text{C}$, con un adición de 0.5 mL de H_2SO_4 concentrado.
DQO Lixiviado (LX)	Se recolectó alrededor de 100 mL de lixiviado en frascos de vidrio y se preservó la muestra refrigerada a una temperatura $<4^{\circ}\text{C}$, con un adición de 0.5 mL de H_2SO_4 concentrado, colectando muestra de lixiviado a la entrada y salida de la planta piloto.

7.3.3 Preparación de la muestra

Para realizar los análisis de la muestra de lodo, primero se llevó a cabo un tratamiento preliminar que consistió en un secado a temperatura de 105°C y su homogenización mediante triturado con ayuda de un mortero (ver Figura 8).



Figura 8. Muestra de lodo secada a 105°C durante una hora

Fuente: Propia

Los metales fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica, previa digestión por medio de un proceso de combustión a 900°C (Para As, Pb, Ca, Fe, Mg) y adición de $\text{HNO}_3\text{-HCl}$ en una relación 1:1. En el caso de la digestión del Hg para su posterior lectura se realizó el calentamiento de la muestra a una temperatura no mayor a 90°C (para evitar la volatilización de este elemento) en baño María en una relación 3:1 para $\text{HNO}_3\text{-HCl}$ respectivamente. Para el Calcio, el Hierro, Magnesio y Plomo la lectura de la muestra la

realizo el personal del laboratorio de docencia de la Escuela de Ingeniería Química y en el caso de Arsénico y el Mercurio la lectura la realizo el personal del Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales, siguiendo los procedimientos de los métodos normalizados para análisis de agua y agua residual (APHA *et al.*, 2012) y con la norma EPA-SW 846 métodos de análisis para evaluar residuos sólidos (USEPA, 1996).

7.3.4 Características fisicoquímicas y microbiológicas del lodo

La caracterización de las muestras de lodos se realizó mediante la determinación de los parámetros fisicoquímicos tales como el pH, conductividad, % humedad, contenido de materia orgánica (%), nitrógeno total y fósforo total, según los métodos establecidos en el Process Design Manual de la USEPA (1995) y los metales exigidos en el Decreto 4741 del 2005 para RESPEL, Arsénico (As), Plomo (Pb) y Mercurio (Hg) los cuales se analizaron siguiendo lo establecido en los métodos estándar de aguas residuales según APHA *et al.*, (2012). Los parámetros analizados se mencionan a continuación en la siguiente frecuencia propuesta durante el desarrollo de la fase experimental (ver **Tabla 8**).

Tabla 8. Parámetros de muestreo para análisis de calidad de los lodos del Lixiviado

Parámetro	Frecuencia muestreo	Método de análisis	Total muestras
^a pH	Semana 1, 2, 3, 5, 6 y 7	Potenciométrico	6
^a Conductividad Eléctrica	Semana 1, 2, 3, 5, 6 y 7	STM – 2510	6
^a Humedad	1/semanal	Gravimetría	8
^a Materia Orgánica (B.S.)	1/semanal	Walkley& Black	8
^a DQO	Semana 1, 2, 3, 5, 7 y 8	Reflujo Abierto, Volumetría	8
^b Fosforo Total (B.S.)	1/semanal	Espectrofotometría Ácido Ascórbico - Molibdato	8
^a N-Total (B.S.)	1/semanal	Volumetría – Kjeldahl	8
^a Sólidos Totales	1/semanal	Gravimetría	8
^a Sólidos Totales Volátiles	1/semanal	Gravimetría	8
^a Calcio (B.S.)	Semana 3, 4, 5, 6, 7 y 8	A.A Llama	6
^a Hierro (B.S.)	Semana 3, 4, 5, 6, 7 y 8	A.A Llama	6
^a Magnesio (B.S.)	Semana 3, 4, 5, 6, 7 y 8	A.A Llama	4
^b Arsénico (B.S.)	Semana 3, 5, 7 y 8	A.A Llama	4
^a Plomo (B.S.)	Semana 3, 4, 5, 6, 7 y 8	A.A Llama	6
^b Mercurio (B.S.)	Semana 3, 5, 7 y 8	A.A. Vapor Frío	4
^a Preparación de muestras	1/semanal	Digestión Ácida	8
^c Coliformes fecales	Semana 3, 7 y 8	Filtración por membrana	3
^c Coliformes Totales	Semana 3, 7 y 8	Filtración por membrana	3
^c E. Coli	Semana 3, 7 y 8	Filtración por membrana	3
^c Huevos de helmintos	Semana 3, 7 y 8	Bilenger	3
^b Ecotoxicidad (Daphnia Pulex)	Semana 3, 7 y 8	RES.0062 IDEAM/2007	3

^a Ensayos propios, ^b Ensayos realizados por el personal de LARA, ^c Ensayos realizados por el personal de CINARA, ^d Ensayos realizados por el personal del Laboratorio de Ingeniería Química

Parámetros como el Calcio, el Hierro y el Magnesio se midieron en las muestras de lodo debido a que el proceso ELECTROFLOX® comprende la etapa de electrodisolución acoplada con heterocoagulación de especies insolubles de hierro, calcio y magnesio; y que por lo tanto se esperaba que estos componentes se presentaran en las muestras de lodo. Para determinar la ecotoxicidad del lodo generado mediante el

tratamiento ELECTROFLOX® al lixiviado del relleno sanitario, se realizaron ensayos de toxicidad aguda empleando como organismo indicador *Daphnia pulex* para las muestras de lodos recolectadas en las semanas 3, 7 y 8 de muestreos previa toma, refrigeración y transporte de muestra al Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales (LARA) de la Universidad del Valle.

Para la medición de los metales pesados también como referencia se empleó el resumen de datos para 2015 sobre la lista de sustancias peligrosas de la ATSDR, DIVISION OF TOXICOLOGY & HUMAN HEALTH SCIENCES. En este estudio sólo se midieron Arsénico, Plomo y Mercurio, debido a que son los elementos más peligrosos para el medio ambiente y la salud humana por los impactos negativos que pueden generar si no se tiene cuidado con ellos. También se tuvo en cuenta la normativa colombiana de biosólidos (Decreto 1287 del 10 de julio de 2014), que resalta metales pesados y parámetros microbiológicos. Los demás parámetros mencionados en la tabla anterior se midieron con base a revisión bibliográfica de caracterización de lixiviados y lodos procedentes de PTAR y de lixiviados y de mutuo acuerdo con la discusión de los directores del trabajo de grado.

Sólo se midieron los parámetros mencionados en la **Tabla 8** ya que el presupuesto destinado para este proyecto se convierte en un factor limitante en la elaboración del mismo y la frecuencia de los parámetros se ha asignado con base a la relevancia que pueden tener cada uno de ellos en el desarrollo de esta etapa de investigación y los costos por análisis (disponibilidad de reactivos, facilidad de medición, disponibilidad de equipos, etc.).

7.3.5 Cantidad de Lodo

Para estimar la cantidad de lodo generado por el tratamiento del lixiviado mediante ELECTROFLOX®, se empleó un conjunto de indicadores que relacionaran el volumen de lodo producido, DQO removida, flujo de lixiviado tratado y tiempo de operación de la planta de tratamiento. Los lodos se colectaron en canastillas y con una regla se midió los niveles de lodo en cada canastilla en centímetros (cm) y posteriormente se determinó el volumen de lodo conociendo las dimensiones de la canastilla (ancho y largo) y la altura de lodo en las mismas. La ecuación 1 presenta el cálculo del volumen de lodo producido en cada canastilla.

$$V_{Lodo} = A_{canastilla} * L_{canastilla} * h_{lodo} \quad (Ecuación 1)$$

Dónde:

V_{Lodo} : Volumen de Lodo recolectado en la canastilla (m³).

$A_{canastilla}$: Ancho de la canastilla (m)

$L_{canastilla}$: Largo de la canastilla (m)

h_{lodo} : Nivel o altura del lodo en la canastilla (m).

Con las dimensiones de ancho y largo de la canastilla (0,31 m y 0,36 m respectivamente) y empleando cada una de los niveles de lodos medidos, se determina el volumen de las canastillas. Posteriormente, se calcularon los porcentajes de reducción de la DQO durante el mismo periodo que se realizaron los muestreos. Es importante resaltar, que para las semanas 4 y 6, no se pudieron tomar muestras del efluente del lixiviado

de la planta ELECTROFLOX® (debido a que la planta no se encontraba en funcionamiento), por lo cual, no se pudieron evaluar los porcentajes de reducción obtenidos para la planta en las semanas anteriormente mencionadas. En las ecuaciones 2 y 3 se presentan los cálculos.

$$DQO_R = DQO_E - DQO_S \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde:

DQO_R : DQO removida del lixiviado durante el tratamiento (mg.L^{-1})

DQO_E : DQO afluente planta de ELECTROFLOX (mg.L^{-1})

DQO_S : DQO efluente planta de ELECTROFLOX (mg.L^{-1})

$$\% DQO_R = \frac{DQO_E - DQO_S}{DQO_E} \quad (\text{Ecuación .3})$$

Dónde:

$\% DQO_R$: Porcentaje de DQO removida del lixiviado durante el tratamiento (mg.L^{-1})

DQO_E : DQO afluente planta de ELECTROFLOX® (mg.L^{-1})

DQO_S : DQO efluente planta de ELECTROFLOX® (mg.L^{-1})

Se realizó esta diferencia teniendo en cuenta que el caudal tanto de entrada como de salida de la planta fue el mismo (600 L.h^{-1}), ya que la purga de lodos se realizaba de forma discontinua con duración entre 5 y 10 minutos de la descarga de este subproducto. Se determinó la producción de lodo relacionando, el volumen de lodo recuperado en las canastillas, el contenido de DQO removida del lixiviado, el caudal tratado por la planta de ELECTROFLOX® y las horas de funcionamiento de la misma. Mediante la ecuación 4 se determina este indicador.

$$T_{p.Lodo} = \frac{V_{Lodo} * 10^9}{DQO_R * Q_{Operación} * t_{Operación}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Dónde:

$T_{p.Lodo}$: Tasa de producción de lodo ($\text{L de Lodo. kgDQO removida}^{-1}$)

V_{Lodo} : Volumen de Lodo medido en las canastillas (m^3)

DQO_R : DQO removida del lixiviado durante el tratamiento (mg.L^{-1})

$Q_{Operación}$: Caudal de operación de la planta (L.h^{-1})

$t_{Operación}$: Tiempo de operación de la planta durante el muestreo (h)

La ecuación 5 presenta el cálculo para determinar mediante el uso de otro indicador la cantidad de lodo producido (expresada en kg) por unidad de tiempo expresado como una tasa teniendo en cuenta la jornada de operación de la planta (ver **Tabla 11**, capítulo 8).

$$P_{Lodo} = \frac{\rho_{Lodo} * V_{Lodo}}{t_{Operaci\acute{o}n}} \quad (Ecuaci\acute{o}n\ 5)$$

D\acute{o}nde:

P_{Lodo} : Producci\acute{o}n de lodo (kg Lodo.h⁻¹)

ρ_{Lodo} : Densidad del Lodo (kg.m⁻³)

V_{Lodo} : Volumen de Lodo medido en las canastillas (m³)

$t_{Operaci\acute{o}n}$: Tiempo de operaci\acute{o}n de la planta durante el muestreo (h)

De igual forma con el indicador de producci\acute{o}n de lodo presentado en la ecuaci\acute{o}n 5 se procede a determinar otro indicador que relaciona la cantidad de lodo (expresada en kg) con el volumen de lixiviado tratado (en metros c\ubfcicos), como se presenta en la ecuaci\acute{o}n 6.

$$C_{Lodo} = \frac{\rho_{Lodo} * V_{Lodo}}{Q_{Operaci\acute{o}n} * t_{Operaci\acute{o}n} * 10^{-3}} \quad (Ecuaci\acute{o}n\ 6)$$

D\acute{o}nde:

C_{Lodo} : Cantidad de lodo por metro c\ubfcico de lixiviado tratado (kg Lodo.m⁻³ LX tratado)

ρ_{Lodo} : Densidad del Lodo (kg.m⁻³)

V_{Lodo} : Volumen de Lodo medido en las canastillas (m³)

$Q_{Operaci\acute{o}n}$: Caudal de operaci\acute{o}n de la planta (L.h⁻¹)

$t_{Operaci\acute{o}n}$: Tiempo de operaci\acute{o}n de la planta durante el muestreo (h)

7.4 EVALUACI\acute{O}N DE LA CANTIDAD DE LODOS GENERADOS EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO Y SU CALIDAD MEDIANTE NORMATIVAS NACIONALES E INTERNACIONALES

Los resultados obtenidos en el laboratorio se analizaron teniendo en cuenta normativas nacionales (Decreto 1284 de 2014, NTC 5167, IDEAM) e internacionales M\acute{e}xico (NOM-004-SEMARNT-2002) y U.S. E.P.A (Norma 503-40CFR/1993) sobre caracteristicas acerca de lodos residuales o bios\acute{o}lidos con l\acute{i}mites m\acute{a}ximos permisibles para cada uno de los par\acute{a}metros que fueron propuestos en la **Tabla 8** (ver literal 7.3.4), asociando cada una de las caracteristicas fisicoqu\edmicas, microbiol\acute{o}gicas y toxicol\acute{o}gicas de los lodos generados como subproducto del tratamiento ELECTROFLOX[®] aplicado al lixiviado y de la misma forma con la cantidad de lodo determinada, empleando un conjunto de indicadores para reportar la generaci\acute{o}n de este subproducto del sistema de tratamiento de ELECTROFLOX[®]. Adicionalmente, teniendo en cuenta la revisi\acute{o}n de normativas y consulta de fuentes de informaci\acute{o}n (art\cdulos, tesis, documentos en l\cdnea, libros, etc.), se plantearon unas propuestas para dar valor agregado al lodo que se obtiene en el sistema de tratamiento ELECTROFLOX[®], para que la factibilidad de las opciones presentadas en esta investigaci\acute{o}n puedan ser evaluadas en otros estudios a futuro.

8 RESULTADOS Y ANÁLISIS

8.1 ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE LODO GENERADO

Para evaluar la cantidad de lodo generado por DQO eliminada no se reportaron datos durante las semanas 4 y 6 de muestreo (octubre 19 y noviembre 29 de 2016), ya que la planta no opero en ese lapso de tiempo por una falla en la bomba de dosificación de cal y no se pudo tomar muestra de lixiviado tratado. El lodo generado en el primer tanque sedimentador, se recolectó en 6 canastillas y posteriormente, fue determinado el nivel en cada una de estas canastillas con los valores que se reportan en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Niveles registrados de lodo en las canastillas de muestreo

NIVELES REPORTADOS DE LODOS EN CADA ENSAYO						
Fecha de Muestreo	Canastilla 1 (m)	Canastilla 2 (m)	Canastilla 3 (m)	Canastilla 4 (m)	Canastilla 5 (m)	Canastilla 6 (m)
Sep 13 - 2016	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.01
Oct 04 - 2016	0.02	0.09	0.12	0.08	0.10	0.08
Oct 10 - 2016	0.03	0.07	0.10	0.09	0.10	0.11
Nov 21- 2016	0.04	0.09	0.06	0.06	0.03	0.05
Dic 06 - 2016	0.05	0.06	0.10	0.05	0.06	0.04
Dic 15 - 2016	0.06	0.08	0.10	0.05	0.07	0.04

Al reemplazar cada uno de los valores de la **Tabla 9** en la ecuación 1 se obtiene el volumen de lodo por canastilla que se presenta en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Volumen generado de lodo durante el tratamiento

VOLUMEN DE LODO							
Fecha de Muestreo	Canastilla 1 (m³)	Canastilla 2 (m³)	Canastilla 3 (m³)	Canastilla 4 (m³)	Canastilla 5 (m³)	Canastilla 6 (m³)	Total (m³)
Sep 13 - 2016	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005	0.001	0.16
Oct 04 - 2016	0.002	0.010	0.013	0.009	0.011	0.009	0.32
Oct 10 - 2016	0.003	0.008	0.011	0.010	0.011	0.012	0.32
Nov 21- 2016	0.004	0.010	0.007	0.007	0.003	0.005	0.22
Dic 06 - 2016	0.005	0.007	0.011	0.005	0.007	0.004	0.24
Dic 15 - 2016	0.007	0.009	0.011	0.005	0.007	0.004	0.26

Es importante aclarar que el segundo y tercer indicador de producción de lodo (ver **Tabla 11**) se calculó de manera teórica empleando la densidad de un lodo obtenido del proceso de tratamiento de vinaza y aunque es una matriz diferente al lixiviado se utilizó este dato (suministrado de los análisis de laboratorio de AGROSOILLAB – Proyecto ELECTROFLOX® Convenio Univalle – Licorera de Caldas) debido a que la tecnología de tratamiento ELECTROFLOX® fue empleada para tratar este tipo de agua residual industrial. En su informe, García & Marriaga (2014) reportan densidades de los lodos provenientes del tratamiento ELECTROFLOX® entre 689 y 965 kg.m⁻³ y para estimar el tercer indicador de producción de lodo se empleó el valor de densidad de 0.965 g.cm⁻³ (valor que se toma teniendo en cuenta que la densidad del lodo es cerca a la del agua cuando sale del sedimentador y que se puede evidenciar en los altos contenidos de humedad en

la **Tabla 14** del presente capítulo) y se reemplazó en la ecuación 5. En la **Tabla 11** se presenta el resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 11. Tabla de cálculos para determinar la producción de lodo

PRODUCCION DE LODO								
	Vol. (m³)	DQO LX Entrada (ppm)	DQO LX Salida(ppm)	Reducción De DQO (ppm-%)	Tiempo de operación (h)	Indicador 1 <i>Tp Lodo</i> (L.kgDQOr ⁻¹)	Indicador 2 <i>P Lodo</i> (kg.h ⁻¹)	Indicador 3 <i>C Lodo</i> (kg.m ⁻³ LX tto)
Sem.1	0.16	10263	6315	3948 – 38	2	34.77	83.32	128.33
Sem. 2	0.32	13459	7217	6241 – 46	5	17.24	65.32	100.61
Sem. 3	0.32	13504	6719	6785 – 50	5	15.86	65.32	100.61
Sem. 5	0.22	11872	6708	5164 – 43	2.5	28.07	87.98	135.52
Sem. 7	0.24	9583	5933	3650 – 38	3.25	33.32	73.83	113.72
Sem. 8	0.26	6757	3019	3738 – 55	3.75	33.94	70.21	108.14

LX: Lixiviado, **Sem:** Semana, **LX tto:** Lixiviado tratado

A pesar de los cortos periodos de operación de la planta y las características variables del lixiviado (ver **tablas 11 a 14**), es importante aclarar que los indicadores aquí propuestos son una primera aproximación para determinar la cantidad de lodo generado mediante el sistema de tratamiento ELECTROFLOX®, sin embargo, se debe realizar mayores estudios a profundidad porque no se pudo evidenciar durante la revisión de literatura, información existente sobre la cantidad de los lodos generados como resultado de aplicar un tratamiento electroquímico a lixiviados, ya que finalmente puede influir en los costos de manejo final para este tipo de subproducto.

8.2 CARACTERISTICAS FISICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL LODO

Como insumo preliminar la **Tabla 12** presenta los resultados de un estudio de caracterización de 5 lotes de lixiviado realizado durante la operación de la planta ELECTROFLOX® (entre Julio de 2016 y Febrero de 2017) de forma paralela al estudio de las características de los lodos generados como subproducto del tratamiento electroquímico comprendido en el periodo Septiembre-Diciembre de 2016, en el relleno sanitario de Presidente, para lo cual solo se tomaron los lotes de interés para asociar con los resultados reportados para los lodos obtenidos como subproducto del tratamiento.

Tabla 12. Características del lixiviado y sobrenadante en la Planta de ELECTROFLOX®

Parámetros	Lote No. 2 (14/9/2016)		Lote No. 3 (24/10/2016)		Lote No. 4 (9/12/2016)	
	Lixiviado	Sobrenadante	Lixiviado	Sobrenadante	Lixiviado	Sobrenadante
pH	8.82	9.77	-	-	9.31	10.36
K (mS/cm)	27.9	22.4	-	-	25.9	22
Turbidez (NTU)	280	137	-	-	217	122
% Reducción Turbidez	-	51.07 %	-	-	-	43.78 %
DQO (mg O ₂ .L ⁻¹)	8198.5	4873.3	9250.3	6108.3	7951.6	5399.3
% Reducción DQO	-	40.56 %	-	33.97 %	-	32.10 %
TOC (mg.L ⁻¹)	-	-	5365	2527.5	-	-
% Reducción TOC	-	-	-	52.89 %	-	-

Parámetros	Lote No. 2 (14/9/2016)		Lote No. 3 (24/10/2016)		Lote No. 4 (9/12/2016)	
	Lixiviado	Sobrenadante	Lixiviado	Sobrenadante	Lixiviado	Sobrenadante
Nitratos (mg.L ⁻¹)	6272.2	1298.3	1165	-	-	-
% Reducción Nitratos	-	79.30%	-	-	-	-
Cloruros (mg.L ⁻¹)	798.75	488.13	9806.9	8422.4	-	-
% Reducción Cloruros	-	38.89 %	-	14.12 %	-	-
Ca ²⁺ (mg.L ⁻¹)	6185.34	39.83	-	-	-	-
Mg ²⁺ (mg.L ⁻¹)	503.82	503.89	-	-	-	-
Fe total (mg.L ⁻¹)	3.84	8.52	-	-	-	-

Fuente: Información suministrada por la Ing. Dayana Donneys MSc – Obtenida de un informe interno de desempeño de la tecnología.

En las **Tablas 13 y 14**, se presentan consolidados los datos de los parámetros que se analizaron para cada muestra de lodo recolectada durante la ejecución de la fase experimental. Para realizar un análisis de dichos resultados, se buscó comparar con las normativas que rigen en Colombia y algunas normas en el contexto internacional, que para el caso de un lodo proveniente de éste tipo de tratamiento aplican y así determinar en qué categoría de biosólidos se podría clasificar el lodo. Posteriormente, se pretende proponer alternativas de aprovechamiento, tratamiento y/o en última medida disposición final de dicho lodo.

Tabla 13. Resultados metales y Ecotoxicidad para cada muestra de lodo

Parámetros/ Fecha de Muestreo	Calcio Total (mg.Kg ⁻¹)	Hierro Total (mg.Kg ⁻¹)	Magnesio Total (mg.Kg ⁻¹)	Arsénico (mg.Kg ⁻¹)	Plomo (mg.Kg ⁻¹)	Mercurio (mg.Kg ⁻¹)	Ecotoxicidad D. Pulex (%)
Oct 10 - 2016	192877.14	37685.33	22447.69	4.29	3.49	<0.17(***)	28.30
Oct 19 - 2016	174787.27	37130.83	22673.87	-	94.16(**)	-	-
Nov 21 - 2016	123880.66	29531.36	22209.25	3.60	3.97	<0.17(***)	-
Nov 29 - 2016	140891.29	33313.07	22852.53	-	5.48	-	-
Dic 06 - 2016	84893.74	31358.87	22824.00	3.74	6.47	<0.17(***)	30.00
Dic 15 - 2016	132275.13	34242.00	21767.00	3.73	4.49	<0.17(***)	23.30
Promedio	141600.87	33876.91	22462.39	3.74	4.99	<0.17	-
Desviación E.	38334.76	3186.46	418.46	0.31	36.50	-	-
Mínimo	84893.74	29531.36	21767.00	3.60	3.49	<0.17	-
Máximo	192877.14	37685.33	22852.53	4.29	94.16**	<0.17	-

(-): Parámetro no medido; (**): Dato atípico en lectura del equipo; (***): Por debajo del límite de detección

Tabla 14. Resultados parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para cada muestra de lodo

Parámetros/ Fecha de Muestreo	Humedad (%)	pH (unidades)	Conductividad (mS.cm ⁻¹)	ST ^a (%)	STV ^a (%)	M.O ^a (%)	NTK ^a (%)	Fósforo Total (mg/Kg)	E. Coli (UFC/g)	Coliformes Totales (UFC/g)	Coliformes Fecales (UFC/g)	H. Helminthos (N°/g)
1. Sep 13 - 2016	69.03	9.50	9.16	19.38	7.48	7.99	0.35	48.20	-	-	-	-
2. Oct 04 - 2016	71.92	11.33	8.72	27.81	6.49	6.19	0.08	21.40	-	-	-	-
3. Oct 10 - 2016	76.55	10.19	9.22	25.57	16.34	18.52	0.08	13.50	0	20000; 7.06 und. LOG	0	0
4. Oct 19 - 2016	71.70	-	-	28.82	9.46	10.62	0.13	27.10	-	-	-	-
5. Nov 21 - 2016	75.07	10.95	10.22	24.56	10.31	12.38	0.12	58.90	-	-	-	-
6. Nov 29 - 2016	71.51	10.99	10.53	28.33	9.03	10.62	0.13	52.80	-	-	-	-
7. Dic 06 - 2016	72.52	11.19	9.35	26.48	10.91	10.62	0.10	9.23	0	0	0	0
8. Dic 15 - 2016	65.87	10.77	9.93	33.11	12.05	12.38	0.21	177	0	0	0	0
Promedio	71.77	-	9.60	26.76	10.26	10.62	0.15	51.02	-	-	-	-
Desviación E.	3.31	-	0.65	3.94	3.04	3.64	0.09	54.18	-	-	-	-
Varianza	10.96	-	0.42	15.56	9.24	11.89	0.01	401.42	-	-	-	-
Mínimo	65.87	9.50	8.72	19.38	6.49	6.19	0.08	9.23	-	-	-	-
Máximo	76.55	11.33	10.53	33.11	16.34	18.52	0.35	177	-	-	-	-
Coefficiente de Variabilidad	0.05-5%	-	0.07-7%	0.15- 15%	0.14- 14%	0.34- 34%	0.35- 35%	1.06- 100%	-	-	-	-

(-): Parámetro no determinado, por frecuencia análisis y/o daño de equipo; (a): Expresado como porcentaje peso a peso (%p/p)

8.2.1 pH

Los valores de pH obtenidos para los lodos presentan un valor mínimo 9.5 UND, valor máximo 11.19 unidades, lo que refleja que los lodos de ELECTROFLOX® son básicos. De acuerdo con Semerjian & Ayoub (2003), tradicionalmente, agentes alcalinizantes, tales como cal o soda caustica, se han empleado para elevar los niveles de pH necesarios para inducir la clarificación química de las aguas residuales. Debido a que el tratamiento del lixiviado mediante ELECTROFLOX® emplea cal se corrobora el aumento de pH y por lo tanto, se puede asociar que el valor arrojado de pH del lodo se debe a que la cal empleada en el tratamiento del lixiviado se alojara en el lodo (ver **Tablas 12 y 14**).

Éste valor de pH es beneficioso, pues puede llegarse a considerar como un mecanismo indirecto de eliminación de ciertos microorganismos, ya que la mayoría de éstos no pueden prosperar en éste valor de pH, como en el caso de Coliformes totales y fecales, mohos, levaduras, *Clostridium sulfito reductor*, entre otros (Galvis & Rivera, 2013). Boost & Poon (1998) presentaron los valores máximos de pH tolerados por los siguientes microorganismos: *Vibrio parahaemolyticus*, 9.5 UND; *Clostridium perfringens*, 9.5 UND; *Aeromonas hydrophilia*, 10.5 UND; *E. coli*, 10.5 UND; *Yersinia enterocolitica*, 9.5 UND; *Shigella sonnei*, 9.5 UND; *Salmonella typhimurium*, 10.5 UND; *Salmonella typhi*, 9.5 UND.

8.2.2 Humedad

Los resultados obtenidos para el caso de la humedad de las muestras de lodos, arrojaron valores ubicados alrededor del 72% de contenido de humedad (valor mínimo 65.87 %, valor máximo 76.55 %), éste valor representa un contenido alto de agua (en éste caso, representa cantidad de lixiviado). Dichos valores se pueden relacionar con el proceso de filtración previo que se efectúa en las canastillas recolectoras del lodo, dado que previamente se disponían los lodos en dichas canastillas, se dejaban filtrar por medio de un lienzo por un lapso de 24 horas, posteriormente a ello el lodo presentaba una textura y densidad diferente, y se procedía a tomar la muestra para ser preservada y transportada hasta el laboratorio (**Ver Figura 9**).



Figura 9. Canastillas recolectoras del lodo

El valor de humedad no se encuentra presente en el Decreto 1287 de 2014 como un parámetro determinante para la clasificación de los biosólidos, sin embargo, más adelante al hacer referencia respecto al aprovechamiento del lodo (literal 8.4 del presente capítulo), se discutirá más a fondo sobre éste parámetro. Por otro lado, la Norma técnica Colombiana (NTC) 5167 del 2004, establece un valor máximo para éste parámetro (15%), para el aprovechamiento del lodo, y en donde el lodo evaluado excedería el límite.

8.2.3 Conductividad Eléctrica (k)

Uno de los parámetros más interesantes a tener en cuenta cuando se estudia la calidad de un lodo es la conductividad eléctrica (k), la cual es sinónimo de la salinidad existente en dicho lodo; su valor representa una estimación de los contenidos en iones de las muestras. La conductividad depende de la movilidad de los iones disueltos y de la temperatura a la que se realiza la medida (Murcia, 2013). Para las muestras de lodo se reportaron valores de conductividad eléctrica que estuvieron entre 8.72 mS.cm^{-1} y 10.53 mS.cm^{-1} .

De acuerdo con los valores reportados en la **Tabla 14** y lo reportado por Carabalí (2017), la conductividad está relacionada con el contenido de sales conformadas por iones de calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros y hierro, entre otros, presentes en el lixiviado producto de la descomposición de los residuos sólidos. Además, la presencia de iones de Ca, Mg y K guarda una relación directa con la conductividad y a medida que aumenta el pH aumenta la concentración de estos iones por precipitación, lo cual se corrobora en los valores reportados. Los valores de la conductividad obtenidos para las muestras de lodo, tienen un promedio aproximado a $9,6 \text{ mS.cm}^{-1}$, sus valores de igual forma, también van directamente ligados a los reactivos empleados en el proceso de ELECTROFLOX®, incluyendo que en el lixiviado también depende de distintos factores tanto de los residuos sólidos dispuestos en el relleno, como las condiciones climáticas que se presente en el área del mismo.

Dicho parámetro no está considerado como una variable en el Decreto 1287 de 2014, y la NTC 5167 de 2004 especifica que se debe reportar, mas no define un valor límite del mismo; no obstante, en el momento de analizar el aprovechamiento de los lodos se debe tener en cuenta, ya que éste valor relativamente alto, definirá las dosis de los lodos como acondicionador de suelos, si al final se verifica que el mismo se puede aprovechar como mejorador de suelo.

8.2.4 Sólidos Totales y Sólidos Volátiles Totales

Los valores obtenidos para los sólidos totales (ST) se encuentran alrededor de 26,76 %, presentando un valor mínimo de 19.38 y uno máximo de 33.11 %. En el caso de sólidos totales volátiles (fracción orgánica), las muestras del lodo presentaron un valor promedio de 10.26%, con un valor mínimo de 6.49 y 16.34 % como valor máximo. El promedio de la relación SVT/ST (ver **Tabla 15**) para el lodo generado mediante ELECTROFLOX® es de 0.39 y es la fracción orgánica presente en el lodo que puede ser estabilizada biológicamente.

Tabla 15. Resultados parámetros fisicoquímicos y microbiológicos para cada muestra de lodo

Parámetros/ Fecha de Muestreo	ST (%)	STV (%)	STV/ST
Oct 10 – 2016	19.38	7.48	0.39
Oct 19 – 2016	27.81	6.49	0.23
Nov 21 – 2016	25.57	16.34	0.64
Nov 29 – 2016	28.82	9.46	0.33
Dic 06 – 2016	24.56	10.31	0.42
Dic 15 – 2016	28.33	9.03	0.32
Promedio	26.48	10.91	0.39
Desviación E.	33.11	12.05	0.12

De acuerdo con Floréz (2007) al comparar estos resultados con los valores de SVT/ST (60-80%) y exceptuando el valor de la muestra de noviembre 21 de 2016, para lodos primarios provenientes de PTAR, estos se encuentran por debajo de este rango, lo cual demuestra que estos lodos generados se encuentran compuestos principalmente por materia inorgánica. Adicionalmente, los SVT son bajos debido a que el lixiviado bajo estudio se caracteriza por ser parcialmente estabilizado y esta fase se caracteriza por tener baja cantidad de materia orgánica, que ha sido degradada en etapas anteriores (fases de hidrólisis, acidogénesis) como resultado del proceso de degradación de los lixiviados. Cabe mencionar que dichos parámetros no son contemplados en las normas referentes a biosólidos y aprovechamiento.

8.2.5 Materia Orgánica, Nitrógeno y Fósforo Total

Durante el desarrollo de toda la fase experimental se presentaron los siguientes porcentajes de materia orgánica (6.19 a 12.38 %, exceptuando la semana 3 con un 18.52 %) y nutrientes en el lodo. Acorde con lo reportado por Carabalí (2017) y Muñoz (2017) el lodo presentaría un buen contenido de M.O. ya que superan el porcentaje presentado en el suelo (5%), y está cercano al rango que representa un ALTO contenido en sedimentos (22-26%) (Ver **Tabla 14**). Por otro parte, de acuerdo con Moreno *et al.*, (2017), la materia orgánica mejora las propiedades físicas como la estructura y la disponibilidad de nutrientes del suelo, esto sucederá si la materia orgánica suministrada, en el caso de emplear el lodo evaluado como enmienda, está estabilizada adecuadamente; de lo contrario, la misma será degradada y mineralizada rápidamente por los microorganismos presentes en el suelo, no favoreciendo la estructura del suelo, ni promoviendo la generación de agregados.

En cuanto a los nutrientes, se tienen en cuenta como elementos importantes dentro de este estudio ya que al considerar el lodo como un biosólidos, puede dar un indicio si este tipo de subproducto al tratar el lixiviado mediante ELECTROFLOX®, puede ser aprovechado, por ejemplo, como acondicionador de suelos o no, entre otros aspectos de alternativas de manejo final. Los valores que se encontraron para nitrógeno total de Kjeldahl presentaron un promedio de 0.15 % (p/p), como valor mínimo se obtuvo 0.08 % (p/p) y valor máximo 0.35% (p/p). Las normas internacionales y nacionales no establecen límites máximos ni mínimos para éste parámetro, sin embargo, a la hora de precisar el fin del lodo, su concentración es relevante, ya que con ésta se determinará la relación C/N, la que permitirá establecer si se podrá o no emplear éste lodo como sustrato para compost. Sin embargo, Fernández *et al.*, (2006), citado por Carabalí (2017), afirman que un suelo es

medianamente rico en Nitrógeno cuando presenta un valor del 0.13%, para sedimentos de lagunas de lixiviados con alto contenido de nitrógeno se presenta un rango asociado de 0.70 a 1.13%, acorde con dichos valores el biosólido presentó un bajo contenido de Nitrógeno. Por lo anterior, podría requerirse de la adición de materiales para su uso como acondicionador de suelos.

Con la relación al contenido de fósforo, los valores a lo largo de la fase experimental (9.23 a 177 mg.Kg⁻¹ o 0.001 a 0.018 % expresado como % p/p) pudieron asociarse al bajo contenido de fosforo en el lixiviado crudo y a que quizás se presenta una reacción de inmovilización del fósforo, ya que se forma un precipitado de fosfato de calcio condición que ha sido reportada en otros trabajos científicos (Fernandes & Souza, 2001; Méndez *et. al*, 2002; Andreoli *et. al*, 2001). Según Múnera y Meza (2012) la concentración total del fósforo en los cultivos varía desde 0.1 a 0.5 %, en tanto Montecinos C., (2014) plantea un rango más amplio presentando valores entre el 3 y 83 % de fósforo total; siendo los fosfatos de calcio la forma presente en mayor abundancia y considerando el pH del lodo (>8.0 unidades), adicionalmente Carabalí (2017) reporta un rango de alto contenido de fósforo (0.23-0.99%), según lo anterior se puede inferir de los resultados presentados en la **Tabla 14**, que éste lodo es deficiente en dicho mineral, carece de Fósforo disponible, por lo cual en primera instancia se podría emplear para usos agrícolas sólo si se realiza una mezcla con un fertilizante con Fósforo, sin embargo, no descarta la posibilidad de que este lodo se pueda emplear para diferentes usos.

8.2.6 Parámetros Microbiológicos

Para Coliformes Fecales se encontró ausencia en las tres muestras de lodo analizadas. Esto se puede asociar al rango de pH que las muestras de lodos presentaron, reportando un valor mínimo 9.5 UND y un valor máximo 11.19 unidades, y el rango de pH para éste tipo de microorganismos según Galvis & Rivera (2013); Aziz *et. al.*, (2013), cuentan con un rango mínimo de pH para su crecimiento de 4.0 Unidades y máximo de 8.5 unidades, por lo cual el pH del lodo no entraría en el rango para convertirse en un medio óptimo para el crecimiento de éstos microorganismos, también influye para su crecimiento tener condiciones adecuadas de materia orgánica y humedad, que según lo reportado serían insuficientes para su óptimo desarrollo; éste resultado junto con el resultado para E. Coli, permite deducir que el lodo no presenta una contaminación microbiológica de organismos patógenos.

En cuanto a las Coliformes Totales, se obtuvo que hubo presencia en una sola muestra analizada (octubre 10 de 2016), presentando un valor de 20000 UFC.g⁻¹, por parte del Decreto 1287 de 2014 y que no se exige como un parámetro para categorizar el biosólido, no obstante, la NTC 5167 (2004) si lo exige como un requerimiento, y efectivamente para el caso de ésta muestra se excede en gran manera el límite establecido por ésta norma (1000 UFC.g⁻¹). El dato anterior se podría interpretar como una alerta de contaminación que se pudo presentar en alguna parte del proceso, ya sea en la recolección o transporte de la muestra, sin embargo, no se descarta la posibilidad de que el funcionamiento de la planta de ELECTROFLOX® a la fecha de la toma de ésta muestra haya presentado alguna anomalía en su funcionamiento que hubiera favorecido el desarrollo de Coliformes Totales.

Para Huevos de Helmintos hubo ausencia en las tres muestras de lodo a las que se les realizó éste análisis. Estos resultados se pueden asociar al proceso electroquímico que comprende la planta de ELECTROFLOX®, como también a los procesos biológicos de las lagunas en las que se almacenan los lixiviados; dichos procesos pudieron eliminar éstos microorganismos, como también por los reactivos que se emplean en el proceso (Cal, Ácido Oxálico, Ácido sulfúrico, PAM, Óxido de Magnesio, Polímero Catiónico) y que puede generar que el lodo no sea un medio adecuado de crecimiento para éstos. Los huevos de helmintos son un parámetro clave para garantizar la inocuidad de los biosólidos, debido a que, los virus y las bacterias patógenas permanecen viables durante uno a tres meses en el agua residual, mientras que los helmintos sobreviven hasta por un año, lo cual permite determinar que los lodos de ELECTROFLOX®, en efecto, son lodos inocuos.

Teniendo en cuenta los estudios realizados por Grisey *et. al.*, (2010), se ha mostrado que el lixiviado no se determina como un medio ideal ni apto para el crecimiento de microorganismos entero patógenos, en especial para *Salmonella spp.* Grisey *et. al.*, (2010) mencionan que los Coliformes fecales sobreviven en un medio natural alrededor de 100 días, lo que para el caso de este estudio refleja que al estar en funcionamiento el relleno sanitario se tienen los medios para que éste microorganismo prolifere, sin embargo, dado que éste microorganismo es sensible a la salinidad, y el lixiviado tratado tiene un alto nivel del mismo, puede esperarse que dicho microorganismo no subsista en el lixiviado. En éste estudio se tiene la premisa, por lo anteriormente mencionado, que para los parámetros microbiológicos a los que se le realizaron medición (*Coliformes fecales* y *Helmintos*) habrá ausencia en el lodo estudiado, sabiendo que éste proviene de un tratamiento realizado a un lixiviado.

Los resultados arrojados, según los parámetros microbiológicos, permiten concluir que el lodo generado en el proceso de ELECTROFLOX® no representa un riesgo para la salud pública y acorde con los límites microbiológicos establecidos en el Decreto 1287 del 2014 se obtuvo que el lodo de ELECTROFLOX® tienen la tendencia a pertenecer a la categoría **A** de biosólidos. Por lo cual se puede afirmar que éstos no son una preocupación desde el punto de vista microbiológico.

8.2.7 Metales

Como se puede observar en la **Tabla 13**, se determinó la concentración de As, Pb y Hg para cuatro muestras de lodo recolectadas de la planta piloto de ELECTROFLOX® y 6 determinadas para Ca, Fe y Mg. Durante los análisis de éstos resultados se pudo observar que se presentaron en algunos metales valores por debajo del límite de detección para el método de medición empleado (tal es el caso del Hg), en otros metales como el Calcio, Hierro y Magnesio, se encontraron concentraciones menores a las reportadas en el estudio realizado por García & Marriaga (2014) y cantidades por debajo de los valores de referencia en las normativas empleadas para lodos residuales y biosólidos para Arsénico y Plomo (ver **Tabla 16**).

El decreto 1287 de 2014 define un “biosólido” como el “Producto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales municipales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten su uso”. Teniendo en cuenta la definición anterior y por las concentraciones de materia orgánica, nitrógeno y fosforo encontradas, se le puede considerar al lodo un

biosólido y se procede a evaluarlo con respecto a lo establecido en la norma sobre los límites de concentración permisibles para metales.

Al realizar la comparación para el análisis de la cantidad presente de metales como Arsénico (As) (valor mínimo de 3.60 mg.kg⁻¹ y máximo de 4.29 mg.kg⁻¹), Mercurio (Hg) (Por debajo del límite de detección del ensayo) y Plomo (Pb) (valor mínimo de 3.49 mg.kg⁻¹ y máximo de 6.47 mg.kg⁻¹), adicionalmente se tuvo en cuenta las normativas de cumplimiento para lodos residuales y biosólidos empleadas mundialmente con los límites máximos permisibles de metales pesados en lodos aplicados a suelos y diferentes países tales como: México (NOM-004-SEMARNT-2002), U.S. E.P.A (Norma 503-40CFR/1993) e incluyendo la normativa Colombiana anteriormente expuesta (Decreto 1287 de 2014), observadas en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Límites máximos permisibles para metales en lodos y biosólidos

Metales	Ley Colombiana Decreto 1287 (2014)	Ley Mexicana NOM 004, 2002	Norma E.U 40 CFR parte 503 Límites máximos permisibles	Parámetro del Lodo/Biosólido
As(mg.Kg ⁻¹)	Categoría A: 20 Categoría B: 40	Excelente C. 41 Buena C.75	Límite máx: 75 Excelente y buena calidad: 41	CUMPLE PARA TODAS LAS NORMAS INDICADAS (3,84 mg.Kg ⁻¹)
Hg(mg.Kg ⁻¹)	Categoría A: 10 Categoría B: 20	Excelente C. 17 Buena C.57	Límite máx: 57 Excelente y buena calidad: 17	CUMPLE PARA TODAS LAS NORMAS INDICADAS (< 0,17 mg.Kg ⁻¹)
Pb(mg.Kg ⁻¹)	Categoría A: 300 Categoría B: 400	Excelente C. 300 Buena C. 840	Límite máx: 840 Excelente y buena calidad: 300	CUMPLE PARA TODAS LAS NORMAS INDICADAS (4,78 mg.Kg ⁻¹)

Fuente: México (NOM-004-SEMARNT-2002), U.S. E.P.A (Norma 503-40CFR/1993), y Colombia (Decreto 1287 de 2014)

Al comparar los resultados obtenidos con los límites establecidos por las normas enunciadas en la **Tabla 16** se puede inferir que la cantidad de As, Pb y Hg presente en el lodo como subproducto del proceso ELECTROFLOX® al tratamiento del lixiviado del relleno sanitario no sobrepasa ninguno de los límites máximos permisibles establecidos en las normas para valores de metales pesados en lodos y biosólidos, por lo tanto, se podría considerar entre sus posibles usos material de cobertura en rellenos, agregado para construcción, etc., teniendo en cuenta las especificaciones de cada una de las anteriores normativas sobre el manejo final que se debe dar a los lodos y la respectiva evaluación de los demás parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que dichas normas establezcan.

Al realizar énfasis en estos metales evaluados y teniendo en cuenta que la planta piloto de ELECTROFLOX® es alimentada por una laguna de lixiviado con un pH alcalino, de acuerdo con lo reportado por Carabalí (2017), esta característica favorece su precipitación y por lo tanto, es posible que la mayor cantidad de estos metales hayan precipitado en los sedimentos de la laguna y solo una pequeña fracción haya pasado al sistema de tratamiento electroquímico, que adicionalmente con el suministro de Cal (CaO), al aumentar el pH facilita la precipitación de estos metales en los lodos.

Además, Øygard *et al.* (2008), realizó un estudio a los sedimentos de lixiviados dragados de ocho (8) rellenos sanitarios de RSM en el cual, para metales como arsénico, cobre, cromo, níquel y cinc encontró rangos que

se movían desde 7.1 – 98; 19 – 300; 15 – 91; 9.2 – 64; 370 – 4400; (mg.Kg⁻¹) donde se puede observar un amplio margen entre los límites de los rangos, esto debido en gran medida a que en éste estudio reportado por los autores se consideraron varias muestras (para 8 en total). Pero bajo estas condiciones se observa que comparado con los resultados obtenidos en éste estudio, particularmente para el arsénico los valores reportados se encuentran por debajo de lo establecido por los autores en su trabajo de investigación.

De igual forma, en su estudio Alvarado (2016), reporta las características generales de los lixiviados y los intervalos en los que el mercurio (Hg) se puede encontrar, que va desde su no detección hasta 3 mg.L⁻¹, esto corrobora que para el presente estudio en la muestra de lodo, este metal se encontró por debajo del límite de detección debido a su posible bajo contenido en el lixiviado del relleno sanitario.

Respecto a los contenidos de Hierro, los lodos procedentes del primer tanque sedimentador de la planta de ELECTROFLOX® en su estudio poseen un alto contenido, el valor mínimo corresponde a 29351.36 y el máximo es de 37685.33 mg Fe.kg⁻¹ (2.95 – 3.77%) de Lodo (ver **Tabla 17**). Esta elevada proporción se obtuvo en todo el proceso de caracterización de lodo residual en la investigación, debido a que la presencia de Hierro se debe a la naturaleza del proceso ELECTROFLOX® y de acuerdo con Hernández (2002), los valores que se reportan se deben principalmente a la electro erosión de las placas de acero de las celdas electroquímicas donde es aplicada corriente eléctrica con la consecuente flotación de los lodos y la eliminación por erosión de los metales presentes en las placas.

Tabla 17. Concentraciones y cantidad de Hierro, Calcio y Magnesio en la muestra de lodo

Parámetros Fecha de muestreo	Hierro Total (mg.Kg⁻¹)	Hierro Total (% p/p)	Calcio Total (mg.Kg⁻¹)	Calcio Total (% p/p)	Magnesio Total (mg.Kg⁻¹)	Magnesio Total (% p/p)
Semana 3 10 de Octubre de 2016	37685.33	3.77	192877.14	19.29	22447.69	2.24
Semana 4 19 de Octubre de 2016	37130.83	3.66	174787.27	17.48	22673.87	2.27
Semana 5 21 Noviembre de 2016	29531.36	2.95	123880.66	12.39	22209.25	2.22
Semana 6 29 Noviembre de 2016	33313.07	3.33	140891.29	14.09	22852.23	2.29
Semana 7 6 de Diciembre de 2016	31358.87	3.14	84893.74	8.49	22824.00	2.28
Semana 8 15 de Diciembre de 2016	34242.00	3.42	132275.13	13.23	21767.00	2.18

Los valores mínimos y máximos reportados para el Calcio y Magnesio respectivamente son de 84893.74 y 192877.14 mg Ca.kg⁻¹ (8.49 – 19.29%) de Lodo y de 21767.00 y 22852.23 mg Mg.kg⁻¹ (2.18 – 2.29%) de Lodo. De acuerdo con lo reportado por García & Marriaga (2014), a partir de los iones metálicos producidos en el proceso ELECTROFLOX® se generan posteriormente especies coagulantes en el efluente al incrementar el pH por medio de la adición de cal y carbonato de magnesio. La fuerte interacción entre las especies ferrosas con los iones de calcio y magnesio genera coágulos con una alta afinidad por la materia suspendida en el lixiviado; de esta manera, se obtienen flóculos densos y fáciles de decantar. Adicionalmente,

Marriaga-Cabral *et al.*, (2017), reportan que a pH alcalino (> 10), se favorece la precipitación de iones calcio y magnesio, así como los iones carbonato. De acuerdo con lo anterior, se corrobora el hecho de que se encuentren elevadas cantidades de Calcio y Magnesio entre las especies ferrosas con los iones de calcio y magnesio genera coágulos con una alta afinidad por la para las muestras de lodo analizadas, con los resultados presentados en la **Tabla 17**.

Es importante tener en cuenta que las normas de aprovechamiento del lodo expuestas en el presente documento no establecen límites máximos permisibles por el contenido de estos elementos.

8.3 CARACTERÍSTICAS TOXICOLÓGICAS DEL LODO

Los ensayos de toxicidad de acuerdo con IDEAM (2007), estudian dos enfoques diferentes de la toxicidad de un residuo, aquel referido a la salud humana bien sea en forma directa o indirecta, que incluye los ensayos de TCLP, SPLP, bioluminiscencia bacterial y quimioluminiscencia bacterial, y aquel que involucra la toxicidad hacia el medio ambiente, específicamente la toxicidad acuática, que se basa en los procedimientos de toxicidad aguda para *Daphnia* y ensayo de inhibición de algas. La toxicidad de las muestras de lodos que se obtuvieron durante la operación de la planta ELECTROFLOX® se evaluó mediante pruebas de toxicidad aguda empleando como organismo indicador *Daphnia pulex*.

8.3.1 Ensayo de Ecotoxicidad aguda

En la **Tabla 18**, se presentan los porcentajes de inmovilización de *Daphnia pulex* con 100 % de la fracción adaptada de agua (WAF) de la sustancia (lodo de ELECTROFLOX) contra un control.

Tabla 18. Ensayo de Ecotoxicidad aguda con *Daphnia pulex*

Toxicidad aguda (24 h/48 h)	Semana de Muestreo	Fecha	Inicial a 24 h % (Lodo)	Final a 48 h % (Lodo)	Incertidumbre	Inicial % (Control)	Final % (Control)
<i>Daphnia pulex</i>	3	Octubre 10 de 2016	11.7	28.3	0.1	≤ 10	≤ 10
	7	Diciembre 09 de 2016	≤ 10	30.0	0.1	≤ 10	≤ 10
	8	Diciembre 15 de 2016	≤ 10	23.3	0.1	≤ 10	≤ 10

Para las 3 semanas que se realizó la prueba los porcentajes de inmovilización para *Daphnia pulex* fueron de 11.7 % - 28.3 %, ≤ 10.0 % - 30.0 %; ≤ 10.0 % - 23.3 %; al inicio y final del ensayo respectivamente, y de acuerdo con el IDEAM (2007), si el porcentaje de inmovilización es ≥ 50 %, la muestra (lodo de ELECTROFLOX®) debe ser clasificada como ecotóxica. Según estos resultados, las muestras de lodo comparadas con la muestra control, tienen un % de inhibición mayor al final del ensayo, aunque estas no alcanzan el 50 %, es decir, si tienen un efecto inmovilizador sobre los organismos de estudio, pero no para catalogar las muestras como ecotóxicas.

Adicionalmente, Muñoz (2017) indica de acuerdo al IDEAM, que existen unos parámetros de aseguramiento de calidad que permiten determinar si los ensayos son confiables, entre los cuales se destaca:

- La inmovilización en los controles no debe exceder el 10% al final del ensayo.
- *Daphnia pulex* en los grupos de control no deben estar atrapadas en la superficie del agua.
- Es deseable que la concentración de oxígeno disuelto en los contenedores del ensayo permanezca por encima de los 3 mg/L durante el ensayo. Sin embargo, en ninguna circunstancia debe disminuir la concentración de oxígeno disuelto por debajo de 2 mg O₂/L (ver anexos).

Como se observó en los resultados presentados en la **Tabla 18**, se cumple con lo establecido por el IDEAM y se puede afirmar que los resultados obtenidos de la no toxicidad de los lodos en el presente estudio son confiables. De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, hasta la fecha no se conocen resultados similares de pruebas de toxicidad aguda realizada a lodos residuales que se obtienen de un tratamiento electroquímico, específicamente utilizando como organismo indicador *Daphnia pulex*.

8.4 VALORIZACIÓN DEL LODO

Acorde con los criterios fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos, se define que el lodo estudiado es acogido por la definición de *Biosólido*, ya que cumple con la gran mayoría de los límites nacionales e internacionales existentes (**Tablas 19 y 20**), según los límites estipulados para metales pesados por la NOM 004 (2002), el biosólido tiende a estar en la categoría de *Excelente calidad*, para la EPA, el biosólido también entraría en la categoría de *Excepcional y Buena calidad*, para la norma Colombiana (Decreto 1287 del 2014) el biosólido para los parámetros analizados presenta tendencia la *Categoría A* (ir **Anexo 21**).

Tabla 19. Evaluación del cumplimiento de las normas nacionales e internacionales del Lodo-Biosólido estudiado

Criterios de clasificación del producto	Ley Colombiana Decreto 1287 (2014)	Ley Mexicana NOM 004, 2002	Norma E.U 40 CFR parte 503 Límites máximos permisibles	Parámetro del Biosólido
As(mg.Kg ⁻¹)	Categoría A: 20 Categoría B: 40	Excelente C. 41 Buena C.75	Límite máx: 75 Excelente y buena calidad: 41	CUMPLE PARA TODAS LAS NORMAS INDICADAS (3.84 mg.Kg ⁻¹)
Cd(mg.Kg ⁻¹)	Categoría A: 8 Categoría B: 40	Excelente C.39 Buena C. 85	Límite máx: 85 Excelente y buena calidad:39	-
Cr(mg.Kg ⁻¹)	Categoría A: 1000 Categoría B:1500	Excelente C. 1200 Buena C. 3000	Límite máx: 3000 Excelente y buena calidad: 1200	-
Hg(mg.Kg ⁻¹)	Categoría A: 10 Categoría B: 20	Excelente C. 17 Buena C.57	Límite máx: 57 Excelente y buena calidad: 17	CUMPLE PARA TODAS LAS NORMAS INDICADAS (< 0.17 mg.Kg ⁻¹)

Criterios de clasificación del producto	Ley Colombiana Decreto 1287 (2014)	Ley Mexicana NOM 004, 2002	Norma E.U 40 CFR parte 503 Límites máximos permisibles	Parámetro del Biosólido
Ni(mg.Kg ⁻¹)	Categoría A: 80 Categoría B: 420	Excelente C. 420 Buena C. 420	Limite máx: 420 Excelente y buena calidad: 420	-
Pb(mg.Kg ⁻¹)	Categoría A: 300 Categoría B: 400	Excelente C. 300 Buena C. 840	Limite máx: 840 Excelente y buena calidad: 300	CUMPLE PARA TODAS LAS NORMAS INDICADAS (4.78 mg.Kg ⁻¹)
Cu (mg.Kg ⁻¹)	Categoría A: 1000 Categoría B: 1750	Excelente C. 1500 Buena C. 4300	Limite máx: 4300 Excelente y buena calidad: 1500	-
Mb (mg.Kg ⁻¹)	Categoría A: 18 Categoría B: 75	-	Limite máx: 75	-
Se (mg.Kg ⁻¹)	Categoría A: 36 Categoría B: 100	-	Limite máx: 100 Excelente y buena calidad: 36	-
Zn (mg.Kg ⁻¹)	Categoría A: 2000 Categoría B: 2800	Excelente C. 2800 Buena C. 7500	Limite máx: 7500 Excelente y buena calidad: 2500	-

Fuente: Colombia (Decreto 1287 de 2014), México (NOM-004-SEMARNT-2002) y E.U. E.P.A (Norma 503-40CFR/2003)

En cuanto a los parámetros microbiológicos enunciados en la **Tabla 20**, para las tres normas citadas el biosólido estudiado muestra una tendencia a pertenecer a la **Clase A**.

Tabla 20. Límites nacionales e internacionales para parámetros microbiológicos

Parámetro	Ley Colombiana Decreto 1287 (2014)	Ley Mexicana NOM 004 (2002)	Norma U.S. 40 CFR parte 503 Límites máximos permisibles	Parámetro del Biosólido
Salmonella spp	Categoría A: Ausencia Categoría B: <1x10 ³ UFC/25g base seca	Clase A: < 3 NMP/g base seca Clase B: < 3 NMP/g base seca Clase C: < 300 NMP/g base seca	Clase A: 3 UFC/4 g	-
Coliformes fecales	Categoría A: <1x10 ³ UFC/g Categoría B: < 2x10 ⁶ UFC/g	Clase A y B: <1000 NMP/g Clase C: < 2x10 ⁶ NMP/g	Clase A: <1000 UFC/g Clase B: <2x10 ⁶ UFC/g	CUMPLE PARA TODAS LAS NORMAS INDICADAS (0 UFC/g)
Huevos de Helminto viables	Categoría A: <1 huevo de H. en 4g de muestra Categoría B: <10	Clase A: <1 HH/g en base seca Clase B: <10 HH/g en base seca	Clase A: 1/4 HH/g	CUMPLE PARA TODAS LAS NORMAS INDICADAS (0 HH /g)

Parámetro	Ley Colombiana Decreto 1287 (2014)	Ley Mexicana NOM 004 (2002)	Norma U.S. 40 CFR parte 503 Límites máximos permisibles	Parámetro del Biosólido
Huevos de Helmintho viables (continuación)	huevo de H. en 4g de muestra	Clase C: <35 HH/g en base seca	Clase A: 1/4 HH/g	CUMPLE PARA TODAS LAS NORMAS INDICADAS (0 HH /g)
Virus Entéricos	Categoría A: <1 UFP en 4g de muestra		-	-
Ecotoxicidad (Daphnia Pulex)	-		-	27.2 %

Fuente: Colombia (Decreto 1287 de 2014), México (NOM-004-SEMARNT-2002) y U.S. E.P.A (Norma 503-40CFR/2003)

En cuanto a los parámetros de metales pesados a los que no se le realizaron mediciones, se puede realizar una asociación con los resultados obtenidos para la Ecotoxicidad (Biosólido NO ECOTÓXICO), ya que el material que se analizó en su composición no evidencia la presencia de compuestos que generen un efecto nocivo para la salud humana y del ambiente (ya que pueden existir muchos compuestos pero no se han medido todos), lo que indica que la muestra analizada para el caso de los otros parámetros podría cumplir con los límites establecidos, ya que de no ser así, se hubiera evidenciado un nivel de toxicidad considerable (Centro Internacional de Investigaciones para el desarrollo, 2004) y a partir de esto se podría afirmar también que la muestra no representa un riesgo ecológico (Pinto & Sánchez, 2011).

La utilización de biosólidos de calidad aceptable a través del sistema suelo puede contribuir de forma importante a la conservación de los recursos naturales, siempre que se lleve a cabo en forma racional, lo que implica sacar el máximo provecho a los aspectos ventajosos (aporte de materia orgánica y nutrientes al sistema suelo-plantas, y reducir al mínimo los que puedan ser desfavorables para la salud pública y el medio ambiente (exceso de nutrientes y contaminantes) (Vélez, 2007). Además los biosólidos contienen un valor nutrimental que mejora la fertilidad de los suelos y la producción de los cultivos (Kara et al., 2003; Citado por Potisek *et al.*, 2010); son ricos en materia orgánica (60 a 70%) y nutrimentos esenciales para el crecimiento de las plantas, como el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Una tonelada de biosólidos puede contener de 37 a 50 kg de N y de 13 a 24 kg de P (Stehower, 2000; Citado por Potisek *et al.*, 2010).

En lo que respecta a la norma Colombiana que rige y controla el aprovechamiento de los biosólidos para uso agrícola (acondicionadores del suelo: abonos, fertilizantes o enmiendas) se encuentra la NTC 5167 (2011), dentro de la cual se establecen indicaciones relacionadas con la obtención y los componentes principales del biosólido, criterios de clasificación del producto y parámetros a garantizar del mismo. Según ésta norma, el Biosólido estudiado se inclina a pertenecer a la categoría de **Enmienda orgánica no húmica**, definido como un producto orgánico sólido obtenido a partir de la deshidratación y estabilización de residuos provenientes de plantas industriales, plantas de tratamiento de agua residual, agroindustrial y doméstica; y residuos sólidos urbanos separados en la fuente. Los parámetros establecidos por la norma mencionada están consolidados en la **Tabla 21**.

Tabla 21. Parámetros a cumplir para una Enmienda orgánica no húmica

Criterios de clasificación del producto	Límite definido NTC 5167 (2011)	Parámetro del Biosólido
Humedad	Máximo 20%	NO CUMPLE (72%)
Contenido de carbono orgánico oxidable total	Mínimo 25%	-
CIC (para productos insolubles en agua)	30 cmol (+) kg ⁻¹	NO APLICA
Contenido de sodio soluble	Reportar	-
As(mg.Kg⁻¹)	41	CUMPLE (3.84 mg.Kg ⁻¹)
Cd(mg.Kg⁻¹)	39	-
Cr(mg.Kg⁻¹)	1200	-
Hg(mg.Kg⁻¹)	17	CUMPLE (< 0.17 mg.Kg ⁻¹)
Ni(mg.Kg⁻¹)	420	-
Pb(mg.Kg⁻¹)	300	CUMPLE (4.78 mg.Kg ⁻¹)
Cu (mg.Kg⁻¹)	-	-
Mb (mg.Kg⁻¹)	-	-
Se (mg.Kg⁻¹)	-	-
Zn (mg.Kg⁻¹)	-	-
Salmonella spp	Ausente en 25 g	-
Coliformes totales	<1000 NMP o UFC/g O mL	CUMPLE (0 UFC.g ⁻¹)
Huevos de Helminto viables	<1 huevo de H. en 4g de muestra	CUMPLE (0 HH.g ⁻¹)
Fitopatógenos	Ausente	-

Acorde con ésta normativa se puede inferir que el único parámetro evaluado que no cumplió fue la humedad, para lo cual se podría implementar un proceso de deshidratación natural o mecánica (García, 2006), que sería fijado según lo definido por la administración del Relleno Sanitario. Según la determinación del tipo de deshidratación, el resultado de la humedad del biosólido daría indicios del tipo de uso que tendría. Por la deshidratación natural, por medio de lechos de secado atmosférico, adición de arena, entre otros; se tendría un porcentaje de materia seca del 15-80%, con el cual el biosólido queda apto para el proceso de incineración. Por otro lado, al emplear procesos mecánicos, como filtración por bandas, prensas o filtro giratorio; al igual que la centrifugación por medio de un decantador, se obtiene un biosólido con una materia seca del 10-60%, donde tendría la facultad de aprovecharse en el compostaje (como material de soporte o mezcla) (García, 2006).

Salcedo *et al.*, (2007) emplearon una deshidratación de un lodo residual, por medio de un lecho de secado natural. Según Remis & Mendoza (2011) en China, la deshidratación se emplea como uno de los tratamientos más empleados para la reducción del volumen de los lodos residuales. Según la metodología que se determine para la deshidratación del biosólido, se deberá tener en cuenta que el factor que aporta la humedad del biosólido es el lixiviado. Por lo anterior, deberá ser un proceso bien estructurado para darle recolección o manejo al lixiviado que se extraiga del biosólido.

Partiendo del hecho que el biosólido estudiado para los parámetros estudiados en la presente investigación, este tipo de subproducto fue catalogado como no ecotóxico y por lo tanto, se podría afirmar que no tiene concentraciones de metales pesados que representen un peligro para el entorno. Lo anterior podría llevar a decir que el biosólido está encaminado a pertenecer a la categoría de enmienda orgánica no húmica y además se recomienda para estudios futuros, la evaluación de los parámetros que no se estimaron en el presente estudio (Contenido de carbono orgánico oxidable total y Fitopatógenos). Se estableció como método más viable para la deshidratación del biosólido el Filtro Prensa.

Cabe resaltar que el parámetro de Conductividad Eléctrica es un indicador del contenido de sales (indica presencia de sodio soluble), y al ser evaluado se encontró un valor elevado del mismo, podría inferirse que el biosólido presenta concentraciones de sales elevadas, sin embargo al no ser estipulado un valor límite en la norma, no generaría una restricción para éste uso.

Por otro lado, en el caso del Decreto 1287 de 2014 y la NOM 004 de 2002, según las características fisicoquímicas, microbiológicas y ecotoxicológicas del lodo, se encontraron distintas opciones de aprovechamiento para el biosólido enunciadas a continuación:

- Como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos que modifiquen su calidad original. Los procesos de elaboración y características de los productos finales y su uso, queda sujeto a la regulación establecida por el ICA (Decreto 1287 de 2014).
- Para remediación de suelos contaminados, lechos biológicos para el tratamiento de emisiones y vertimientos, soporte físico y sustrato biológico en sistemas de filtración, absorción y adsorción (Decreto 1287 de 2014). Para el uso del biosólido como sustrato biológico en biofiltros se deben evaluar los efectos del mismo en los microorganismos, y tener en cuenta el tamaño de partícula que se requiera para el mismo.
- En la estabilización de taludes de proyectos de la red vial nacional, red vial secundaria o terciaria (Decreto 1287 de 2014).
- En la operación de rellenos sanitarios como: cobertura diaria, cobertura final de cierre y de clausura de plataformas y en actividades de revegetalización y paisajismo (Decreto 1287 de 2014).
- Incineración-valorización energética (Decreto 1287 de 2014, NOM 004 de 2002)

Teniendo como referencia la NTC 5167 se pueden analizar los distintos acondicionamientos que con los parámetros obtenidos se le tendría que realizar al biosólido. Hablando de los nutrientes que para emplear el biosólido como enmienda, se tendría que incrementar el contenido de materia orgánica del mismo, adicionando algún tipo de material que cumpla con éste propósito, según Roberts *et al.*, (1988), citado por Potisek *et. al.*, (2010), se tiene que es común tener que adicionarle distintos fertilizantes a los biosólidos, ya que por lo general el N tiende a decrecer o alguno de los elementos “nutritivos” están por debajo de los límites recomendados por la norma. Por otro lado se tiene que el valor de la humedad está por debajo del nivel requerido, por lo que se le debería incrementar la misma. Evidentemente para emplear este material como enmienda no húmica se tendrían que analizar los distintos parámetros que por presupuesto del proyecto no se midieron (capacidad de intercambio catiónico, contenido de sodio soluble, Cu, Se, Mb, Zn y fitopatógenos).

Para el caso de emplear éste biosólido como materia prima o material de soporte para compostaje se tienen las siguientes condiciones a cumplir:

- Usualmente pueden procesarse biorresiduos con un rango amplio de pH (3,0 – 11,0 Unidades), Sin embargo el rango óptimo para el proceso está entre 5,5 - 8,0 Unidades (de Bertoldi, 1983) lo anterior el biosólido estudiado se encuentra dentro del rango de pH (mínimo 9,5 UND, valor máximo 11,19)

establecido para sustratos que van a ser procesados por compostaje, por lo tanto, no se encuentra dentro del rango ideal del proceso.

- Para el caso de la humedad se puede encontrar diferentes rangos, Agnew y Leonard, (2003), recomiendan un rango entre 50-65% y Chiumenti *et. al.*, (2007) plantean un rango entre 40-60%. Considerando que éste es un parámetro estrechamente vinculado a los microorganismos, y, dado que el biosólido presenta una humedad por encima del 45%, refleja la necesidad de un pretratamiento de deshidratación previo a su aprovechamiento (FAO, 2013).
- El Fósforo es fundamental para el crecimiento de las plantas y necesario para la acumulación y liberación de energía asociados con el metabolismo celular. Teniendo en cuenta que éste elemento es esencial en la eficiencia de la fotosíntesis y por lo general es deficiente en la mayoría de los suelos naturales o agrícolas (FAO, 2013), el biosólido presenta deficiencia en dicho mineral (Carabalí, 2017).
- El Calcio y el Potasio son necesarios en cantidades traza, por lo que frecuentemente son denominados elementos traza esenciales. Según los resultados obtenidos el biosólido evaluado en el presente estudio presentó una alta concentración de Calcio, por lo que para éste parámetro se deberá tener precaución al ser usado para acondicionador de suelos por medio del proceso de compostaje (FAO, 2013).
- La Conductividad Eléctrica es un indicador del contenido de sales (o electrolitos) en el producto. Epstein (1997), indica que valores de conductividad eléctrica mayores que 5 mS cm⁻¹, pueden generar fitotoxicidad. Según lo anterior, para el caso del biosólido se tiene una conductividad eléctrica que podría generar fitotoxicidad (9.6 mS.cm⁻¹), por tanto, se debe usar como mezcla.
- El nitrógeno contenido en los lodos de plantas de tratamiento se presenta en formas que son asimiladas con menos velocidad que las aportadas por los abonos minerales. Este hecho puede ser al mismo tiempo ventaja e inconveniente (tiene lugar una liberación progresiva pero incontrolada). Una fracción de nitrógeno puede estar presente como formas no asimilables inmediatamente e incluso no disponibles en los primeros años posteriores a su aplicación. Las características de la materia orgánica influyen sobre la velocidad de mineralización del nitrógeno y en determinadas condiciones pueden conducir a un bloqueo del nitrógeno contenido en el lodo e incluso del que estaba inicialmente presente en el suelo (Murcia, 2013).

Lo anteriormente mencionado denota que en sí el biosólido no serviría por sí solo para realizar éste tipo de proceso, sin embargo, se puede emplear como material de soporte en una mezcla con biorresiduos para posteriormente someterse al proceso de compostaje. Salcedo *et al.*, (2007) evaluaron un lodo residual mezclado con residuos de jardinería en una proporción 1:2; obteniendo incrementos en varios parámetros que traen beneficios al terreno (MO, N, P y C/N), lo que podría representar que el emplear el biosólido evaluado en una mezcla para compost es una alternativa bastante factible. Cabe resaltar que para emplearse en éste tipo de aprovechamiento se deben estudiar las proporciones, las condiciones de la materia prima (biorresiduo), y el acondicionamiento previo del biosólido (deshidratación).

Adicionalmente, se tiene la opción de obtener *Biochar* a partir del biosólido evaluado, ya que el mismo cumple los requisitos para emplearse como materia prima, siendo así una forma de aprovecharlos como una enmienda en los suelos, ya que al utilizar *Biochar* en los suelos se generan mejoras en sus propiedades químicas, físicas y biológicas (Lone *et al.*, 2015). La aplicación del *Biochar* en los suelos ayuda a minimizar la emisión de gases de efecto invernadero, contribuye a la reducción de lavado de nutrientes, el requerimiento

de estos y la acidez permitiendo que el pH del suelo aumente. Aumenta el nivel de disponibilidad y absorción de cationes (Ca, Mg, P y K) por unidad de carbono, así mismo la biomasa microbiana del suelo aumenta. Incrementa la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y la reactividad del Biocarbón en el suelo. Esto permite el aumento de la productividad en suelos marginales, llevando a que la producción de alimentos sea sostenible. Como beneficios adicionales esta la mejora la calidad de las aguas subterráneas reduciendo la contaminación por el arrastre de nutrientes, corrige los suelos y genera depósitos de carbono (Pastor, 2001; Escarlante, 2013; Ibarrola, 2013, citados por Forero & Navarro, 2017).

Lo previamente mencionado en ésta sección permite reconocer que el biosólido estudiado posee un potencial de aprovechamiento alto, donde se enunciaron las distintas opciones del mismo planteadas por la normatividad nacional e internacional. Su aprovechamiento finalmente se definirá acorde con la factibilidad de los directivos del Relleno Sanitario regional y de la operación y continuidad de la Planta de tratamiento de lixiviados mediante ELECTROFLOX®, ya que el objetivo de éste estudio no abarca la evaluación de las alternativas de aprovechamiento de este tipo de subproducto.

9 CONCLUSIONES

El proceso de ELECTROFLOX® para el tratamiento del Lixiviado presentó un rango de eliminación de DQO entre el 38 y 55% y se encontró que las características fisicoquímicas, toxicológicas y microbiológicas evaluadas fueron buenas para la matriz sólida, por lo tanto, se concluye que la tecnología empleada es efectiva en el tratamiento del lixiviado.

La cantidad de lodo obtenido durante el periodo de muestreo de la planta piloto de ELECTROFLOX® se determinó en función de la DQO removida (15.86 a 34.77 L de Lodo.kg DQO removida⁻¹), tiempo de operación (65.32 a 83.32 kg Lodo.h⁻¹) y volumen de lixiviado tratado (100.61 a 135.52 kg de Lodo.m⁻³).

De acuerdo con lo reportado por Carabalí (2017) y Muñoz (2017), el biosólido presentó una concentración de M.O. (6.19 - 18.52%) que al ser empleada como acondicionador de suelos podría representar un aporte al mismo. Para la evaluación del Fósforo podría afirmarse que el biosólido requeriría de una adición de éste, ya que al presentar un rango de 0.001-0.018% y al comparar con los rangos reportados por distintos autores: 0.1 a 0.5% en cultivos (Múnera & Meza, 2012); 3 a 83% en cultivos (Montecinos, 2014) y 0.23 a 0.99% en sedimentos (Carabalí, 2017), el biosólido carecería de éste nutriente. En cuanto al Nitrógeno los valores obtenidos (0.08 a 0.35%) representan un bajo contenido respecto a lo reportado por Carabalí (2017) para sedimentos de lagunas de lixiviados con alto contenido de nitrógeno (0.70 a 1.13%) y que por lo anterior, podría requerirse de la adición de materiales para uso como acondicionador de suelo.

La humedad representó un parámetro a tener en cuenta ya que en el caso de aprovechamiento como enmienda orgánica no húmica excede el porcentaje máximo permisible (>15%) para la norma colombiana de aprovechamiento (NTC 5167 de 2011), sin embargo, se tiene que realizar un proceso de deshidratación (Filtro prensa) que permita llevar el biosólido al porcentaje de humedad adecuado.

Para el caso de Conductividad Eléctrica se encontró un valor en los lodos (8.72 a 10.53 mS.cm⁻¹), ya que a valores mayores a 5 mS.cm⁻¹ representaría un efecto citotóxico si se llegase a aplicar sin ninguna mezcla o tratamiento a un cultivo o terreno (Epstein, 1997).

El biosólido presentó un pH básico, por lo cual se deberá tener precaución a la hora de implementarlo en un suelo que presente basicidad, o se debe estudiar el efecto de su aplicación en suelos ácidos.

Para los parámetros en materia de **metales pesados** el lodo presento tendencia a la Categoría A (definido por el decreto 1287 de 2014), según la NOM 004 de 2002 (México) el lodo se inclinó hacia una Excelente Calidad y por último según la norma EPA 503 de 2003 (E.U.) el lodo se clasificó en calidad excepcional. Adicionalmente, para **parámetros microbiológicos** se incluyó en Categoría A (Decreto 1287 de 2014) y clase A según las normas NOM-004 de 2002 y EPA 503 de 2003.

Acorde con los resultados obtenidos en los ensayos de Ecotoxicidad aguda, se concluye que el proceso de ELECTROFLOX®, según los parámetros analizados, no evidenció la presencia de subproductos en la matriz

sólida que pudieran representar un riesgo para la salud humana y ambiental, lo cual permite afirmar que el biosólido obtenido como NO es ECOTÓXICO ni se cataloga como un RESPEL.

Aunque el proceso durante el estudio exploratorio presentó distintas variaciones en su operación y evaluación, se lograron obtener datos importantes que permitieron llegar a concluir que este subproducto empleando como biosólidos se podría aprovechar en diferentes formas: material de cobertura diaria en rellenos sanitarios, soporte físico y sustrato biológico en sistemas de filtración, absorción y adsorción, materia prima para la generación de *Biochar*, materia prima para generación de compost, y como enmienda orgánica no húmica posterior a su deshidratación, para lo cual se recomendó emplear el Filtro Prensa.

10 RECOMENDACIONES

Debido a la limitación de presupuesto no se midieron en totalidad los parámetros contemplados en Normas como el Decreto 1287 de 2014 y la NTC 5167 de 2011. Sin embargo, se deben evaluar los otros parámetros considerados dentro del contexto normativo colombiano y empleando normas de referencia a nivel internacional que permitan concluir de forma más categórica las posibles alternativas de manejo final para este tipo de subproducto.

De los parámetros adicionales que se recomiendan para realizar la evaluación en el biosólido se incluyen el Contenido de Carbono Orgánico, Fitopatógenos, *Salmonella spp* y Virus Entéricos. Ya que se encuentran requeridos en las normas Nacionales e Internacionales. De igual manera todos los demás metales contemplados en el decreto 1287 de Julio de 2014 que no fueron determinados en la presente investigación.

En el caso de realizar la deshidratación del biosólido para obtener una humedad adecuada para emplearlo como Enmienda orgánica no húmica, se deberá tener precaución con el manejo de la humedad que se desprenda, ya que la misma representa el lixiviado que no se logró eliminar del biosólido. Se deberá diseñar un sistema de recolección del mismo, para no generar impactos en el ambiente.

De igual forma, como tema de investigación se debería evaluar cuál de las propuestas en el presente estudio serían definitivas para el aprovechamiento y valorización del biosólido, según los intereses del Relleno Sanitario, y que éste simplemente no se disponga en el relleno.

Para llevar a cabo un mejor seguimiento de la cantidad de lodo generado se recomienda medir parámetros de la planta de ELECTROFLOX® tales como: la concentración de SST en el lixiviado (a la entrada y salida de la planta), densidad del lixiviado, concentración de sólidos en el lodo y gravedad específica en el mismo, ya que esta información permite determinar la cantidad de lodo (masa), que se puede producir en el sistema de tratamiento y que puede ayudar a determinar el volumen de este subproducto que se genera.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Buga. (06 de 11 de 2011). *Alcaldía de Guadalajara de Buga, Valle del Cauca*. Recuperado el 10 de 10 de 2015, de <http://www.guadajaradebuga-valle.gov.co/noticias.shtml?apc=Cnxx-1-&x=1699022>
- Alvarado, N. (2016). Tratamiento de lixiviados del relleno sanitario del cantón Tena provincia de Napo mediante reacción fenton y microorganismos eficientes. *Tesis de Pregrado*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias. Escuela de Ciencias Química.
- Al-Wabel, M., Al Yehya, W. S., Al-Farraj, A. S., & El-Maghraby, S. E. (2011). Characteristics of landfill leachates and bio-solids of municipal solid waste (MSW) in Riyadh City, Saudi Arabia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2(10), 65-70.
- Andreoli, C., Ferreira, A., Cherubini, C., Rodrigues, C., Cameiro, C., & Fernandes, F. (2001). *Capítulo 4: Higienização do lodo de esgoto. En: Resíduos sólidos do saneamento; processamento, reciclagem e disposição final*. Brasil: ABES Y PROSAB.
- APPA, AWWA, WEF. (2012). *Standar Methods for the examination of water & waste water*. Washington D.C: Centennial Edition.
- Aulestia, K. (2012). Respuestas fisiológicas de tres especies vegetales nativas sometidas a tratamiento con lixiviado de relleno sanitario . Cali: Universidad del Valle.
- Aziz, H., Othman, O., & Amr, S. (2013). The performance of Electro-Fenton oxidation in the removal of coliform bacteria from landfill leachate. *Waste Management*, 33, 396-400.
- Bautista, G. A. (Febrero de 2009). Evaluación en tres microambientes diferentes de la termoresistencia de una cepa de Salmonella spp aislada de Compost. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Bódalo, A., Hidalgo, A., Gómez, M., & Murcia, M. (2007). Tecnologías de tratamiento de lixiviados de vertedero (III) Tratamientos avanzados. (454), 108-114. España: Universidad de Murcia: Ingeniería Química.
- Bouhezila, F., Hariti, M., Lounici, H., & Mameri, N. (2011). Treatment of the OUED SMAR town landfill leachate by an electrochemical reactor. *Desalination*, 280(1), 347-353.
- Carabalí, J. (2017). Valorización de sedimentos de lagunas de lixiviados como posible enmienda en suelos con características ácidas. *Tesis de Maestría*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Carranza, C. M. (2017). Análisis de Tecnologías Eco-eficientes para la Disposición Final de Residuos Sólidos en las empresas CORASEO S.A Y SEACOR S.A. *Tesis de Pregrado*. Bogotá, Colombia: Universidad del Rosario.
- Castillo & Rivera, s. (s.f.). *Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental*. Recuperado el 13 de Julio de 2015, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/ecuador10/elec.pdf>
- Centro Internacional de Investigaciones para el desarrollo. (2004). *Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de la calidad de aguas*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Cerón, V. (2014). *Estudio de la capacidad de Biofijación de CO2 de una laguna algal de alta tasa en condiciones del Trópico*. Cali , Valle del Cauca, Colombia: Universidad del Valle.
- Chamorro, E., Osorio, J., & Restrepo, C. (2015). Efecto del Diclofenaco sódico sobre la fisiología reproductiva de Daphnia Púlex. *Research Gate*.
- Chiumenti, A., Da Borso, F., Rodar, T., & R., C. (2007). Swine manure composting by means of experimental turning equipment. *Waste Mangement*, 27(12), 1774-1782.
- Christensen, T. (2011). *Solid Waste Technology and Management*. Londres: Wiley.

- Cortés, A. E. (2014). *Evaluación del desempeño de humedales construidos subsuperficial de flujo horizontal sembrados con especies nativas tropicales para la eliminación de Cr (VI) y Cd (II) de Lixiviado de relleno sanitario*. Cali, Valle del Cauca, Colombia: Universidad del Valle.
- DANE. (16 de Noviembre de 2016). Boletín Técnico . *Cuenta Ambiental y Económica de Flujos de Materiales - Residuos Sólidos 2012 – 2014p*. Bogotá, Colombia.
- De Bertoldi, M. D., Vallini, G. E., & Pera, A. (1983). The biology of composting: a review. *Waste Management & Research*, 1(2), 157-176.
- Donneys, D. (2013). Uso combinado de electrodisolución y floculación para el tratamiento de Lixiviados. Cali, Valle: Universidad del Valle.
- Durán, L., & Henríquez, C. (2007). Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos. *Agronomía Costarricense*, 31(1), 41-45.
- El País. (17 de Mayo de 2017). *El País.com.co*. Recuperado el 02 de Diciembre de 2017, de <http://www.elpais.com.co/cal/en-se-generan-1700-toneladas-diarias-de-residuos-solidos-y-solo-se-recicla-el-10.html>
- FAO. (2013). Manual de Compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina. Santiago de Chile.
- Fernandes, F., & Souza, S. (2001). Capítulo 2: Estabilização de lodo de esgoto, en: Resíduos sólidos do saneamento; Processamento, reciclagem e disposição final. Brasil: ABES Y PROSAB.
- Flórez, M. A. (2007). Caracterización de los lodos generados en el proceso de coagulación floculación de los lixiviados del vertedero de Navarro y posibilidad de manejo final. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Forero, D., & Navarro, J. (2017). Implementación de alternativa de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos mediante el proceso de pirólisis lenta para la obtención de materiales de uso agrícola. Bogotá, Colombia: Universidad de la Salle.
- Franco, L. C., & Guiffo, L. M. (2012). *Descontaminación de lixiviados pretatados, por electrodosificación y floculación, aplicando oxidación fotofenton*. Cali: Universidad del Valle.
- Galvis, J., & 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. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado el 04 de 01 de 2017, de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/3898/62839G182.pdf?sequence=1>
- Gandhimathi, R., Durai, N. J., Nidheesh, P. V., Ramesh, S. T., & Kanmani, S. (2013). Use of combined coagulation-adsorption process as pretreatment of landfill leachate. *Iranian journal of environmental health science & engineering*, 10(1), 24.
- Garaj-Vrhovac, V., Oreščanin, V., Gajski, G., Geric', M., Ruk, D., Kollar, R., . . . Cvjetko, P. (2013). Toxicological characterization of the landfill leachate prior/after chemical and electrochemical treatment: A study on human and plant cells. *Chemosphere*(93), 939-945.
- García, J., Ferrer, C., & Albarrán, F. (23-24 de Julio de 2008). Tratamiento de Lixiviados de Vertedero de RSU por procesos de membranas. 1-8. Castellón, España.
- García, L., & Marriaga, N. (2014). Informe Final de Pruebas Piloto ELECTROFLOX Convenio Universidad del Valle - Industria Licorera de Caldas (Etapa III). Caldas, Colombia.
- García, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos conciencia*(1), 51-58.
- Giraldo, E. (2001). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances recientes. *Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes*(14), 44-55.

- Grisey, E., Belle, E., Dat, J., Mudry, J., & Aleya, L. (2010). Survival of pathogenic and indicator organisms in groundwater and landfill leachate through coupling bacterial enumeration with tracer tests. *Desalination*, 261, 162-168.
- Groth, V. A., Carvalho-Pereira, T., da Silva, E. M., & Niemeyer, J. C. (2016). Ecotoxicological assessment of biosolids by microcosms. *Chemosphere*, 161, 342-348.
- Hernández, A. L. (2002). *Evaluación de Lodos Residuales Provenientes de la Planta de Tratamiento Electroquímica de Aguas Residuales del Campus Estado de México del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey*. Monterrey, México: Edición Única.
- Horstkotte, G. (1974). Full-scale testing of a water reclamation plant. *Water Pollut. Control Fed*(46), 181-186.
- ICONTEC. (23 de Marzo de 2011). Norma Técnica Colombiana 5167. *Productos para la industria Agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. Colombia: ICONTEC.
- IDEAM-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2007). Res. 0062 de 2007. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Colombia.
- Ilhan, F., Kurt, U., Apaydin, O., & Gonullu, M. T. (2008). Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. *Journal of hazardous materials*, 154(1), 381-389.
- Kan, Y. W., & Hwang, K.-Y. (2000). Effects of reaction conditions on the oxidation efficiency in the fenton process. *Water research*, 34(10), 2786-2790.
- Kjeldsen, P. (2002). Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297-336.
- Kulikowska, D., & Klimiuk, E. (s.f.). The effect of Landfill age on municipal leachate composition. *Bioresource Technology*(99), 5981-5985.
- Leal, J. (2012). Desempeño del proceso Electroflux en aguas residuales de tintas. *Tesis de Pregrado*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Leblanc, H., Cerrato, M., Miranda, A., & Valle, G. (2007). Determinación de la calidad de abonos orgánicos a través de Bioensayos. *Tierra Tropical*, 3(1), 97-107.
- Lone, A., Najar, G., Ganie, M., Sofi, J., & Ali, T. (2015). Biochar for Sustainable Soil Health: A Review of Prospects and Concerns. *Pedosphere*, 5(25), 639-653.
- Machuca Martinez, F., Marriaga Cabrales, N. d., & Cardona Palomino, C. E. (2013). *Colombia Patente n° 20130153509*. Obtenido de <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US82134399&recNum=1&maxRec=6&office=&prevFilter=&sortOption=Pub+Date+Desc&queryString=FP%3A%28nilson+marriaga%29&tab=NationalBiblio>
- Madera-Parra, C. A., Peña-Salamanca, E. J., & Solarte-Soto, J. A. (2014). Effect of heavy metal concentration on the physiological responses and heavy metal accumulation of three tropical plant species used for phytoremediation of landfill leachate. *Ingeniería y Competitividad*, 16(2), 179-188.
- Marriaga, N., & Machuca, F. (17-19 de Noviembre de 2010). Proceso Electroflux para el tratamiento de vinazas y aguas residuales industriales, de la Universidad a la Industria, retos y oportunidades. Cali, Colombia.
- Marriaga-Cabrales, N., Machuca-Martinez, F., Donneys-Victoria, D., & Alvarez-Pugliese, C. E. (s.f.). *Electroflux® Pilot plant for primary wastewater treatment of leachate*. En: *Materials for Energy, Efficiency and Sustainability: TechConnect Briefs 2017*. Recuperado el 19 de Noviembre de 2017, de *Materials for Energy, Efficiency and Sustainability: TechConnect Briefs 2017*, pp. 243-246: <https://techconnect.org/proceedings/2017/pdf/408.pdf>

- Méndez, J. M., Jiménez, B. E., & Salgado, G. V. (2002). *Efecto del amoníaco en la estabilización alcalina de lodos residuales*. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México.
- Méndez, R., Castillo, E., Sauri, M. R., Quintal, C. A., Giacomán, G., & Jimenez, B. (2009). Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(3), 133-145.
- Méndez, R., Castillo, E., Sauri, M. R., Quintal, C., Giacomán, G. Y., & Giménez, B. (2004). Tratamiento físico químico de lixiviados de un relleno sanitario. *Ingeniería*, 8(2), 155-163.
- Merril, D., & Jorden, R. (1975). Lime-induced reactions in municipal waters. *Water Pollut. Control Fed*(47), 2783-2808.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia. (17 de Octubre de 2016). *Noticias-MinAmbiente*. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2512-en-cuenta-regresiva-para-limpiar-colombia>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). Decreto 838. *Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones*. Colombia. Recuperado el 15 de 02 de 2016, de https://www.redjurista.com/Documents/decreto_838_de_2005_ministerio_de_ambiente,_vivienda_y_desarrollo_territorial.aspx#
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT). (10 de Julio de 2014). Decreto 1287. *Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*. Colombia.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2013). Decreto 2981. *Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo*. Colombia. Recuperado el 10 de 02 de 2016, de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=56035>
- Montecinos, C. (2014). Manejo biológico del fósforo en el suelo. CLADES-Centro Latinoamericano de Desarrollo Sostenible.
- Moreno, F., Díaz, V., Acosta, J., Muñóz, M. Á., Faz, Á., & Zamora, R. (2017). Organic matter dynamics, soil aggregation and microbial biomass and activity in Technosols created with metalliferous mine residues, biochar and marble waste. *Geoderma*, 19-29.
- Morozesk, M., Bonomo, M., Rocha, L. D., Zanezi, E. R., Jesus, H. C., & Matsumoto, S. T. (2016). Landfill leachate sludge use as soil additive prior and after electrocoagulation treatment: A cytological assesment using CHO-k1 cells. *Chemosphere*(158), 66-71.
- Munera, G., & Meza, D. (2012). El Fósforo elemento indispensable para la vida vegetal. Laboratorio de analisis de suelos-facultad de tecnología-Universidad Tecnológica de Pereira.
- Muñoz, W. (2017). Evaluación De La Toxicidad Del Sedimento De Una Laguna De Lixiviados De Un Relleno Sanitario Municipal Mediante El Uso De Indicadores Biológicos. *Tesis de Pregrado*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Murcia, F. (2013). Lodos de depuradora: Una visión integral para su posible aplicación a suelos desde una perspectiva Agrícola. Murcia: Universidad de Murcia.
- Noguera, K., & Olivero, J. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: Caso Colombiano. *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, 347-356.
- Öman, C. B., & Junestedt, C. (2008). Chemical characterization of landfill leachates—400 parameters and compounds. *Waste management*, 28(10), 1876-1891.

- Øygard, J. K., Gjengedal, E., & Mobbs, H. J. (2008). Trace element exposure in the environment from MSW landfill leachate sediments measured by a sequential extraction technique. *Journal of hazardous materials*, 153(1), 751-758.
- PAHO. (25 de Julio de 2015). *Curso de Autoaprendizaje: Diseño, construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales. Unidad tres: Rellenos Sanitarios*. Obtenido de http://www.bvsde.paho.org/cursoa_rsm/e/unidad3.html
- Pastás, J., & Balanta, O. (s.f.). Aplicación del proceso Electroflocc en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la molienda húmeda de maíz. *Tesis de Pregrado*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Paz-Pino, O. L., Barba-Ho, L. E., & Marriaga-Cabrales, N. (2014). Vinasse treatment by coupling of electro-dissolution, hetero-coagulation and anaerobic digestion. 81(187), 102-107.
- Pinto, X., & Sánchez, J. (2011). Determinación de la concentración letal media de Selenio y Cobalto mediante bioensayos de Toxicidad acuática con organismos *Daphnia Pulex*. Bogotá, Colombia: Universidad de la Salle .
- Potisek, M., Figueroa, U., Gonzáles, G., Jasso, R., & Orona, I. (2010). Aplicación de biosólidos al suelo y su efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrientes. *Terra Latinoamericana*, 28(4), 327-333.
- Puenguenán, O., & Segura, K. V. (2013). *Proceso de ELECTROFLOCC en el tratamiento de aguas residuales de curtiembre*. Cali, Valle del Cauca, Colombia : Universidad del Valle.
- Ramírez, F. E. (2014). Tratamiento primario de lixiviado intermedio de relleno sanitario mediante bioreactor Laguna Anaerobia de Alta tasa (BLAAT): Evaluación del desempeño a escala piloto en ambiente tropical. Cali, Valle del Cauca, Colombia: Universidad del Valle.
- Remis, R., & Espinosa, L. (2011). El potencial de generación de energía eléctrica empleando biosólidos como fuente de materia prima: El caso de la ciudad de Ensenada, Baja California. *In Memorias del IV Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Recuperación de energía a partir de residuos*, 5, 343-344. México, DF.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: review and opportunity. *Journal of hazardous materials*, 150(3), 468-493.
- Renou, S., Poulain, S., J.G. G., & Moulin, P. (2008). Treatment process adapted to stabilized leachates: Lime precipitation-prefiltration-reverse osmosis. *Journal of Membrane Science*(313), 9-22.
- Reyes, D., & Mercado, I. D. (2003). Estudio de tratabilidad por electrocoagulación de los lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Ricordel, C., & Djelal, H. (2014). Treatment of landfill leachate with high proportion of refractory materials by electrocoagulation: System performances and sludge settling characteristics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1551-1557.
- Robledo, E., Espinosa, V., Maldonado, R., Rubiños, J. E., Hernández, E., Ojeda, E., & Corlay, L. (2010). Sales solubles y metales pesados en suelos tratados con biosólidos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 2(16), 241-25.
- Salcedo, E., Vásquez, A., Krishnamurthy, L., Zamora, F., Hernández, E., & Rodríguez, R. (2007). Evaluación de lodos residuales como abono orgánico en suelos volcánicos de uso agrícola y forestal en Jalisco, México. *Interciencia*, 32(2), 115-120.
- Sánchez, E. (2014). Aplicación de Electroflocc en aguas residuales de la hidrólisis ácida del almidón de maíz . *Tesis de Pregrado*. Cali, Colombia : Universidad del Valle.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (18 de Febrero de 2002). Norma Oficial Mexicana-NOM-004-SEMARNAT. *Protección ambiental. Lodos y Biosólidos. Especificaciones y límites máximos*

- permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. México: DOF-Diario Oficial de la Federación.
- Semerjian, L., & Ayoub, G. M. (2003). High-pH – magnesium coagulation–flocculation in wastewater treatment. *Advances in Environmental Research*, 7(2), 389-403.
- Silva-Filho, E. V., Sella, S. M., Spinola, E. C., Santos, I. R., Machado, W., & Lacerda, L. D. (2006). Mercury, zinc, manganese, and iron accumulation in leachate pond sediments from a refuse tip in Southeastern Brazil., 82(2), 196-2. *Microchemical Journal*, 2(82), 196-200.
- SSPD. (2015). Situación de la disposición final de residuos sólidos en Colombia.
- Téllez, A. (2012). La complejidad de la problemática de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá. 120. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Económicas.
- Timana, K. (2016). Evaluación del proceso Electroflocc en el tratamiento de aguas residuales de una empresa de productos de cuidado oral, del hogar y personal. *Tesis de Maestría*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Torres, P., Barba, L. E., & Pizarro, C. (2010). Mitigación de la toxicidad anaerobia de lixiviados mediante mezclas con agua residual doméstica. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(53), 64-74.
- U.S. Environmental Protect Agency . (1996). Acid digestion of Sediments, Sludges and Soils. Method 3050B. Recuperado el 15 de Enero de 2016, de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2003). Biosolids Risk Assessments for the EPA part 503 Rule. Washington, DC, USA.
- Univalle. (2015 de Diciembre de 2015). *Agenda de noticias Univalle*. Obtenido de <http://www.univalle.edu.co/medio-ambiente/residuos-solidos-y-pgirs-limitantes-y-retos>
- Vélez, J. (2007). Los Biosólidos: ¿una solución o un problema? *Producción más Limpia*, 2(2), 57-71.
- Veli, S., Öztürk, T., & Dimoglo, A. (2008). Treatment of municipal solid wastes leachate by means of chemical- and electro-coagulation. *Separation and Purification Technology*, 61(1), 82-88.
- Weissinger, W., Chantarapanony, L., & Beuchat, R. (2000). Survival and growth of Salmonella baidon in shredded lettuce and diced tomatoes, and effectiveness of chlorinated water as a sanitizer. *Journal of food microbiology*(62), 123-131.
- WIPO. (s.f.). *Wastewater Treatment Comprising Electrodissolution, Flocculation And Oxidation*. Recuperado el 10 de Agosto de 2017, de World Intellectual Property Organization: <https://patentscope.wipo.int>

12 ANEXOS



Anexo 1. Toma de muestra de Lixiviado en la planta piloto de ELECTROFLOX®



Anexo 2. Descarga de lodo de primer tanque sedimentador – ELECTROFLOX®



Anexo 3. Ensayos de digestión de la muestra para la determinación de metales en el lodo



Anexo 4. Balanza Analítica con muestra de lodo empleada para los ensayos de laboratorio



Anexo 5. Determinación de Materia Orgánica en la muestra de lodo



Anexo 6. Coagulador No. 3 y Floculador No.2 Planta ELECTROFLOX®



Anexo 7. Tanque de Lechada de Cal V-202 Planta ELECTROFLOX®



Anexo 8. Tanque sedimentador de Planta ELECTROFLOX®



Anexo 9. Muestra de lodo secada a temperatura ambiente en el relleno sanitario



Anexo 10. Zona de dosificación de polímero para el tratamiento de lixiviado



Anexo 11. Ubicación de las canastillas para recolección de lodo



Anexo 12. Medición de los niveles de lodo en las canastillas de recolección

En los anexos 13 a 18 se presentan los resultados con los análisis de laboratorio para las pruebas de ecotoxicidad y en los anexos 19 y 20 los resultados de las pruebas microbiológicas realizadas.

Laboratorio Acreditado por el IDEAM para los Parámetros: Alkalinidad Total, Cloruro, Dureza Cálcica, Dureza Magnésica y Dureza Total, Calcio, Magnesio, pH, Conductividad Eléctrica, DBO5, DQO, Sólidos Suspendedos Totales, Sólidos Sedimentables, Grasas y Aceites, Muestreo (Simple, Compuesto e Integrado), Muestras integradas en cuerpos de agua, Lodo, Muestreo RESPEL (superficies deprimidas, bandos transportadoras, barriles, cestales y pilas), Toxicidad Aguda para *Daphnia Pulex*, Toxicidad Aguda en Peces y Toxicidad Crónica en Aislado, según Resolución N° 1715 de 2014.



FACULTAD DE INGENIERIA - FENICAR
Área de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Laboratorios de Servicios a la Comunidad

INFORME DE RESULTADOS DE ECOTOXICIDAD AGUDA CON *Daphnia pulex*

Informe N° 31.2015

Fecha	Envío	Muestra	Envío
	2017	02	27

Cliente:	Andrés Mauricio Ramírez Rosero	Dirección (cliente):	Calle 13 # 100-00	Teléfono:	315 6557280
N° Cotización:	-----	Municipio:	Santiago de Cali	Departamento:	Valle del Cauca
Plan de Muestreo:	-----	Procedencia (lugar de muestreo):	Planta de Tratamiento de Lodos, San Pedro, Valle del Cauca		
Tipo de Muestreo:	Puntual	Sitio de Recolección:	Sedimentador		
Norma / Procedimiento de muestreo:	-----	Clase de muestra:	Lodos de Ladrado		
Condiciones Ambientales durante el muestreo:	Tiempo Seco	Fecha de Muestreo:	16-10-10		
Fecha de Recepción:	16-10-14	Hora / Jornada:	Diurna		
Recolectado por:	Andrés Mauricio Ramírez Rosero	Periodo de Análisis:	17-02-07 a 17-02-16		
Código Interno de Muestra:	31	Código Externo de Muestra:	-----	Análisis Ordenado Por:	Luz Edith Barba Ho

Organismo de Ensayo		Fuente o Referencia
Nombre Científico	<i>Daphnia pulex</i>	Grupo de Investigación de Ecología de Ecosistemas y Manejo de la Universidad del Valle
Proveedor	Cuarto cha Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales	Instituto Colombiano de Petróleos - de ECOFETROL - ICP
Reproducción	2,4 (neonatos/día/hembra)	AFHA-AWWA-WEF, 22 Na Edition, 2012 - SC-FI-105, LARA
Alimento	Trichina, Alfalfa, Levadura	AFHA-AWWA-WEF, 22 Na Edition, 2012 - 6M12
Alimentación (Cantidad/Frecuencia)	1.5 mL cada dos días	SC-FI-97, Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales, LARA
Longevidad	19 a 68 Días	SC-FI-105, Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales, LARA
Iluminación (lúmenes fotoperiodo)	Sylvania F201 12/D de 935 (Lux) ; 16 h luz/8 h oscuridad	http://ecom.mysylvania.com/sylvania/2012/catalogupdate.html de
Intensidad luminosa	655 Lux	SC-FI-120 "Registro de la intensidad luminosa"
Leto Agua Dilución*	01d17p / 01e17p	SC-FI-99, Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales, LARA
LC 50 24h de K2Cr2O7	0.73 (mg/L)	SC-FI-106, LARA: EPA Field Analysis Program, Versión 1.0
Protocolo	Toxicidad Aguda con <i>Daphnia pulex</i>	SC-GT-20, Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales, LARA

DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS			
Equipo	Marca	Serie	Parámetro o variable de control
Balanza Analítica	OHAUS - PIONEER	8331270090	Peso (mg) de muestra
pH - metro	SCIENT	99231111	Control pH en bioensayo
Medidor de Oxígeno disuelto y temperatura	ORION 3 STAR Thermo Scientific	20505	Control Oxígeno disuelto en bioensayo
Luzómetro	EXTECH	031017248	Intensidad de iluminación (Lux)
Termómetro	TERMOCUPLA FLUKE 512 II	LA-44014100	Temperatura cuarto de bioensayos
Agitador mecánico	ACEQ	AG5020	Agitación de la muestra

Nota:

- Este informe de resultados es válido únicamente para las muestras analizadas y relacionadas en el
- Estos resultados no deben reproducirse sin aprobación escrita de los Laboratorios de Servicios a la Comunidad
- El presente documento posee elementos de seguridad que permiten verificar su autenticidad

LABORATORIOS DE SERVICIOS A LA COMUNIDAD, LABORATORIO DE AGUAS Y RESIDUOS AMBIENTALES
UNIVERSIDAD DEL VALLE, CIUDAD UNIVERSITARIA, MELENDEZ, Edificio 336 Telefax 3312173, Teléfono 3312753

SC-FI-99
v. 7.3, 15/10/07

Elaborado por: Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales

Anexo 13. Informe de laboratorio prueba de ecotoxicidad para muestra de semana 3.



FACULTAD DE INGENIERÍA-EIDENAR
Área de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Laboratorios de Servicios a la Comunidad

INFORME DE RESULTADOS DE ECOTOXICIDAD AGUDA CON *Daphnia pulex*.

Informe N° 31 2016

Fecha

Año	Mes	Día
2017	02	27

Muestra (WAF)				LOTE CONTROL NEGATIVO *4				RANGOS DE CONTROL		TRAZABILIDAD	
Parámetros	Resultados		Incertidumbre*2	Resultados	Incertidumbre*2	Aseguramiento de Calidad	Unidades	Método	Procedencia		
	Inicial	Final		Inicial	Final						
Temperatura	21.0	22.0	-	21.0	22.0	-	-	20.0 ± 2 °C	°C	SM 2550-B*	-
pH	8.34	9.15	0.00	7.45	7.80	0.05	0.05	pHf = pHo ± 1 unid.	Unidades	SM 4500-H+ B*	SC-GT-03
Oxígeno Disuelto	7.27	7.67	-	7.50	7.35	-	-	≥ 2.00 mg O2/L *3	mg O2/L	SM 4500-O G*	SC-GT-02
Dureza Total	110		1	98.5		0.9		80-100 *3	mg CaCO3/L	SM 2340 C*	SC-GT-11
Toxicidad Aguda (24h/48h)	11.7	28.3	0.1	≤ 10.0		-----		≤ 10 % en A R	% Muerte	IDEAM *1	SC-GT-20

FIN DE INFORME

* Los métodos mencionados con letras iniciales (SM) corresponden al Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, APHA-AWWA-WEF, 22nd Edition, 2012

* El método mencionado corresponde al protocolo de Toxicidad Aguda con *Daphnia* de la Resolución No. 0082 del IDEAM, 2007.

* El valor de incertidumbre corresponde a un rango (+/-), el cual se aplica adicionándolo o restando al valor del resultado. La incertidumbre está calculada con un factor de cobertura (K=2) y un nivel de confianza del 95%.

* 3 Aplica únicamente para el Control Negativo

* El lote de agua de dilución puede no coincidir con el lote de agua reconstituida, sin embargo, ambos lotes son aprobados, estos se encuentran bajo los rangos óptimos para la especie de ensayo y cumple con los criterios del aseguramiento de la calidad.

Observaciones: _____

- Este informe de resultados es válido únicamente para las muestras analizadas y relacionadas en él.
- Estos resultados no deben reproducirse sin aprobación escrita de los Laboratorios de Servicios a la Comunidad
- El presente documento posee elementos de seguridad que permiten verificar su autenticidad

Aprobado por:

Richard L. Hoyes

Richard L. Hoyes

PQ - 3369

Coordinador de Laboratorio

VoBo:

Leonardo Rubiano

Leonardo Rubiano G

Analista Bioensayos

LABORATORIOS DE SERVICIOS A LA COMUNIDAD, LABORATORIO DE AGUAS Y RESIDUOS AMBIENTALES
UNIVERSIDAD DEL VALLE, CIUDAD UNIVERSITARIA, MELENDEZ, Edificio 336 Telefax 3312175, Teléfono 3212266

SC-F1-94
V.2 31/10/17

Elaborado por: Laboratorio de Aguas y Residuos y Ambiente

Anexo 14. Resultados obtenidos prueba de ecotoxicidad para lodo obtenido de semana 3

INFORME DE RESULTADOS DE ECOTOXICIDAD AGUDA CON *Daphnia pulex*

Informe No. 7. 2016

Factor	Age	Sex	Time
	2017	02	21

Cliente:	Andrés Mauricio Ramírez Rosero	Dirección (cliente):	Calle 13 # 100-00	Teléfono:	216 425738
Nº Cotización:		Municipio:	Santiago de Cali	Departamento:	Valle del Cauca
Plan de Muestreo:		Procedencia (lugar de muestreo):	Reflejo Santiano Presidente, San Pedro, Valle del Cauca		
Tipo de Muestreo:	Puntual	Sitio de Recolección:	Sedim PIL, Luvardo, Reflejo Santiano Presidente		
Norma / Procedimiento de muestreo:		Clase de muestra:	Lodos de Luvardo		
Condiciones Ambientales durante el muestreo:	Tiempo Seco	Fecha de Muestreo:	16-12-06		
Fecha de Recepción:	16-12-15	Hora / Jornada:	Diurna		
Recolectado por:	Andrés Mauricio Ramírez Rosero	Periodo de Análisis:	17-02-07	a	17-02-16
Código Interno de Muestra:	71	Código Externo de Muestra:		Análisis Ordenado Por:	Luz Edith Barba H

Organismo de Ensayo		Fuente ó Referencia
Nombre Científico	<i>Daphnia pulex</i>	Grupo de Investigación de Ecología de Estuarios y Manglares Universidad del Atlántico
Proveedor	Cuarto cría Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales	Instituto Colombiano de Petróleos de ECOPETROL ICP
Reproducción	2-4 (neonatos/día/hembra)	APHA AWWA-WEF, 22 nd Ed Edition 2012 SC-FI-105 LARA
Alimento	Tructina, Afalta, Levadura	APHA AWWA-WEF, 22 nd Ed Edition 2012, 8/118
Alimentación (Cantidad y Frecuencia)	1.5 mL cada dos días	SC-FI-97, Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales LARA
Longevidad	19 a 69 Días	SC-FI-105, Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales LARA
Iluminación (umens: fotoperiodo)	Sylvania F20T12/D de 935 (Lux), 16 h luz/8 h oscuridad	http://ecom.mysylvania.com/sylvania20/catalog/updates/temperatures
Intensidad luminosa	655 Lux	SC-FI-120 "Registro de la Intensidad luminosa"
Flujo Agua "Difusión"	0.1d17p / 0.1e17p	SC-FI-09, Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales LARA
Clor. C-14 de K2Cr2O7	0.73 (mg/L)	SC-FI-106 LARA EPA Pictol Analysis Program, Version 1.5
Protocolo	Toxicidad Aguda con <i>Daphnia pulex</i>	SC-G1-20 Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales LARA

DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS			
Equipo	Marca	Serie	Parámetro o variable de control
Balanza Analítica	OHAUS - PIONNER	8331270090	Peso (mg) de muestra
pH - metro	SCHOTT	992311111	Control pH en bioensayo
Medidor de Oxígeno disuelto y temperatura	ORION 3 STAR Thermo Scientific	26508	Control Oxígeno disuelto en bioensayo
Luxómetro	EXTECH	091017248	Intensidad de iluminación (lux)
Termómetro	THERMOCOUPLE FLUKE 512 II	1A-44014100	Temperatura exacta, org. máximas y mínimas, fluctuaciones
Agitador mecánico	ACEO	AG5020	Agitación de la muestra

Nota:

- Nota:**
- Este informe de resultados es válido únicamente para las muestras analizadas y relacionadas en él.
 - Estos resultados no deben reproducirse sin aprobación escrita de los Laboratorios de Servicios a la Comunidad.
 - El presente documento posee elementos de seguridad que permiten verificar su autenticidad.

LABORATORIOS DE SERVICIOS A LA COMUNIDAD LABORATORIO DE AGUAS Y RESIDUOS AMBIENTALES
UNIVERSIDAD DEL VALLE CIUDAD UNIVERSITARIA MELENDEZ Edificio 336 Telefax 3312175. Telefono 3212266

INFORME DE RESULTADOS DE ECOTOXICIDAD AGUDA CON *Daphnia pulex*

14 gennaio 2018

Fecha	Edad	Sexo	Edad
2017	62		27

Muestra (WAF)					LOTE CONTROL NEGATIVO *1				RANGOS DE CONTROL		TRAZABILIDAD	
Parámetros	Resultados		Incertidumbre [±]		Resultados		Incertidumbre [±]		Aseguramiento de Calidad	Unidades	Método	Protocolo
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final				
Temperatura	21.0	22.0	--	--	21.0	22.0	--	--	20.0 ± 2 °C	°C	SM 2150-5*	
pH	9.69	7.56	0.08	0.05	7.45	7.80	0.05	0.05	pH ± 0.1 unid	Unidades	SM 4500H ⁺ B*	SC-G1-43
Oxígeno Disuelto	7.25	7.60	--	--	7.50	7.35	--	--	≥ 2.00 mg O ₂ /L [±]	mg O ₂ /L	SM 4500 O ₂ G*	SC-G1-02
Dureza Total	108		1		98.5		0.9		80-100 [±]	mg CaCO ₃ /l	SM 2340 C*	SC-G1-11
Toxicidad Aguda (24h/48h)	≤ 10.0	30.0	0.1		≤ 10.0		-----		≤ 10 % en A/R	% Muerte	IDEAM ⁺	SC-GT-29

Observaciones:

Aprobado por:

Approved by: Richard L. Hayes
Richard L. Hayes

Richard L. Hoyos
PQ - 3369
Coordinador de Laboratorio

YoBo:

Leonardo Rubial G

Analista Bioensayos

LABORATORIOS DE SERVICIOS A LA COMUNIDAD. LABORATORIO DE AGUAS Y RESIDUOS AMBIENTALES.
UNIVERSIDAD DEL VALLE. CIUDAD UNIVERSITARIA MELENDEZ Edificio 338 Tolosa 3312175. Teléfono 3212266

QC FF-95, 4-23-2016 07

Elaborado por: Laboratorio de Aspas y Psicología Ambiental

Anexo 16. Resultados obtenidos prueba de ecotoxicidad para lodo de semana 7

Laboratorio Acreditado por el IDEAM para los Parámetros: Alcalinidad Total, Cloruros, Dureza Cálcica, Dureza Magnésica y Dureza Total, Calcio, Magnesio, pH, Conductividad, Litheia, DBO₅, DQO, Sólidos Suspendedos Totales, Sólidos Sedimentables, Grasas y/o Aceites, Muestreo (Simple, Compuesto o Integrado), Muestreo Integrado en cuerpo de agua, Líquido, Muestreo RESPEL (superficies depuradas, bandas transportadoras, barriles costales y plásticos), Toxicidad Aguda para *Daphnia Pulex*, Toxicidad Aguda en Peces y Toxicidad Crónica en Algas según Resolución N° 1715 de 2014



FACULTAD DE INGENIERÍA - EIDENAR
Área de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Laboratorio de Servicios a la Comunidad

INFORME DE RESULTADOS DE ECOTOXICIDAD AGUDA CON *Daphnia pulex*.

Informe No 8 2016

Fecha	Año	Mes	Día
	2017	02	27

Cliente:	Andrés Mauricio Ramirez Rosero	Dirección (cliente):	Calle 13 # 100-00	Teléfono:	319 455 7281
N° Cotización:	-----	Municipio:	Santiago de Cali	Departamento:	Valle del Cauca
Plan de Muestreo:	-----	Procedencia (lugar de muestreo):	Refrero Sanitario Presidente, San Pedro, Valle del Cauca		
Tipo de Muestreo:	Puntual	Sitio de Recolección:	Refrero Sanitario Presidente, P11 Lixiviado		
Norma / Procedimiento de muestreo:	-----	Clase de muestra:	Lodos de Lixiviado		
Condiciones Ambientales durante el muestreo:	Tiempo Seco	Fecha de Muestreo:	16-12-15		
Fecha de Recepción:	16-12-15	Hora / Jornada:	Diurna		
Recolectado por:	Andrés Mauricio Ramirez Rosero	Periodo de Análisis:	17-02-07 a 17-02-16		
Código Interno de Muestra:	81	Código Externo de Muestra:	-----	Análisis Ordenado Por:	Luz Edith Barba Ho

Organismo de Ensayo		Fuente ó Referencia
Nombre Científico	<i>Daphnia pulex</i> .	Grupo de Investigación de Ecología de Estuarios y Manglares Universidad del Valle
Proveedor	Cuarto cría Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales	Instituto Colombiano de Petróleos de ECOPETROL ICP
Reproducción	2,4 (neonatos/día*hembras)	APHA-AWWA-WEF, 22 nd Edition 2012 - SC-F1-105 LARA
Alimento	Truchina, Alfalfa, Levadura	APHA-AWWA-WEF, 22 nd Edition 2012 - 8711B
Alimentación (Cantidad/ Frecuencia)	1.5 ml/L cada dos días	SC-F1-97 Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales LARA
Longevidad	19 a 88 Días	SC-F1-105 Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales LARA
Iluminación (lúmenes : fotoperiodo)	Sylvania F20T12/D de 935 (Lux) , 16 h luz/3 h oscuridad	http://ecemysylvania.com/sylvania20ulcatalogupdatelitem.do
Intensidad luminosa	655 Lux	SC-F1-120 "Registro de la Intensidad Luminosa"
Lote Agua Dilución*	01d17p / 01e17p	SC-F1-99 Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales LARA
IC 50 24h de K2Cr2O7	0.73 (mg/L)	SC-F1-106 LARA EPA Proba Analysis Program, Version 1.5
Protocolo	Toxicidad Aguda con <i>Daphnia pulex</i> .	SC-GT-20 Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales LARA

DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS			
Equipo	Marca	Serie	Parámetro o variable de control
Balanza Analítica	OHAUS - PIONEER	8331270090	Peso (mg) de muestra
pH - metro	SCHOTT	99231111	Control pH en bioensayo
Medidor de Oxígeno disuelto y temperatura	ORION 3 STAR Thermo Scientific	26508	Control Oxígeno disuelto en bioensayo
Luxómetro	EXTECH	091017248	Intensidad de iluminación (Lux)
Termómetro	TERMOCUPLA FLUKE 512 II	LA-44014100	Temperatura cuarto cría, máximos y mínimos (noche) bioensayos
Agitador mecánico	ACEO	AG5020	Agitación de la muestra

Nota

- Este informe de resultados es válido únicamente para las muestras analizadas y relacionadas en el
- Estos resultados no deben reproducirse sin aprobación escrita de los Laboratorios de Servicios a la Comunidad
- El presente documento posee elementos de seguridad que permiten verificar su autenticidad

LABORATORIOS DE SERVICIOS A LA COMUNIDAD LABORATORIO DE AGUAS Y RESIDUOS AMBIENTALES
UNIVERSIDAD DEL VALLE CIUDAD UNIVERSITARIA, MELENDEZ, Edificio 336, Telefax 3312175, Teléfono 3312266

SC-F1-95
V 23/2016 07

Elaborado por: Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales

Anexo 17. Informe de laboratorio prueba de ecotoxicidad muestra semana 8.

Laboratorio Acreditado por el IDEAM para los Parámetros: Alcalinidad Total, Cloruros, Dureza Calcio, Dureza Magnésica y Dureza Total, Calcio, Magnesio, pH, Conductividad, Electricidad, DBO₅, DQO, Sólidos Suspendedos Totales, Sólidos Sedimentables, Grasas y/o Aceites, Muestras (Simple, Compuesto e Integrado), Muestras de agua en cuerpo (Sólidos y Líquidos), Muestra RESFEL (superficies deprimidas, bandas transportadoras, barriles, costales y pilas), Toxicidad Aguda para Daphnia Pulex, Toxicidad Aguda en Pezces y Toxicidad Crónica en Algas, según Resolución N° 1715 de 2014.



FACULTAD DE INGENIERÍA - CIDENAR
Área de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Laboratorios de Servicios a la Comunidad

INFORME DE RESULTADOS DE ECOTOXICIDAD AGUDA CON *Daphnia pulex*

Informe No. 8/ 2016

Fecha	Año	Mes	Día
	2017	02	27

Muestra (WAF)					LOTE CONTROL NEGATIVO *4				RANGOS DE CONTROL		TRAZABILIDAD	
Parámetros	Resultados		Incertidumbre*2		Resultados		Incertidumbre*2		Aseguramiento de Calidad	Unidades	Método	Protocolo
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final				
Temperatura	21.0	22.0	—	—	21.0	22.0	—	—	20.0 ± 2 °C	°C	SM 2550-B*	—
pH	7.77	8.28	0.05	0.05	7.45	7.80	0.05	0.05	pH = pH ₀ ± 1 und	Unidades	SM 4500-H ⁺ -B*	SC-GT-03
Oxígeno Disuelto	7.27	7.59	—	—	7.50	7.35	—	—	≥ 2.00 mg O ₂ /l *3	mg O ₂ /L	SM 4500-O-G*	SC-GT-02
Dureza Total	117		1		99.5		0.9		80-100 *3	mg CaCO ₃ /L	SM 2340-C*	SC-GT-11
Toxicidad Aguda (24h/48h)	≤ 10.0	23.3	0.1		≤ 10.0		-----		≤ 10 % en AR	% Muerte	IDEAM **	SC-GT-20
FIN DE INFORME												

FIN DE INFORME

* Los métodos mencionados con letras iniciales (SM) corresponden al Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, APHA-AWWA-WEF, 23rd Edition, 2012

* 1 El método mencionado corresponde al protocolo de Toxicidad Aguda con Daphnia de la Resolución No. 0062 del IDEAM, 2007

* 2 El valor de incertidumbre corresponde a un rango (*/-), el cual se aplica adicionándolo o restando al valor del resultado. La incertidumbre está calculada con un factor de cobertura (K=2) y un nivel de confianza del 95%

* 3 Aplica Únicamente para el Control Negativo

* 4 El lote de agua de dilución puede no coincidir con el lote de agua reconstituida, sin embargo, ambos lotes son aprobados, estos se encuentran bajo los rangos óptimos para la especie de ensayo y cumple con los criterios del aseguramiento de la calidad

Observaciones: -----

- Este informe de resultados es válido únicamente para las muestras analizadas y relacionadas en él
- Estos resultados no deben reproducirse sin aprobación escrita de los Laboratorios de Servicios a la Comunidad
- El presente documento posee elementos de seguridad que permiten verificar su autenticidad

Aprobado por:

Richard L. Hoyos

Richard L. Hoyos

PQ - 3369

Coordinador de Laboratorio

VoBo:

Leonardo Rutiano G.

Leonardo Rutiano G.

Analista Bioensayos

LABORATORIOS DE SERVICIOS A LA COMUNIDAD LABORATORIO DE AGUAS Y RESIDUOS AMBIENTALES
UNIVERSIDAD DEL VALLE CIUDAD UNIVERSITARIA MELENDEZ Edificio 336 Teletax 3312175, Teléfono: 3212706

SC-F1-02
V.2.3.2016-07

Elaborado por: Laboratorio de Aguas y Residuos Ambientales

Anexo 18. Resultados prueba de ecotoxicidad muestra semana 8.

Santiago de Cali, 15 de Diciembre de 2016



Señorita
ESTEPHANIA BOTERO
Universidad del Valle
La Ciudad

Referencia: Ensayos microbiológicos a muestras de biosólidos procedente de Relleno Sanitario.

Estimada Estephania,

Acorde con las muestras ingresadas el pasado 6 de Diciembre de 2016, en el informe No 1075 anexo se presentan los resultados de los ensayos descritos en la referencia. Estos ensayos fueron realizados a una muestra de biosólido procedente de un Relleno Sanitario.

Cordialmente,

Noel Muñoz Soto
MSc. Esp. Lic. Bioquímico
Coordinador del laboratorio

Copia Clara Inés González. Coord. Admón. Estación Cinara Puerto Mallarino

Cinara, Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico.
UNIVERSIDAD DEL VALLE - Ciudad Universitaria Meléndez Nit: 800.089.677-0 - Edificio 341 A.A. 25157 Cali, Colombia - Suramérica
Tels: (57)(2) 339 2345 - 339 6096 - 330 1986 - 339 3196 - Fax: (57) (2) 339 3289
Estación de Investigación Telefax: (57) (2) 656 5692
E-mail: cinaraiv@correounivalle.edu.co - Página Web: <http://cinara.univalle.edu.co>

Anexo 19. Informe de laboratorio parámetros microbiológicos lodo semana 3

 FACULTAD DE INGENIERIA LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA	FORMATO	Versión 1.0	Código F-1. 3.03.01
		Página: 1 de 1	
Fecha de emisión: 09.09.2013		Título: INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS	
Elaborado por: Edwin Fernando Benitez Barahona		Revisado por: Noel Muñoz Soto	Aprobado por: Director General

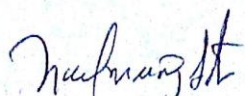
FECHA (dd.mm.aaaa):	15.12.2016	N° 1075
---------------------	------------	---------

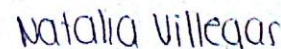
Código interno de la muestra: MC-ADI-1075-16		Fecha de recepción: 06 12 2016
Fecha muestreo: 06 12 2016	Hora de muestreo: -:-	Fecha de realización de ensayos: 06 12 2016
Muestreado por:	Lugar de muestreo: Relleno Sanitario	Dirección:
Empresa:	Teléfono:	Correo electrónico: estephania botero@correounivalle.edu.co
Servicio solicitado por: Estephania Botero Vanderbilt		Ciudad: Santiago de Cali
Descripción de la muestra: Biosólido.		

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALIDAD DE AGUA			
BIOSOLIDO			
PARÁMETRO	MÉTODO	RESULTADOS	UNIDADES LOG
E. Coli (UFC/gramo)	Filtración por membrana	0	0,00
Coliformes Totales (UFC/gramo)	Filtración por membrana	0	0,00
Coliformes Fecales (UFC/gramo)	Filtración por membrana	0	0,00
Huevos de Helminthos (N°/g)	Bilenger	0	-

Digitó: Andrés Vargas

1. Los resultados presentes en este informe se refieren únicamente a los ensayos realizados a la muestra.
2. Se prohíbe la reproducción parcial o total de este informe sin el consentimiento del laboratorio.


COORDINADOR DEL LABORATORIO


ANALISTA DE MICROBIOLOGIA

LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA
 Cra 15 con Calle 75 Esquina, Puerto Mallarino
 Teléfono: 662 9505 - Telefax: 662 9488
 Correos electrónicos: clara.gonzalez@correounivalle.edu.co, noel.munoz@correounivalle.edu.co

Anexo 20. Resultados de laboratorio parámetros microbiológicos lodo semana 3

Anexo 21. Definición de las categorías y clases de Biosólidos

Ley Colombiana Decreto 1287 (2014)	Ley Mexicana NOM 004(2002)	Norma U.S. 40 CFR parte 503 Límites máximos permisibles
		Contenido de Metales pesados-contaminantes:
		<u>Biosólidos de calidad Excepcional:</u> Son aquellos biosólidos que no tienen regulación para su uso y distribución. Tienen bajos niveles de contaminantes y se encuentran clasificados en la clase A de los parámetros microbiológicos. Poseen bajo nivel de atracción de vectores.
	Contenido de Metales pesados:	<u>Biosólidos con concentraciones de contaminantes:</u>
	<u>Excelente calidad:</u> Son aquellos biosólidos que cumplen con los límites establecidos, dando lugar a que se aprovechen para usos urbanos con contacto público directo, si cuentan con una clasificación microbiológica A.	Son aquellos biosólidos que se encuentran en la misma condición de concentraciones de contaminantes que los de calidad excepcional, sin embargo en parámetros microbiológicos su clasificación estaría en la B. Éstos por lo tanto poseen restricciones en su distribución, y están sujetos a requerimientos generales y prácticas de manejo.
Categoría A: Estos biosólidos cuentan con una excelente calidad microbiológica, y de metales pesados.	<u>Excelente o Buena calidad:</u> Son aquellos biosólidos que en su aprovechamiento no deben tener contacto directo con el público, además de tener un contenido microbiológico dentro de las clases B y C.	<u>Tasa de carga acumulativa de contaminantes:</u> Estos biosólidos normalmente exceden alguna concentración de metales pesados establecidos para las calidades anteriores. Lo que conlleva a un control más riguroso al ser aplicados en la tierra, realizando seguimiento de los niveles de contaminantes, y no pueden exceder los límites establecidos para su calidad.
Categoría B: Estos biosólidos cuentan con una buena calidad microbiológica, y de metales pesados.	Contenido microbiológico:	<u>Tasa de carga anual de contaminantes:</u> Son aquellos biosólidos distribuidos en costales y contenedores para su aplicación en la tierra, los cuales exceden los límites establecidos para la calidad excepcional, pero cumplen con los límites de biosólidos con concentraciones de contaminantes. Deberán estar sujetos a tasas específicas de aplicación en tierra y demás condiciones.
	<u>Clase A:</u> Coliformes fecales <1000 NMP/g. Salmonella spp. < 3 NMP/g. < 1 Huevos de helmintos/g.	Contenido microbiológico:
	<u>Clase B:</u> Coliformes fecales <1000 NMP/g. Salmonella spp. < 3 NMP/g. < 10 Huevos de helmintos/g.	<u>Clase A:</u> Es aquel biosólido que se encuentra bajo los límites establecidos (Salmonella <3 NMP/4 g peso seco, coliformes fecales 1000 NMP/g peso seco, enterovirus <1 UFP/4 g peso seco y huevos viables de helminto <1 huevo viable/4 g peso seco) y que se encuentra autorizado para todos los usos definidos.
	<u>Clase C:</u> Coliformes fecales < 2x10 ⁶ NMP/g. Salmonella spp. < 3 NMP/g. < 35 Huevos de helmintos/g.	<u>Clase B:</u> Es el biosólido que puede ser utilizado con ciertas restricciones de tiempo (comprendido entre su aplicación y la siembra del cultivo), lo que permite alcanzar concentraciones de microorganismos que no significan un riesgo sanitario para la salud pública (.).

Fuente: Colombia (Decreto 1287 de 2014), México (NOM-004-SEMARNT-2002) y U.S. E.P.A (Norma 503-40CFR/2003)