



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE
MANABÍ MANUEL FÉLIX LÓPEZ**

DIRECCIÓN DE CARRERA: MEDIO AMBIENTE

**INFORME DE TRABAJO DE TITULACIÓN
PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
EN MEDIO AMBIENTE**

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

**APROVECHAMIENTO DE LODOS DE LA PLANTA DE AGUAS
RESIDUALES DEL CANTÓN EL CARMEN COMO BIOSÓLIDOS
PARA EL SECTOR FORESTAL**

AUTORAS:

**ANDRADE FARÍAS ILIANA JHUSLEY
SOLÓRZANO ACEBO DAYANA CORAIMA**

TUTOR:

ING. JULIO LOUREIRO SALAVARRÍA M.Sc.

CALCETA, FEBRERO 2021


DERECHOS DE AUTORÍA

ANDRADE FARÍAS ILIANA JHUSLEY con cédula de ciudadanía 172477501-8, y **SOLÓRZANO ACEBO DAYANA CORAIMA** con cédula de ciudadanía 131413123-4, declaran bajo juramento que el Trabajo de Titulación titulado: **APROVECHAMIENTO DE LODOS DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DEL CANTÓN EL CARMEN COMO BIOSÓLIDOS PARA EL SECTOR FORESTAL** es de nuestra auditoria, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, concedemos a favor de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, conservando a nuestro favor todos los derechos patrimoniales del autor sobre la obra, en conformidad con el Artículo 114 del Código Orgánica de la Economía Social de los conocimientos, Creatividad e Innovación.



ILIANA JHUSLEY
ANDRADE FARÍAS



DAYANA CORAIMA
SOLÓRZANO ACEBO

CERTIFICACIÓN DE TUTOR

ING. JULIO LOUREIRO SALABARRIA, M.Sc., certifica haber tutelado el Proyecto de Titulación **APROVECHAMIENTO DE LODOS DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DEL CANTÓN EL CARMEN COMO BIOSÓLIDOS PARA EL SECTOR FORESTAL**, que ha sido desarrollado por **ILIANA JHUSLEY ANDRADE FARÍAS** y **DAYANA CORAIMA SOLÓRZANO ACEBO**, previa la obtención del título de Ingeniera en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.



ING. JULIO LOUREIRO SALABARRIA, M.Sc.

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

Los suscritos integrantes del tribunal correspondiente, declaramos que hemos **APROBADO** el Proyecto de titulación **APROVECHAMIENTO DE LODOS DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DEL CANTÓN EL CARMEN COMO BIOSÓLIDOS PARA EL SECTOR FORESTAL**, que ha sido propuesto, desarrollado y sustentado por **ILIANA JHUSLEY ANDRADE FARÍAS** y **DAYANA CORAIMA SOLÓRZANO ACEBO**, previa la obtención del título de Ingeniera en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.



QF. PATRICIO NOLES AGUILAR, M.SC.

MIEMBRO



ING. SERGIO ALCIVAR PINARGOTE, M.SC.

MIEMBRO



ING. FABRICIO ALCÍVAR INTRIAGO, M.SC.

PRESIDENTE

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo le agradezco a Dios por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi vida, brindándome paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas propuestas.

A mis padres por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron.

Agradezco a mi tutor de tesis Ing. Julio Loureiro Salabarría quien con su experiencia, conocimiento y motivación me oriento en la investigación.

Agradezco a los todos docentes que, con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesional en la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López”.

ILIANA JHUSLEY ANDRADE FARÍAS

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López que me dio la oportunidad de crecer como ser humano a través de una educación superior de calidad y en la cual he forjado mis conocimientos profesionales día a día;

A Dios por bendecirme cada día y guiar cada paso que doy.

A mis padres quienes desde el primer momento confiaron en mí, gracias a su ayuda en lo largo de este trayecto pude forjar una de mis metas propuestas.

A mi tutor de tesis, Ing. Julio Loureiro Salabarría, por su apoyo y dedicación desde el primer día de elaboración de este trabajo.

A mis hermanos, abuelos, tíos, primos, sobrinos, amigos, que de alguna u otra manera siempre han estado durante este trayecto de mi vida.

DAYANA CORAIMA SOLÓRZANO ACEBO

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres y a mi abuela por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

A mis hermanos por estar siempre presentes, acompañándome, demostrando su apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

ILIANA JHUSLEY ANDRADE FARÍAS

DEDICATORIA

A Dios mi acompañante fiel, por darme la sabiduría necesaria durante esta etapa de mi vida.

A mis padres, Iván y Norma, por el apoyo incondicional que siempre me brindan, por sus consejos, motivación, por ser parte de este gran sueño alcanzado, todo se lo debo a ustedes.

A mis hermanos, que de alguna u otra forma siempre han estado apoyándome.

A mis familiares y amigos, que siempre me dieron una voz de aliento para no rendirme y seguir hasta cumplir esta meta.

DAYANA CORAIMA SOLÓRZANO ACEBO

CONTENIDO GENERAL

DERECHOS DE AUTORÍA	ii
CERTIFICACIÓN DE TUTOR	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
DEDICATORIA	vii
DEDICATORIA	viii
CONTENIDO GENERAL.....	ix
CONTENIDO DE CUADROS, FIGURAS Y GRÁFICOS	xi
CUADROS	xi
CONTENIDO DE ILUSTRACIONES.....	xii
CONTENIDO DE GRÁFICOS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Hipótesis, premisa y/o idea a defender	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Contaminación	5
2.2. Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR)	5
2.3. Lodo residual.....	6
2.4. Clasificación de lodos residuales por operaciones dentro una ptar	7
2.4.1. Lodo residual primario	7
2.4.2. Lodo residual secundario.....	7
2.4.3. Lodo residual terciario	7
2.5. Tipo de lodo residual PTAR	7
2.5.1. Lodos provenientes de tratamiento físico - químico.....	8
2.5.2. Lodos provenientes de tratamientos biológicos.....	9
2.6. Características físicas, químicas y biológicas del lodo residual	9
2.6.1. Características físicas.....	10
2.6.2. Características químicas	11
2.6.3. Carecterísticas microbiológicas	11
2.7. Tratamiento del lodo residual.....	12
2.7.1. Digestión anaerobia.....	12
2.7.2. Digestión aerobia.....	12
2.7.3. Tratamiento químico	12
2.8. Muestreo de lodo residual	13
2.9. Normas internacionales.....	14
2.10. Biosólidos.....	17
2.11. Clasificación de biosólidos.....	17

2.12.	Muestreo	18
2.12.1.	Muestreo para biosólidos	18
2.12.2.	Muestreo para suelos degradados	18
2.13.	Metodología para la dosificación de suelo degradado	19
2.14.	Semillas de ceibo	19
2.14.1.	Germinación del ceibo	20
2.14.2.	Curvas de crecimiento	20
2.15.	Valoración económica	20
CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO		22
3.1.	Ubicación	22
3.2.	Duración del trabajo	22
3.3.	Tipo de investigación	23
3.3.1.	Investigación cuantitativa	23
3.4.	Métodos	23
3.4.1.	Método bibliográfico	23
3.4.2.	Método estadístico	23
3.5.	Técnicas	23
3.5.1.	Observación	23
3.6.	Variables en estudio	24
3.7.	Diseño experimental	24
3.8.	Procedimiento	24
3.8.1.	Fase I. Categorización del lodo proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del cantón el carmen	24
3.8.2.	Fase II. Determinación de las mezclas más efectivas de biosólidos para el sector forestal	26
3.8.3.	Fase III. Factibilidad económica de aplicación de lodo residual para el sector forestal	29
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		33
4.1.	Categorización del lodo proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del cantón el carmen	33
4.2.	Determinación de las mezclas más efectivas de biosólidos para el sector forestal	36
4.2.1.	Caracterización del suelo degradado	36
4.2.2.	Aplicación del diseño experimental	38
4.3.	Factibilidad económica de aplicación de lodo residual para el sector forestal	41
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		45
5.1.	Conclusiones	45
5.2.	Recomendaciones	46
BIBLIOGRAFÍA		47
ANEXOS		57

CONTENIDO DE CUADROS, FIGURAS Y GRÁFICOS

CUADROS

Cuadro 2. 1. Valores característicos de los parámetros más frecuentemente estudiados en los lodos	9
Cuadro 2. 2. Concentraciones permisibles para los metales pesados en los lodos.....	10
Cuadro 2. 3. Características físicas de los lodos	10
Cuadro 2. 4. Características químicas de los lodos	11
Cuadro 2. 5. Características microbiológicas de los lodos	113
Cuadro 2. 6. Concentraciones máximas permisibles de metales pesados en los lodos según la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002	15
Cuadro 2. 7. Concentraciones máximas permisibles de patógenos y parásitos en los lodos según la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.....	15
Cuadro 2. 8. Aprovechamiento de biosólidos.....	156
Cuadro 2. 9. Concentraciones límites de metales pesados en lodos según diferentes países (mg/kg en base seca)	16
Cuadro 2. 10. Concentraciones límites de metales pesados (mg/kg en base seca) en los lodos en diferentes organizaciones normativas (Directiva Europea y USEPA)	16
Cuadro 2. 11. Clasificación de biosólidos de acuerdo a NOM-004-SEMARNAT-2002	18
Cuadro 2. 12. Clasificación de Biosólidos de acuerdo a USEPA y NOM-004-SEMARNAT-2002	19
Cuadro 3. 1. Descripción del diseño experimental.....	24
Cuadro 3. 2. Método de análisis para determinar parámetros Físicoquímicos y Microbiológicos...25	
Cuadro 3. 3. Concentraciones máximas permisibles de metales pesados en los lodos según la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002	26
Cuadro 3. 4. Clasificación de lodos de acuerdo con concentraciones permisibles de Coliformes Fecales (NMP/g base seca) y Huevos de helmintos (g en base seca) según la NOM-004-SEMARNAT-2002.....	26
Cuadro 3. 5. Aprovechamiento de lodos según clasificación de la NOM-004-SEMARNAT-2002..26	
Cuadro 3. 6. Análisis físicoquímicos del suelo degradado	27
Cuadro 3.7. Valores referenciales de criterios de calidad del suelo.....	29
Cuadro 3.8. Matriz experimentos.....	29
Cuadro 3.9. Costo total de la mezcla para cada tratamiento.....	31
Cuadro 3.10. Matriz de costos de mano de obra directa.....	32
Cuadro 3.11. Matriz de costos indirectos de producción.....	32
Cuadro 3.12. Matriz de costos de materia prima para la fabricación de biosólido.....	32
Cuadro 3.13. Costos totales por tratamiento durante la investigación	33
Cuadro 4. 1. Caracterización física, química y microbiológica del lodo proveniente de la PTAR del cantón El Carmen.....	33
Cuadro 4. 2. Valores de Nitrógeno y Fósforo en lodos residuales	34
Cuadro 4. 3. Clasificación del lodo proveniente de la PTAR del cantón El Carmen según la NOM-004-SEMARNAT-2002.....	36
Cuadro 4. 4. Clasificación del lodo proveniente de la PTAR del cantón El Carmen según el Decreto 1287 (2014) de Colombia	Error! Bookmark not defined.
Cuadro 4. 5. Análisis de parámetros físico - químicos de suelo degradado.....	37

Cuadro 4. 6. Comparación con Criterios de Calidad del recurso suelo del Acuerdo Ministerial 097 ^a	38
Cuadro 4. 7. Medidas de crecimiento de las plantas semanales.....	39
Cuadro 4. 8. Análisis de Varianza de un factor	39
Cuadro 4. 9. Comparaciones múltiples según la prueba de Tukey	39
Cuadro 4. 10. Valor total por cada tratamiento.....	Error! Bookmark not defined.
Cuadro 4. 11. Costos de materia prima para el T0	42
Cuadro 4. 12. Costos de materia prima para el T1	42
Cuadro 4. 13. Costos de materia prima para el T2	43
Cuadro 4.14. Costo de mano de obra.....	43
Cuadro 4.15. Costos indirectos de producción.....	43
Cuadro 4.16. Costos totales por tratamiento..	43

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 3. 1. Mapa de ubicación del sitio de desarrollo de la investigación	22
---	----

CONTENIDO DE GRÁFICOS

Gráfico 4. 1. Crecimiento de plantas según tratamientos.	39
--	----

RESUMEN

El presente estudio tuvo como propósito, evaluar los lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón El Carmen como biosólidos para el sector forestal. Se categorizó el lodo residual donde se utilizó la metodología recomendada por la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SERMANAT-2002, realizando análisis químicos (Hg, Pb y Cd) y biológicos (Coliformes fecales y Huevos de helmintos), además se determinó las mezclas más efectivas de biosólidos por medio del diseño experimental completamente al azar (DCA), con 3 tratamientos y 4 repeticiones, dando un total de 12 unidades experimentales, el T₀ consistió en colocar dos semillas de forma natural en 100% de suelo degradado, mientras que el T₁ y T₂ se realizaron de forma análoga, se utilizó suelo degradado y lodo residual variando 30 y 60%, se monitoreó por 21 días para así determinar el crecimiento de las plantas. Por último, se estableció la factibilidad económica para la aplicación de los biosólidos mediante un análisis costo unitario en cuanto a los costos asociados. Como resultado se comprobó que la hipótesis propuesta se cumple, es decir que los lodos provenientes de la PTAR sirven como biosólidos para aplicación del sector forestal ya que tuvo efectos positivos sobre el crecimiento de las plantas, donde el T₂ obtuvo el mejor resultado llegando a los 2,38 cm, mientras que los T₀ y T₁ llegaron hasta 1,60 cm respectivamente. Así mismo se corroboró a través del análisis de varianza (ANOVA) que existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos.

Palabras clave: Biosólidos, lodo residual, tratamiento.

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the sludge from the wastewater treatment plant of the El Carmen canton as biosolids for the forestry sector. The residual sludge was categorized where the methodology recommended by the Official Mexican Standard NOM-004-SERMANAT-2002 was used, carrying out chemical (Hg, Pb and Cd) and biological analyzes (fecal coliforms and helminth eggs), in addition the mixtures were determined most effective biosolids by means of a completely randomized experimental design (DCA), with 3 treatments and 4 repetitions, giving a total of 12 experimental units, the T0 consisted of placing two seeds naturally in 100% degraded soil, while T1 and T2 were carried out in a similar way, degraded soil and residual mud were used varying 30 and 60%, it was monitored for 21 days to determine the growth of the plants. Finally, the economic feasibility for the application of biosolids was established through a unit cost analysis in terms of associated costs. As a result, it was verified that the proposed hypothesis is fulfilled, that is, the sludge from the WWTP serves as biosolids for application in the forestry sector since they had positive effects on plant growth, where T2 obtained the best result, reaching the 2.38 cm, while the T0 and T1 reached up to 1.60 cm respectively. Likewise, it was corroborated through the analysis of variance (ANOVA) that there are significant differences.

Keywords: Biosolids, residual sludge, treatment.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los lodos residuales son producto de la concentración de sólidos contenidos en el efluente (lodos primarios), o de la formación de nuevos sólidos suspendidos (lodos activados) resultantes de la remoción de sólidos disueltos de las aguas residuales. La generación de lodos residuales sin tratamiento se ha convertido en un problema ambiental a nivel mundial, debido a los volúmenes de estos residuos que se generan en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Sin embargo, a pesar de que esta práctica no siempre es ambiental, ni económicamente viable, muy a menudo se lo realiza (Terán, 2016).

Galvis y Rivera (2013) indican que es predominante la falta de concientización ambiental, ya que no se le da la suficiente importancia a los efectos negativos que pueden generar el uso extremo de los lodos al darle una disposición final sin conocer las características de tipo biológico, físico y químico que permitan conocer su calidad antes de emplearlos o darles su respectivo valor agregado.

Al no ser caracterizados los lodos, se le da una clasificación de manera incorrecta, debido a que no hay una normativa ambiental, lo que conlleva a que los lodos secundarios sean desaprovechados y no se le dé un apropiado manejo y disposición (Vasquez y Vargas, 2018).

Peñaherrera (2015) menciona que el destino final de lodos provenientes de aguas residuales no es correcto, ya que se disponen especialmente en terrenos abiertos y rellenos sanitarios perturbando aguas superficiales, flora y fauna del lugar, acuíferos, suelo y la salud del hombre, sin ningún tipo de tratamiento; para Pérez (2016) otra técnica de eliminación es la incineración en el cual el proceso genera furano y dioxinas induciendo contaminación ambiental y altos costos de operación. Gualoto (2016) afirma que “El lodo obtenido, se caracteriza por la

presencia de patógenos, materia orgánica y humedad. Por lo tanto, es necesario evaluar alternativas sostenibles de disposición y/o aprovechamiento” (p.1).

Según Ruiz y Quevedo (2017) en Ecuador, la inexistencia de una normativa ambiental específica para la disposición final de lodos procedentes de la PTAR de origen municipal da lugar a que se den diferentes usos sin ningún tipo de criterio de clasificación, por lo que es conveniente estudiarlos, para así determinar su utilidad y los límites de uso de aplicación de este, debido a la toxicidad del lodo que constituye riesgo a la salud de las personas.

En el cantón El Carmen, se genera aproximadamente 1.000 toneladas anuales de lodos procedentes de la PTAR, los cuales no se caracterizan ni clasifican por ende se hace una disposición final incorrecta, estos son deshidratados por medio de la radiación solar en condiciones inapropiadas sin ningún otro tipo de tratamiento, donde permanecen los agentes contaminantes, que al descomponerse se transforman en focos de infección biológicos con patógenos como coliformes y salmonelas, generador de malos olores, capaces de afectar el bienestar de la población ya que pueden ingresar al cuerpo humano por ingestión o absorción.

Mediante lo expuesto se plantea como problema de esta investigación la siguiente interrogante:

¿Cómo se podrán aprovechar los lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón El Carmen como biosólidos en el sector forestal con los criterios de las normativas ambientales internacionales?

1.2. JUSTIFICACIÓN

Según Torres (2017) la PTAR se encarga de retener materia orgánica, sólidos y varios contaminantes, que se adquieren a partir de las aguas residuales, en cuando a los fundamentos del PTAR existen varias alternativas de aprovechamiento para la disposición final como: la restauración de suelos

degradados, fertilizantes agrícolas, compostaje, fertilización de cultivos forestales, prevención de la erosión del suelo, uso de jardinería y paisajismo, la generación de energía, incluso como material de construcción.

Castrejón et al. (2014) señalan que, los biosólidos son subproductos provenientes de los lodos de aguas residuales con un previo tratamiento, contienen un alto valor nutricional, siendo ricos en fósforo, materia orgánica y nitrógeno, lo que hace valioso su aplicación en suelos forestales y agrícolas; también de otros usos benéficos. Donoso et al. (2016) agregan que los biosólidos, son una alternativa viable, debido a los costosos fertilizantes químicos, estos permiten mejorar la disponibilidad de nutrientes, que en algunas ocasiones están ausentes o en cantidades su aplicación puede mejorar características del suelo, como capacidad de absorción del agua y textura, lo que originaría condiciones más propicias para el crecimiento y desarrollo de raíces de las plantas.

Amador et al. (2015) afirman que la clave para el adecuado manejo de los lodos es la caracterización y la clasificación de estos. Para así cuantificar las concentraciones de nutrientes y evaluar la composición químicas, biológicas y metálicas, para ser aprovechadas y darle una disposición final correcta (Andrade et al., 2000).

De acuerdo con normativas internacionales como Norma Oficial Mexicana – 004 – SEMARNAT – 2002, y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, Environmental Protection Agency) en su código 40 CFR parte 503, las cuales establecen las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del sistema de alcantarillado urbano o municipal, para un previo uso, mitigando los impactos negativos, considerando la capacidad de cuidar, proteger y mantener los recursos naturales (Campos et al., 2011).

La presente investigación tiene la finalidad conocer las características y composición del lodo de la PTAR municipal del cantón El Carmen, para determinar su uso o aprovechamiento como biosólidos en el sector forestal,

siendo una alternativa económicamente viable debidos a sus bajos costos de tratamiento, disminuyendo enfermedades comunes producidas por la ingestión o inhalación (Oropeza, 2006).

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar los lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón El Carmen como biosólidos para el sector forestal.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Categorizar el lodo proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón El Carmen.
- Determinar las mezclas más efectivas de lodos para cultivos forestales.
- Establecer la factibilidad económica de aplicación de lodo residual para cultivos forestales.

1.4. HIPÓTESIS, PREMISA Y/O IDEA A DEFENDER

Los lodos provenientes de la PTAR de cantón El Carmen servirán como biosólidos para su aplicación en cultivos forestales.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. CONTAMINACIÓN

Según Vera et al. (2010) la contaminación es provocada por la integración de cualquier agente externo ya sea sustancias, energía u organismos capaces de crear un desequilibrio en las propiedades y características de un ecosistema, afectando de forma negativa su facultad de degradarlos y asimilarlos. Estos eventos pueden producirse por consecuencias naturales y en su mayoría por actividades antropogénicas.

En el proceso de tratamiento de aguas residuales se produce lodos debido a la separación de la fase sólida – líquida, comúnmente estos tratamientos no aplican una disposición final adecuada, originando contaminación en el suelo, aire y agua (Torres et al., 2005).

2.2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)

Sistemas de tratamiento encaminadas a reducir los impactos ambientales ocasionados por el inadecuado manejo y disposición de efluentes industriales, considerando su composición y efectos sobre los ecosistemas naturales (Marín et al., 2014).

De acuerdo con Valencia (2013) La eliminación o recuperación del contaminante orgánico en los efluentes mediante el uso de tratamientos, deben garantizar que su eficiencia se encuentra al nivel requerido por los organismos reguladores de dicho vertido. De acuerdo al grado de contaminación y concentración que provoquen las sustancias dañinas dependerá el tipo de tratamiento a utilizar.

Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales incluyen los siguientes tipos de tratamientos:

- **Tratamiento Físico:** este tipo de tratamiento utiliza métodos en los que destacan el uso de fuerzas físicas, con la finalidad de remover el material suspendido de diferentes tamaños y formas en el agua contaminada. Incluyen operaciones como desbastes, sedimentación, filtración, flotación, coagulación o floculación.
- **Tratamiento Químico:** en este tipo de tratamientos se utilizan sustancias químicas capaces de reaccionar entre ellas lo que permite la remoción del material disuelto en el agua. El tamaño y concentración de los sólidos es muy variado, desde partículas abundantes como sales inorgánicas, alta concentración de materia orgánica, hasta presencia de compuestos como metales pesados y pesticidas, que se deben tomar en consideración para su depuración debido a su alta peligrosidad, entre estos procesos se incluyen la adsorción, desinfección, precipitación e intercambio iónico
- **Tratamiento Biológico:** en los tratamientos biológicos predominan el uso de microorganismos (bacterias), capaces de eliminar compuestos orgánicos presentes en el agua, que sirven como alimento para que estas realicen sus actividades metabólicas, Incluyen proceso como los sistemas aerobios, anaerobios y sistemas anóxicos (Rodríguez, 2006).

2.3. LODO RESIDUAL

Según Cupe y Juscamaita (2018), la finalidad de la depuración del agua residual ya sea de origen municipal o industrial es remover los contaminantes con la finalidad de convertirlas en un recurso útil o para no afectar el medio ambiente. Sin embargo, la depuración del agua residual genera subproductos potencialmente peligrosos si no son tratados adecuadamente, se los denomina como lodos residuales. El lodo residual surge de la concentración de los sólidos del efluente, también se forman a partir de nuevos sólidos denominados lodos activados (Morales, 2009).

(Madigan et al., 2004) describe que los lodos contienen sustancias orgánicas, compuestos sólidos y semisólidos y estos se forman por los procesos de descontaminación de las aguas residuales (Cuevas et al., 2006).

2.4. CLASIFICACIÓN DE LODOS RESIDUALES POR OPERACIONES DENTRO UNA PTAR

2.4.1. LODO RESIDUAL PRIMARIO

Morales (2009) expresa que el lodo residual primario es el subproducto que se obtiene dentro del tratamiento primario de aguas residuales sean estas domesticas o industriales, siendo necesario someterlos a un tratamiento previo a su disposición final, debido a la cantidad de humedad que contienen.

2.4.2. LODO RESIDUAL SECUNDARIO

Vigueras et al. (2013) indican que los lodos residuales secundarios son una mezcla de agua residual y sólidos suspendidos, que son producidos en reactores aerobios de las PTAR, el lodo secundario es rico en lodo activo.

2.4.3. LODO RESIDUAL TERCIARIO

De acuerdo a Gómez y Merchan, (2016) el lodo terciario se produce a través de procesos de tratamiento posteriores, con adición de agentes floculantes.

2.5. TIPO DE LODO RESIDUAL PTAR

Las plantas de tratamiento de aguas residuales generan lodos con características y propiedades muy variadas vinculadas al proceso de descontaminación empleado y a la procedencia del agua, son generados a partir de la depuración de aguas residuales industriales y domesticas (Lavado y Taboada, 2002).

2.5.1. LODOS PROVENIENTES DE TRATAMIENTO FÍSICO - QUÍMICO

La aplicación de tratamientos físico químicos a lodos activados era una práctica muy popular a principios del siglo veinte, pero el uso coagulante en grandes cantidades terminaba generando grandes cantidades de lodos, por lo que se optó a métodos más eficientes como los tratamientos biológicos.

No obstante, los tratamientos fisicoquímicos aún se practican, utilizando dosis pequeñas de coagulantes, generando costos de operación bajos y disminuyendo la generación de lodos activados. El color del lodo varía de acuerdo a la dosis que se le aplica, por ejemplo: una mayor dosis de hidróxido de sodio producirá lodos de color blanco, mientras que con dosis menores los lodos serán de color café (Carrasco, 2007).

Al aplicar sulfato de aluminio en el agua residual, existe una reacción que produce hidróxido de aluminio, tiene la capacidad de generar flóculos rápidamente estos suelen ser de color oscuro. El cloruro férrico en pequeñas dosis menores a 40 mg/l, genera lodos de color café, mientras que en cantidades mayores a 100mg/l toman un color rojizo, con una excelente sedimentación.

La aplicación de Policloruro de aluminio (PAC) en sus reacciones actúa por fases, principalmente los flóculos se forman en estructuras tipo cadenas, provocan que el agua tenga menos turbidez. Como coagulante inorgánico se puede mencionar el sulfato férrico que actúa por coagulación y floculación para retirar las partículas suspendidas coloidales. Se compone por medio de

Se usa como coagulante inorgánico para retirar del agua por coagulación y floculación, las partículas suspendidas coloidales. Se prepara por medio de sulfato ferroso como elemento oxidante o por óxido férrico disolvente en ácido sulfúrico (Sinha et al., 2004).

2.5.2. LODOS PROVENIENTES DE TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

Los lodos provenientes de las plantas de tratamiento se dividen en: lodos activados, que resultan de la generación de nuevos sólidos y lodos primarios que se originan de la acumulación de sólidos en el efluente (Morales y Mariel, 2005).

El tratamiento de aguas residuales se lo puede realizar sin digestión, basados en métodos de separación física, integrando procesos físicos y biológicos destinados a eliminar patógenos y compuestos carbonados, y añadiendo a estos tratamientos químicos.

Entonces dependiendo del tipo de tratamiento al que se someten los lodos, será su calidad el tratamiento de los lodos activados inicia en el tanque de aireación, es aquí donde se desarrolla, luego es enviado al tanque de sedimentación, y luego al tanque de aireación, este proceso se repite hasta que el lodo sea eliminado (Cisterna y Alvarado, 2003). Se caracteriza por ser de color marrón, con olor a tierra húmeda antes de descomponerse, estos lodos generalmente están formados por microorganismos y materia sólida (Metcalf y Eddy, 2003).

2.6. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DEL LODO RESIDUAL

Debido a las propiedades biológicas y gran cantidad de nutrientes como potasio, nitrógeno o fosforo los lodos una vez estabilizados pueden ser aprovechados, si cumplen con los límites permisibles de contaminantes, establecidos por la normativa vigente, entre sus utilidades pueden ser como abonos y fertilizante (Llivichuzca, 2016).

Cuadro 2. 1. Parámetros y valores característicos estudiados con frecuencia en los lodos

Parámetros	Máximo	Mínimo
DQO total (mg/L)	90000	6000
DBO total (mg/L)	30000	2000
Nitrógeno total (mg/L)	1500	200
Fósforo total (mg/L)	300	40
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	100000	7000

Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)	60000	4000
pH (mg/L)	8,5	7,0
Coliformes fecales (NMP/1100 mL)	10 ⁸	10 ⁶

Fuente: Llivichuzca, 2016

Es importante considerar el estudio de los metales pesados presentes en los lodos activados debido a su alta toxicidad, aunque normalmente sus concentraciones no sobrepasan los rangos permitidos (Chicón, 2003).

Cuadro 2. 2. Concentraciones permisibles para los metales pesados en los lodos

Metal	Concentración (mg/kg de lodo seco)
Cadmio	20-40
Cobre	1000-1750
Níquel	300-400
Plomo	750-1200
Zinc	2500-4000
Mercurio	16-25
Cromo	1000-1500
Arsénico	20-40
Selenio	50-100
Molibdeno	10-25

Fuente: Chicón, 2003.

El Cadmio y los huevos de helmintos son aquellos que bajan la calidad del lodo residual, encasillándolo en los siguientes usos:

- Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación
- Usos forestales
- Mejoramiento de suelos
- Usos agrícolas

2.6.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Es importante determinar las características físicas de los lodos para un adecuado dimensionamiento de los sistemas de espesamiento asimismo como de los equipos electromecánicos en los que se van a tratar (González, 2015).

Cuadro 2. 3. Características físicas de los lodos.

Características físicas
Olor
Color
Apariencia

Contenido de humedad
 Contenido de sólidos totales, volátiles, suspendidos y sedimentables
 Velocidad de sedimentación de los lodos
 Densidad
 Tamaño de partículas
 Comprensibilidad
 Temperatura

Fuente: Elaboración propia.

2.6.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

La calidad de estos depende de los factores que le influyen como el tipo de agua residual y su procedencia (Llivichuzca, 2016).

Cuadro 2. 4. Características químicas de los lodos.

Características químicas
Parámetros inorgánicos (arena, arcilla, materia mineral)
Parámetros orgánicos (carbonos, aceites, grasas, etc.)
Metales pesados
Nutrientes
Contenido de materia orgánica (DBO, DQO, contenido de tóxicos orgánicos) ⁸
Carga superficial de la partícula y su hidratación
Conductividad eléctrica (concentración de sales)
pH

Fuente: Llivichuzca (2016).

2.6.3. CARECTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS

El principal componente de los lodos residuales son los microorganismos, entre las más comunes y en grandes concentraciones: virus, bacterias y parásitos. Sus características varían de acuerdo al tamaño y estado de salud de la población. Siendo uno de los factores más peligrosos por la presencia de patógenos, de ahí surge la necesidad de tratar los lodos residuales. Por eso es de gran importancia analizar sus propiedades biológicas (identificación y cuantificación de microorganismos) (Llivichuzca, 2016).

Cuadro 2. 5. Características microbiológicas de los lodos

Características microbiológicas
<i>Salmonella sp</i>
Coliformes Fecales
Huevos de Helmintos
hepatitis A
Calcivirus

Fuente: Llivichuzca (2016).

2.7. TRATAMIENTO DEL LODO RESIDUAL

Oropeza (2006) menciona que en la actualidad existen varias tecnologías para el tratamiento de lodos residuales provenientes en la PTAR municipal, comúnmente utilizada en Estados Unidos y parte de Europa, se detallan a continuación:

2.7.1. DIGESTIÓN ANAEROBIA

Este método consiste en dos fases, en la primera fase se forman ácidos volátiles y en la segunda fase las bacterias anaerobias, estas fases se pueden desarrollar con la ausencia del oxígeno molecular (O_2). En este proceso se mezcla los lodos y se convierten en metano y dióxido de carbono, se realiza en un reactor completamente cerrado con periodos de tiempo considerables, para obtener un subproducto bajo en materia orgánica y microorganismos patógenos. Para realizar este tratamiento se emplean reactores de baja carga y de alta carga, debido a diseño el costo es elevado (Rojas, 2002).

2.7.2. DIGESTIÓN AEROBIA

Proceso de aireación prolongada la cual consiste el provocar el desarrollo de microorganismos aerobios hasta sobrepasar el tiempo de síntesis de las células, y realizar su auto-oxidación, reduciendo el material celular. Este tratamiento se utiliza en las PTAR con capacidad menor a 220 l/s, el costo de construcción es bajo, además requieren suministro de aire para estabilizar los lodos (Oropeza, 2006).

2.7.3. TRATAMIENTO QUÍMICO

Se efectúa una acción bactericida, llevando al bloqueo temporal de fermentaciones ácidas, la cal es el reactivo que se utiliza debido al bajo costo y alcalinidad a diferencia de los otros procesos. Sin embargo, tiene la desventaja que los biosólidos producidos pueden regresar inestable si el pH cae después del tratamiento, lo que produce nuevos microorganismos.

2.7.3.1. ESTABILIZACIÓN ALCALINA DEL LODO

Para la estabilización alcalina, se mezcla el lodo con 360 g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, con esta cantidad se llega a un pH con el valor básico, la mezcla se deja en reposo por 24 horas, se debe monitorear el pH cada 10 minutos y su valor debe ascender de 10 a 13. Los lodos deben estar extendidos en una superficie plana que favorezca su desecación, después de la desecación se almacenan en bolsas plásticas para su caracterización (Campos et al., 2009).

2.8. MUESTREO DE LODO RESIDUAL

El muestreo es una herramienta de la investigación científica que sirve para delimitar la parte de la población que va ser estudiada, además existen metodologías para realizar el muestreo de acuerdo a las características del estudio (Torres, 2017).

- Mediante el Protocolo de Métodos de Análisis (2007) para suelos y lodos se debe homogeneizar la muestra de lodo recolectada en 3 días, para ser usada en los análisis químicos y físicos, tienen una humedad que puede dificultar la obtención de una muestra representativa, por lo cual debe secarse a una temperatura de $40^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ y molerse en un tamiz de 2mm para obtener sub-muestras, el proceso de secado y molienda se debe realizar adecuadamente con los equipos y materiales necesarios para no liberar los elementos a analizar. Se colectan lodos de la planta de tratamiento aguas residuales en un total de 6 muestras en una cantidad de 1 Kg, en envases de 19 L, a temperatura ambiente, para ser transportadas al laboratorio (Campos et al., 2009).
- De acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002 para la recolección de lodos de la PTAR municipal se debe utilizar el método del cuarteo, para eso: se utilizan bolsas de polietileno, para seleccionar al azar el mismo número en sitios diferentes. Luego se llena cada una de las bolsas con el material de cada sitio y se trasladan a un área plana horizontal de cemento pulido o

similar y bajo techo, se deposita su contenido en montículo. Se dividen en cuatro partes iguales A, B, C y D, eliminando las partes opuestas A y C, se repite la operación hasta dejar 10 kg de lodo, las muestras se trasladan al laboratorio en las bolsas debidamente selladas e identificadas.

2.9. NORMAS INTERNACIONALES

Normalmente los lodos son desechados al drenaje o sin ningún tratamiento a cauces de aguas, terrenos, lagunas y rellenos sanitarios, debido a la falta de recursos para ejecutar la depuración y la falta de control por dirigentes políticos que establezcan normas para el aprovechamiento de estos desechos. Una de las normas internacionales es la norma oficial mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en lodos para su aprovechamiento y disposición (SERMANAT, 2002).

Esta norma clasifica los lodos en: Buenos y excelentes dependiendo el grado de concentración de metales pesados (Cuadro 2.6) y en clases A, B y C de acuerdo a su composición por patógenos (Cuadro 2.7). El aprovechamiento los lodos se determinan de acuerdo al tipo y clase (Cuadro 2.8). Por otra parte, la norma

La norma de la Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) es concreta en la clasificación de los lodos denominándolas como:

- Clase A: no tienen restricción solitaria pueden ser agregados en el suelo, son de buena calidad y resulta por la eliminación de patógenos
- Clase B: tienen restricción sanitaria, pueden ser agregados en el suelo dependiendo de la localización y tipo suelo, estos se caracterizan por contener baja concentración de contaminantes con calidad menos comparados con los de clase A (SERMANAT, 2002).

Cuadro 2. 6. Concentraciones máximas permisibles de metales pesados en los lodos según la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.

Metales	Excelentes (mg/kg en base seca)	Buenos (mg/kg en base seca)
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Fuente: Extraído de NOM-004-SEMARNAT-2002.

Cuadro 2. 7. Concentraciones máximas permisibles de patógenos y parásitos en los lodos según la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.

Clase	Indicador Bacteriológico de Contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales (NMP/g en base seca)	Salmonella spp (NMP/g en base seca)	Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 1 ^(s)
B	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

Fuente: Extraído de NOM-004-SEMARNAT-2002.

Cuadro 2. 8. Aprovechamiento de biosólidos

Tipo	Clasificación	Uso
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para las clases B y C
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para la clase C
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> • Usos forestales • Mejoramiento de suelos • Usos agrícolas

Fuente: Extraído de NOM-004-SEMARNAT-2002.

De acuerdo a varios estudios los lodos cuentan con varios indicadores de calidad, cuentan con normas de regulación internacional, deben ser considerados para aprovechar su utilidad de forma adecuada, pueden ser aplicados al suelo por alto contenido en nutrientes como fósforo y nitrógeno (Cuadro 2.9) (USEPA, 1993). En Ecuador, no se conocen normas que regulen el vertimiento y reúso de los lodos residual, por lo que es necesario utilizar como referencia para su posible aplicación, las empleadas en otros países.

Cuadro 2. 9. Concentraciones límites de metales pesados en lodos según diferentes países (mg/kg en base seca).

Contaminante	Bélgica	Canadá	Alemania	Italia	España	EE.UU
Arsénico	1000	500	400	400	4000	2800
Plomo	600	150	150	200	1200	300
Cadmio	5	3	1	3	40	21
Cromo	150	50	100	150	750	-
Cobre	100	60	100	200	1750	1500
Níquel	50	60	50	50	400	420
Mercurio	5	0,15	1	2	25	17

Fuente: Extraído de USEPA

Las normas establecidas por la Directiva Europea y la norma de la Agencia para la Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) se diferencian en la concentración de metales pesados que deben contener los lodos para su reutilización (Cuadro 2.10). La Directiva Europea toma a consideración intervalos mayores, sin causar efectos negativos al suelo (USEPA, 1993). La USEPA determina valores indica valores concisos referentes a la característica de compuestos como plomo, mercurio, arsénico y zinc.

Es importante considerar el pH para tratar de manera segura los lodos, ya que afectaría a los metales en lo referente a solubilidad y aumentar su toxicidad causando efectos negativos en el suelo, un pH < 7 presenta riesgos de movilidad de los metales pesados, por eso es importante establecer límites permisibles inferiores para su uso (Chicón, 2003).

Cuadro 2.10. Concentraciones límites de metales pesados (mg/kg en base seca) en los lodos en diferentes organizaciones normativas (Directiva Europea y USEPA).

Metales	Directiva Europea 278/86	USEPA 503
Zinc	2500-4000	2800
Plomo	750-1200	300
Cadmio	20-40	39
Arsénico	No normado	41
Cobre	1000-1750	1500
Níquel	300-400	420
Mercurio	16-25	17

Fuente: Extraído de USEPA y Directiva Europea.

2.10. BIOSÓLIDOS

La Agencia de Protección Ambiental describe a los biosólidos como el producto final proveniente de las aguas residuales domésticas que han pasado por un proceso para la estabilización de la materia orgánica con características físicas, químicas y microbiológicas, para darles un tratamiento adecuado para su disposición final, con suficiente concentración de nutrientes para ser aprovechada por la agricultura o por el sector forestal para mejorar el suelo.

De acuerdo NOM-004-SEMARNAT-2002 “los biosólidos son lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que, por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento” (p2).

En la depuración el proceso de separación en la fase líquida genera biosólidos, en el proceso de decantación ocurre la separación del material en suspensión presente en el agua residual y en el proceso de decantación se realiza la separación de los flóculos de microorganismos que resultan del licor de mezcla (Oropeza, 2006).

2.11. CLASIFICACIÓN DE BIOSÓLIDOS

Según como indica Llivichuzca, (2016), los biosólidos se clasifican de acuerdo al origen o al tratamiento que se les realiza:

- Si es, en el origen puede clasificarse en aguas residuales domésticas o industriales.
- Según el tratamiento puede ser de tipo anaeróbico, aeróbico, compostaje.

Mediante la NOM-004-SEMARNAT-2002 los biosólidos se clasifican en 2 tipos, se establece en función del tipo y clase, como se especifica en el Cuadro 2.11. Su contenido de humedad debe ser hasta el 85%.

Cuadro 2. 91. Clasificación de biosólidos de acuerdo a NOM-004-SEMARNAT-2002

Tipo	Clase
Excelente	A
Excelente o bueno	B
Excelente o bueno	C

Fuente: Extraído de NOM-004-SEMARNAT-2002

La USEPA y NOM-004-SEMARNAT-2002 también clasifican los biosólidos mediante la cantidad de coliformes fecales permisibles:

Cuadro 2. 102. Clasificación de Biosólidos de acuerdo a USEPA y NOM-004-SEMARNAT-2002

COLIFORMES FECALES (NMP/G EN BASE SECA)		
Clase	USEPA	NOM-004-SEMARNAT-2002
A	Menor de 1000	Menor de 1000
B	Menor de 200000	Menor de 1000
C	No normado	Menor de 2×10^6

Fuente: Extraído de NOM-004-SEMARNAT-2002 y USEPA

2.12. MUESTREO

2.12.1. MUESTREO PARA BIOSÓLIDOS

Carrasco (2007) indica que la metodología para el tipo de investigación, en la elaboración de biosólidos se debe recolectar tres muestras por cúmulos a una distancia de 20 cm de la superficie en tres lugares distintos, para conseguir una muestra compuesta de 1,5 kg, de la cual se extraen una pequeña muestra para medir parámetros in situ e inmediatos (muestra fresca). Las muestras restantes se llevan a un proceso de secado y tamizado en una malla 10, los análisis se realizan en muestras secas.

2.12.2. MUESTREO PARA SUELOS DEGRADADOS

Consiste en tomar cinco muestras al azar a una profundidad de estimada de 0 – 20 cm, con una pala metálica de las parcelas experimentales y posteriormente se homogeneiza para formar una muestra compuesta, el secado se lo realiza al aire y se tamiza en una malla con 2mm de abertura (Ortiz et al., 1999).

2.13. METODOLOGÍA PARA LA DOSIFICACIÓN DE SUELO DEGRADADO

La aplicación de lodos en el suelo genera beneficios como la adición de nutrientes estos pueden evidenciarse a corto y mediano plazo, es de gran importancia planear cuidadosamente su adición al suelo para que no arriesgar su estabilidad

En la aplicación se debe considerar las necesidades de nutrientes, las propiedades físicas y químicas del lodo y las características del suelo. El nitrógeno es un compuesto muy importante en los lodos ya que mediante este se calcula las dosis para considerar las necesidades de los cultivos, mientras que compuestos como potasio y fosforo son se adicionan por medio de fertilizantes químicos. El nitrógeno aplicado a las plantas por medio del lodo no debe superar el requerido esto evita la lixiviación, debido a la poca información del tema se recomienda usar una tasa de 50 por cierto de disponibilidad (Salcedo et al., 2007).

Para realizar las mezclas en relación del lodo residual y suelo degradado se utiliza un Diseño Completamente al Azar (DCA), el cual consiste en cuatro tratamientos con cuatro repeticiones cada una siendo los siguientes:

- T₀ (control): 0% de lodo residual
- T₁: 30% de lodo residual
- T₂: 60% de lodo residual

2.14. SEMILLAS DE CEIBO

El ceibo (*Erythrina crista-galli*) procedente de Latinoamérica, de la familia de las leguminosas, conocido con varios nombres: pico de gallo, flor de coral, árbol de coral, es capaz de alcanzar una altura de 4 a 5 metros (altura media) sin embargo pueden crecer hasta 15 metros (Campos et al., 2011). Se lo puede considerar como un árbol ornamental por sus flores y su color rojizo (Ramírez y Stella, 2005).

2.14.1. GERMINACIÓN DEL CEIBO

Pérez (2016) señala que el ceibo es una especie muy fácil de cultivar: por semillas o por gajos leñosos. La semilla posee una excelente germinación luego del escarificado del tegumento y extremo remojo durante veinticuatro horas. La época del año recomendada para realizar este proceso es a partir de la primavera. Bajo este método, la producción puede ser heterogénea. También es posible que se propague vegetativamente por estacas leñosas, recolectadas en la etapa de reposo, a fines del invierno. En este caso, la producción de renuevos es más homogénea que la anterior, el tiempo total de germinación se lo realiza durante 10 días.

2.14.2. CURVAS DE CRECIMIENTO

El patrón para el crecimiento de un cuerpo se describe por medio de la curva sigmoidea. Para cada medición de tamaño de la planta, es necesario evaluar el crecimiento obtenido en relación con la medición anterior, lo que genera curvas de crecimiento (Negrin y Jiménez, 2012).

2.15. VALORACIÓN ECONÓMICA

Un análisis económico mediante el método costo de producción, para conocer el costo aproximado. Para la utilización del método costo de producción se puede tomar los gastos efectuados en la preparación de los sustratos y el transporte, el método propuesto considera 3 factores fundamentales de producción (Valencia, 2013):

- Materia prima
- Mano de obra directa
- Gasto de producción

$$CP = (M_p + M_{od} + G_p) \quad [2.1]$$

Dónde:

- CP = Costo de producción
- Mp = Materia prima
- M_{od} = Mano de obra directa
- Gp = Gasto de producción

CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO

3.1. UBICACIÓN

La investigación se realizó en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, ubicada en el cantón El Carmen, provincia de Manabí.

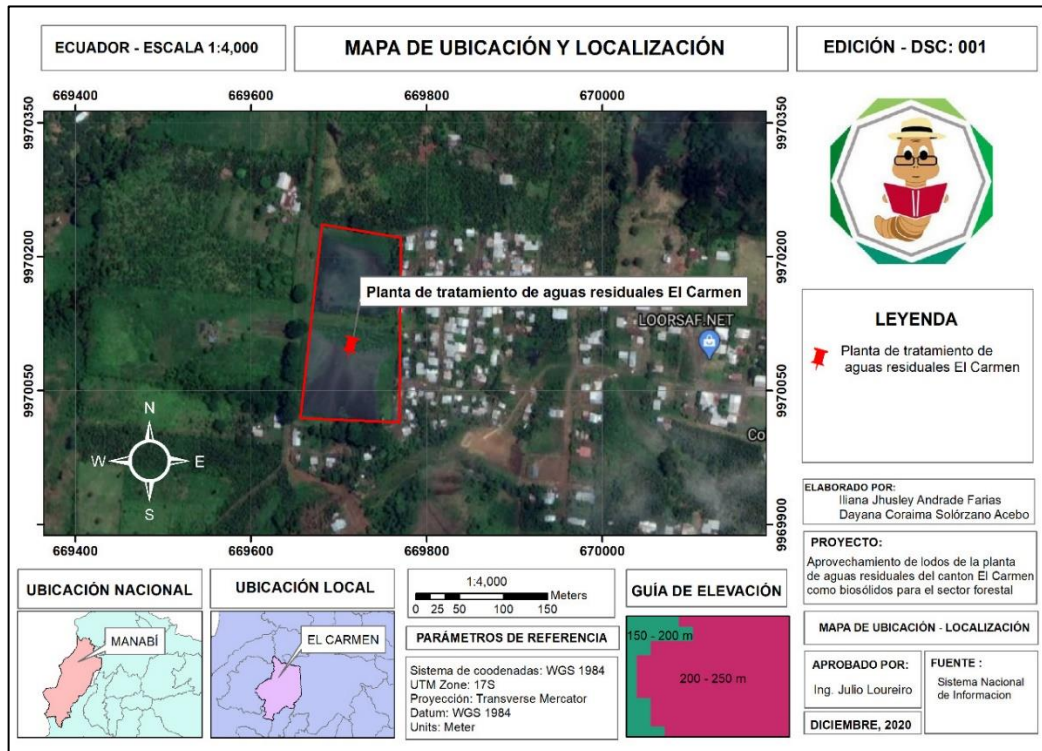


Figura 3. 1. Mapa de ubicación del sitio de desarrollo de la investigación.
Fuente: SAS Planet (2019).

3.2. DURACIÓN DEL TRABAJO

La investigación tuvo una duración de 9 meses, a partir de la aprobación de la propuesta, se desarrolló en tres fases con un diseño experimental.

3.3. TIPO DE INVESTIFACIÓN

3.3.1. INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA

Se utilizó una investigación cuantitativa, ya que los resultados finales se establecieron según los análisis estadísticos. Se midió la eficiencia de los tratamientos en base a datos numéricos como la altura de la planta y la cantidad en gramos de lodos residuales y suelo agrícola.

3.4. MÉTODOS

3.4.1. MÉTODO BIBLIOGRÁFICO

Se utilizó en la recopilación de información necesaria, en fuentes confiables, acerca de las variables de estudio, y de la metodología necesaria para conseguir los resultados de la investigación.

3.4.2. MÉTODO ESTADÍSTICO

En esta investigación se realizaron los siguientes análisis estadísticos:

- Diseño Completamente al azar
- Pruebas múltiples de media Tukey ($p < 0,5$)
- Gráficos estadísticos
- Porcentajes
- Promedios

3.5. TÉCNICAS

3.5.1. OBSERVACIÓN

La técnica de observación permitió estudiar cómo evolucionan las plantas sembradas en cada una de las unidades experimentales, y así establecer conclusiones finales.

3.6. VARIABLES EN ESTUDIO

- **VARIABLE INDEPENDIENTE**

Lodos de la planta de Tratamiento de las Aguas Residuales del cantón El Carmen.

- **VARIABLE DEPENDIENTE**

Biosólidos en el sector forestal.

3.7. DISEÑO EXPERIMENTAL

En el diseño experimental se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) unifactorial, el cual consistió en tres tratamientos con cuatro repeticiones, dando un total de 12 unidades experimentales.

Cuadro 3. 1. Descripción del diseño experimental.

Diseño experimental Factorial DCA	
Número de tratamientos	3
Número de repeticiones	4
Factor en estudio	Cantidad de lodos residuales y suelo degradado.

Fuente: Elaboración propia.

3.8. PROCEDIMIENTO

3.8.1. FASE I. CATEGORIZACIÓN DEL LODO PROVENIENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL CANTÓN EL CARMEN

Actividad 1. Muestreo del lodo de la PTAR del cantón El Carmen

El lodo residual, se recolectó en la PTAR municipal del cantón El Carmen, se tomó la muestra de la laguna facultativa (Anexo 1 – Figura 1.1). La metodología elegida para la recolección, fue la de cuarteo, recomendado por la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, se tomó una muestra en 6 bolsas de polietileno de 0,70 m x 0,50 m para guardar las mismas, se dividió el material previamente colectado y homogenizado en cuatro partes iguales (A, B, C y D) se

trasladaron en una superficie plana horizontal de 4 m x 4 m, se eliminaron las partes opuestas A y C, luego se repitió la operación hasta dejar 10 kg de lodo, posteriormente, las muestras fueron trasladadas al laboratorio en las bolsas, selladas e identificadas respectivamente, el tiempo máximo de transporte de la muestra al laboratorio, no excedió de 8 horas de acuerdo a la metodología elegida.

Actividad 2. Análisis físicos, químicos y biológicos del lodo

Se caracterizó el lodo en el Laboratorio Química de la Universidad Técnica de Manabí (UTM) (pH, NPK, plomo y cadmio) y en el laboratorio LABOLAB de la ciudad de Quito (mercurio, coliformes fecales y huevos de helmintos).

Cuadro 3. 2. Método de análisis para determinar parámetros Físicoquímicos y biológicos.

Parámetros Físicoquímicos y Microbiológicos	U/M	Método de análisis	Basado en
pH	-	Potenciométrico	Mancipe y Triviño (2018)
P	%	Espectrofotometría	Amador, Veliz y Bataller (2015)
N	%	AS – 25	Amador, Veliz y Bataller (2015)
K	%	Espectrofotometría	Lugo et al. (2016)
Mercurio (Hg)	mg/kg	A.A*.VF*	NOM-004-SEMARNAT (2002)
Plomo (Pb)	mg/kg	AA*	NOM-004-SEMARNAT (2002)
Cadmio (Cd)	mg/kg	AA*	NOM-004-SEMARNAT (2002)
Coliformes fecales	NMP/g	Técnica de filtración por membrana	NOM-004-SEMARNAT (2002)
Huevos de helmintos	g en base seca	Microscópico	NOM-004-SEMARNAT (2002)

A.A*: Absorción atómica

VF*: Técnica de vapor frío.

Fuente: Elaboración propia.

Actividad 3. Clasificación del lodo mediante las normativas

La clasificación del lodo, en función de los metales pesados (mercurio, plomo y cadmio) se realizó comparando resultados de laboratorio con rangos fijados por la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. El cuadro 3.4., especifica los límites de concentraciones establecidas para estos metales.

Cuadro 3.3. Concentraciones máximas permisibles de metales pesados en los lodos según la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.

Metales	Excelentes (mg/kg en base seca)	Buenos (mg/kg en base seca)
Hg	17	57
Pb	300	840
Cd	39	85

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002

Se hizo una segunda clasificación atendiendo a la clase con tres categorías (A, B o C) atendiendo a su calidad biológica (Coliformes fecales y Huevos de helmintos) siguiendo las exigencias de la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Cuadro 3.4. Clasificación de lodos de acuerdo con concentraciones permisibles de Coliformes Fecales (NMP/g base seca) y Huevos de helmintos (g en base seca) según la NOM-004-SEMARNAT-2002

Clase	Coliformes fecales	Huevos de helmintos
A	Menor de 1000 NMP/g base seca	Menor de 1(a) g en base seca
B	Menor de 1000 NMP/g base seca	Menor de 10 g en base seca
C	Menor de $2 \cdot 10^6$ NMP/g base seca	Menor de 35 g en base seca

^{1(a)} : Huevos de helmintos viables

NMP = Número más probable

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002

Se determinó el posible aprovechamiento de lodos a partir de la clasificación de los indicadores metales pesados y biológicos bajo los criterios establecidos por NOM-004-SEMARNAT-2002.

Cuadro 3.5. Aprovechamiento de lodos según clasificación de la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> ● Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. ● Los establecidos para las clases B y C
Excelente o Bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> ● Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación ● Los establecidos para la clase C
Excelente o Bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> ● Usos forestales ● Mejoramiento de suelos ● Usos agrícolas

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002.

3.8.2. FASE II. DETERMINACIÓN DE LAS MEZCLAS MÁS EFECTIVAS DE BIOSÓLIDOS PARA CULTIVOS FORESTALES

Actividad 1. Muestreo de un suelo degradado

Se utilizó un muestreo compuesto siguiendo la metodología de Ortiz et al. (1999) donde se homogenizaron tres muestras de suelo degradado. Para el desarrollo de esta técnica se eliminó la vegetación superficial del suelo y se efectuaron tres excavaciones evitando el desmoronamiento en forma de “V”, con profundidad de 15 a 20 cm y a una distancia entre ellas de 3 m.

La muestra compuesta se transportó al laboratorio de la ESPAM “MFL” y siguiendo el protocolo del laboratorio LABOLAB se sometió a un proceso de secado al aire libre por 3 días. Posteriormente la muestra se tamizó y la fracción de suelo degradado recolectada en el tamiz número 10 de 2mm de abertura (1.000 g) fue enviada al laboratorio.

Actividad 2. Caracterización del suelo degradado.

La caracterización de suelo degradado se la realizó, a escala laboratorio con el fin de conocer el estado actual. En el cuadro 3.6, se detallan los parámetros fisicoquímicos analizados en el laboratorio LABOLAB de la ciudad de Quito.

Cuadro 3. 6. Análisis fisicoquímicos del suelo degradado.

Parámetros Fisicoquímicos	U/M	Método de análisis
pH	-	PEE/LA/10 INEN 526
CE	dS/m	NOM 021-RECNAT-2000
N	%	Kjeldahl
P	mg/kg	AOAC 986.24
Cd	mg/kg	Standart Methods 3112B Modif
Pb	mg/kg	Standart Methods 3112B Modif
Hg	mg/kg	Standart Methods 3112B Modif

Fuente: Laboratorio LABOLAB.

Actividad 3. Comparación de los resultados de suelo degradado con la normativa

La comparación se realizó entre los resultados del laboratorio y los valores de la Tabla 1 - Anexo 2 del Libro VI del Acuerdo Ministerial 097^a (2015). El cuadro 3.7 especifica los rangos establecidos para estos parámetros.

Cuadro 3.7. Valores referenciales de Criterios de Calidad del suelo.

Parámetro	Unidades	Valores referenciales*
pH	-	6 a 8
Conductividad	μS/cm	200
Plomo	mg/kg	19
Cadmio	mg/kg	0,5
Mercurio	mg/kg	0,1

Fuente: Tabla 1 - Anexo 2 del Libro VI del Acuerdo Ministerial 097^a (2015)

Actividad 4. Aplicación del diseño experimental

Se desarrolló un Diseño Completamente al Azar (DCA) bajo la metodología de Salcedo et al. (2007) donde se utilizó tres tratamientos (T₀, T₁ y T₂) con cuatro repeticiones cada una, complementando 12 unidades experimentales.

En cada tratamiento se colocaron dos semillas de la especie forestal Ceibo (*Erythrina crista-galli*) dando un total de 8 semillas por tratamiento, siguiendo la metodología expuesta por Oliva et al. (2014) en la cual mencionan que al ser semillas de tamaño mediano, se lo siembra de manera directa con 2 semillas por lo menos. Los T₁ y T₂ se realizaron de forma análoga, pero se utilizaron mezclas (suelo degradado-lodo residual) variando la composición másica del lodo residual en dos niveles 30 y 60 % P/P respectivamente de la masa total como se muestra en el cuadro 3.8. La variable respuesta de los experimentos fue crecimiento en plantas y se determinó a las 3 semanas (21 días) de iniciado los experimentos.

Los datos se analizaron en software estadístico SPSS versión 21 donde se desarrolló un Análisis de Varianza de un factor ANOVA y la prueba de Tukey.

Cuadro 3. 8. Matriz experimentos

Tratamiento	Lodo residual (g)	Suelo degradado (g)	Masa total (g)	Semillas de Ceibo	% P/P
T0	0	300	300	2	0
T1	90	210	300	2	30
T2	180	120	300	2	60

P/P= peso/peso

Fuente: Elaboración propia.

3.8.3. FASE III. FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE APLICACIÓN DE LODO RESIDUAL PARA CULTIVOS FORESTALES

Luego del cumplimiento de las fases anteriores, se procedió a desarrollar la valoración económica a escala laboratorio. Se realizó una matriz en Microsoft Excel con los valores por tratamiento, de acuerdo a la composición de los mismos, determinando el valor total de cada uno (García y Martínez, 2018).

Para el cálculo del costo total de la mezcla se utilizó la ecuación 3.1.

$$CTM_i = CTL_i + CTS_i \quad [3.1]$$

Donde:

i: Número de tratamiento.

CTM_i: Costo total de la mezcla por tratamiento.

CTL_i: Costo total del lodo por tratamiento.

CTS_i: Costo total del suelo por tratamiento.

Para determinar el costo del lodo se utilizó la ecuación 3.2.

$$CTL_i = MTL_i \times CL \quad [3.2]$$

Donde:

i: Número del tratamiento.

CTL_i: Costo de lodo por tratamiento.

MTL_i: Masa total del lodo por tratamiento.

Cl: costo del lodo.

Para determinar el costo del suelo se utilizó la ecuación 3.3.

$$CTS_i = MTS_i \times CS \quad [3.3]$$

Donde:

i: Número del tratamiento.

CTS_i: Costo total del suelo por tratamiento.

MTS_i: Masa total del suelo por tratamiento.

CS: costo del suelo.

Cuadro 3. 9. Costo total de la mezcla para cada tratamiento

Tratamiento	Masa total del lodo residual (MTL _i) (g)	Masa total del suelo degradado (MTS _i) (g)	Costo del lodo residual (\$/g)	Costo del lodo (CTL _i) (\$)	Costo del suelo degradado (\$/g)	Costo del suelo degradado (CTS _i) (\$)	costo total de la mezcla (CTM _i) (\$)
T ₀							
T ₁							
T ₂							

Fuente: García y Martínez (2018).

Se efectuó un análisis económico a la producción, para conocer el costo aproximado. Este análisis se ejecutó siguiendo los lineamientos establecidos por el Servicio Nacional de Contratación Pública (SERCOP, 2017) lo cual permitió definir los costos fijos y variables de la producción del biosólido.

- **Costos fijos**

- Mano de obra directa: se determinó la mano de obra directa para cada tratamiento con el valor establecido por la Contraloría General del Estado (2021) donde se establece el costo horario para personal de laboratorio.

Para determinar el costo total de mano obra directa se utilizó la ecuación 3.4

$$CTMO_i = HL_i \times JH \quad [3.4]$$

Donde:

i: Número del tratamiento.

CTMO_i: Costo total de mano de obra por tratamiento.

HL_i: Horas laborables.

JH: Jornal/Hora.

Cuadro 3. 10. Matriz de costos de mano de obra directa.

Tratamiento	Descripción	Horas Laborales (HL _i) (H)	Jornal/Hora (JH) (\$/H)	Costo Total de mano de obra (CTMO _i) (\$)
-------------	-------------	--	-------------------------------	--

TOTAL

Fuente: Adaptado de SERCOP (2017).

- Costos indirectos de producción: se establecieron dos costos indirectos de producción los cuales fueron transporte y análisis de laboratorios, para la asignación de valor del transporte, se tomó como referencia el total gastado en viáticos y se dividió para cada cada tratamiento.

Cuadro 3.11. Matriz de costos indirectos de producción.

Tratamiento	Descripción	Costo (\$)	Descripción	Costo (\$)
-------------	-------------	---------------	-------------	---------------

TOTAL

Fuente: Adaptado de SERCOP (2017).

- **Costos variables o directos**

- Materia prima: el costo de la materia prima se lo determinó de acuerdo a cada tratamiento, donde se incluyó la mezcla Lodo residual - suelo degradado y otros materiales como guantes, fundas herméticas, semillas, etiquetas y recipientes, en la siguiente matriz:

Cuadro 3.12. Matriz de costos de materia prima para la fabricación de biosólido.

Materiales	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
------------	----------	------------------------	---------------------

Total**Costo unitario**

Fuente: Adaptado de SERCOP (2017).

Para el cálculo del costo total por tratamiento se lo realizó mediante la ecuación 3.5

$$CT_i = MP_i + MO_i + GIP_i \quad [3.5]$$

Donde:

i: Número del tratamiento.

CT_i : Costo total por tratamiento.

MP_i : Materia prima por tratamiento.

MO_i : Mano de obra por tratamiento.

GIP_i : Gasto indirecto de producción.

Para determinar el costo unitario por tratamiento se utilizó la ecuación 3.6

$$CU_i = \frac{CT_i}{UE_i} \quad [3.6]$$

Donde:

i: Número del tratamiento.

CU_i : Costo unitario por tratamiento.

CT_i : Costo total por tratamiento.

UE_i : Unidades experimentales por tratamiento.

Cuadro 3. 13. Costos totales por tratamiento durante la investigación.

Tratamiento	Unidades experimentales	Materia prima (\$)	Mano de obra (\$)	Costos indirectos de producción (\$)	Costo total (\$)	Costo unitario (\$/U)

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CATEGORIZACIÓN DEL LODO PROVENIENTE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DEL CANTÓN EL CARMEN

En el Cuadro 4.1 se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos y biológicos del lodo proveniente de la PTAR del cantón El Carmen, para más información (Anexo 2 y 3).

Cuadro 4. 1. Caracterización física, química y biológica del lodo proveniente de la PTAR del cantón El Carmen

Parámetros	U/M	Valores
pH	-	7,58 ± 0,03
N	mg/kg	1,20 ± 0,65
P	mg/kg	25 ± 3,60
K	mg/kg	50 ± 3,60
Hg	mg/kg	<0,0002
Pb	mg/kg	142,6 ± 16,34
Cd	mg/kg	87 ± 17,34
Coliformes fecales	NMP/g	4,3 x10 ⁴
Huevos de helmintos	g en base seca	Ausente

Nota: Mean ± SD= promedio desviación estándar, NMP= número más probable

Fuente: Elaboración propia.

El valor obtenido del pH es de 7,58, el cual es considerado neutro. Mancipe y Triviño (2018) analizaron los lodos residuales de la PTAR de Sotaquirá en Colombia en donde obtuvieron un pH de 7,12; concluyendo que se debe principalmente a que posee gran cantidad de materia orgánica. Los mismos autores indicaron que la composición del lodo varía durante el tratamiento de las aguas residuales y dependerá del proceso específico aplicado.

Turovskiy y Mathai (2006) expresan que el rango de pH en lodos residuales debe situarse entre 5 a 8, mientras que Amador et al. (2015) lo sitúan entre 7 a 8,5. Comparando con estos autores se puede establecer que el nivel de pH de la

muestra de lodo residual se encuentra dentro de los límites esperados y establecidos.

Desde un punto de vista práctico, el lodo residual es una fuente valiosa de compuestos orgánicos tales como el nitrógeno y el fósforo.

Los resultados de Nitrógeno (1,20 mg/kg) y Fósforo (25 mg/kg) del lodo residual extraído de la PTAR de El Carmen, son menores a los valores citados por Amador et al. (2015). De acuerdo al autor no es conveniente que los parámetros antes nombrados estén debajo de los límites mínimos permisibles, ya que complican la utilización del lodo residual para fines agrícolas, debido que ambos compuestos son muy necesarios para el desarrollo de plantas, el N es usado en las plantas para producir hojas y mantener el color, el P ayuda a formar raíces y producir semillas. (González, 2015).

Amador et al. (2015) expresan en la siguiente tabla los valores máximos permisibles para los componentes mencionados anteriormente:

Cuadro 4. 2. Valores de Nitrógeno y Fósforo en lodos residuales.

Parámetros	U/M	Valores PTAR El Carmen	Valores mínimo y máximo
N	mg/kg	1,20	200 – 1500
P	mg/kg	25	40 – 300

Fuente: Amador et al. (2015)

El K mostró una alta concentración de 50 mg/kg, de acuerdo a Lugo et al. (2016) quienes encuentran para este elemento 6,6 mg/kg. El potasio en el suelo permite regular la absorción de agua y el potencial hídrico celular en las plantas, además actúa en el desarrollo y crecimiento de los cultivos cuando el nivel de nitrógeno es alto y a su vez activan enzimas y sintetiza proteínas (Narváez et al., 2014).

Los valores de Hg, Pb y Cd obtenidos en la presente investigación fueron de (<0,0002 mg/kg, 142,6 mg/kg y 87 mg/kg) respectivamente. Según la norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT (2002) el valor de Hg está muy por debajo de lo establecido (17 mg/kg). En el caso del Pb también tuvo una concentración baja respecto al mínimo de lo establecido en la norma (300 mg/kg).

Separ (2017) menciona que, en pequeñas cantidades, es decir menor al límite permitido de estos elementos es esenciales para el crecimiento de las plantas, siendo un acondicionador para el suelo degradado. Sin embargo, el Cd excede el límite máximo permisible en la normativa (85 mg/kg). Martínez (2003) expresa que el cadmio es un subproducto de la explotación de otros metales como el cobre, zinc y plomo, la biodisponibilidad del cd para la planta depende de numerosos factores físicos, químicos y biológicos que modifican su solubilidad retardando su crecimiento.

La presencia de coliformes fecales en el lodo residual está dentro los límites permisibles de la normativa NOM-004-SEMARNAT-2002 con una concentración de $4,3 \times 10^4$ NMP/g. De acuerdo con Ortiz et al. (1995) al aplicar los lodos, las poblaciones microbianas originales disminuyen debido a condiciones ambientales como la radiación solar, con lo cual agrega que es bueno mantenerlo en el rango establecido.

Se detectó ausencia de huevos de helmintos en los análisis realizados dentro de la investigación lo cual se determina que se encuentra dentro de los límites máximos permisibles de la NOM-004-SEMARNAT-2002 (<1 g de huevo viable en base seca). Para Ortiz et al. (2012) los lodos residuales son propicios para el embrionamiento de los huevos de helmintos, estos pueden permanecer en los suelos por periodos hasta siete años.

En los cuadros 4.3 y 4.4 se muestran los resultados de la clasificación del lodo atendiendo a metales pesados (Hg, Pb y Cd), coliformes fecales y huevos de helmintos respecto a la norma NOM-004-SEMARNAT-2002. El lodo se clasificó de excelente para las concentraciones de Hg y Pb y bueno para el Cd. En cuanto a los coliformes fecales alcanzó la categoría de clase C y para huevos de helmintos la categoría de clase A.

Con los resultados obtenidos y consultando el cuadro 3.1 el lodo puede ser usado para usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas sin ningún tipo de tratamiento. Según Cupe y Juscamaita (2018) la aplicación de lodos residuales

incrementa la productividad forestal, estabiliza áreas deforestadas o perturbadas por la minería, la construcción, los incendios, el sobrepastoreo, erosión u otras causas.

Cuadro 4. 3. Clasificación del lodo proveniente de la PTAR del cantón El Carmen en función de los metales pesados (Hg, Pb y Cd) según la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Parámetros	U/M	Valores	Excelente	Buenos	Clasificación
			(mg/kg en base seca)	(mg/kg en base seca)	
Hg	mg/kg	<0,0002	17	57	Excelente
Pb	mg/kg	142,6 ± 16,34	300	840	Excelente
Cd	mg/kg	87 ± 17,34	39	85	Bueno

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4. 4. Clasificación del lodo proveniente de la PTAR del cantón El Carmen atendiendo las concentraciones permisibles de Coliformes Fecales y Huevos de helmintos según la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Parámetros	U/M	Valores	NOM-004-SEMARNAT-2002		Clasificación
			Valor Mínimo	Valor máximo	Clase
Coliformes fecales	NMP/g	4,3 x10 ⁴	<1000	<2*10 ⁶	C
Huevos de helmintos	g en base seca	Ausente	< 1 ^(a)	<35	A

NMP: número más probable.

A: Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.

C: Usos forestales o mejoramientos de suelos o usos agrícolas.

Fuente: Elaboración propia.

4.2. DETERMINACIÓN DE LAS MEZCLAS MÁS EFECTIVAS DE BIOSÓLIDOS PARA CULTIVOS FORESTALES

4.2.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DEGRADADO

En el Cuadro 4.5 se reflejan los resultados de los parámetros fisicoquímicos de la muestra de suelo degradado (Anexo 4).

Cuadro 4. 5. Análisis de parámetros fisicoquímicos de suelo degradado

Parámetros	U/M	Valores
pH	-	7,81
Conductividad	μS/cm	4280
Cadmio	mg/kg	0,34
Plomo	mg/kg	20,56
Mercurio	mg/kg	<0,002

Fuente: Laboratorio LABOLAB

En el Cuadro 4.6 se muestran los resultados de comparación de los parámetros fisicoquímicos entre el suelo degradado y la Tabla 1 - Anexo 2 del Libro VI del Acuerdo Ministerial 097^a (2015).

Cuadro 4.6. Comparación entre los resultados del laboratorio y valores de la Tabla 1 - Anexo 2 del Libro VI del Acuerdo Ministerial 097^a (2015).

Parámetro	Unidades	Valores obtenidos	Valores referenciales*	Cumplimiento
pH	-	7,81	6 a 8	Cumple
Conductividad	μS/cm	4280	200	No Cumple
Plomo	mg/kg	20,56	19	No Cumple
Cadmio	mg/kg	0,34	0,5	Cumple
Mercurio	mg/kg	<0,002	0,1	Cumple

Fuente: Elaboración propia

El pH mostró un valor de 7,81 cumpliendo con los valores de referencia de la Tabla 1 - Anexo 2 del Libro VI del Acuerdo Ministerial 097^a (2015). Estrada et al. (2017) mencionan que el pH es una de las variables más importantes en los suelos agrícolas, debido a que afecta directamente a la absorción de los nutrientes del suelo por las plantas.

Para obtener buen rendimiento y productividad los autores recomiendan un pH óptimo del suelo que varíen entre 6,5 y 8,0 en este rango los nutrientes son más asimilables y, por tanto, donde mejor se aportarán la mayoría de los cultivos

El valor de conductividad fue de 4.280 μS/cm excediendo los valores de referencia de acuerdo a la normativa. Garrido (2003) manifiesta que los suelos con elevadas conductividades eléctricas impiden el buen desarrollo de las plantas, ya que contienen asimismo una elevada cantidad de sales. Este autor establece que, debido al valor obtenido, por lo general se pueden observar dificultados en su uso en muchos cultivos, esta información es sustentada por Jaschek (2016), quien manifiesta que un suelo con esos valores de conductividad se lo considera salino, y el riesgo en su uso es severo.

En el caso del Pb el resultado obtenido fue 20,56 mg/kg superando el valor máximo conforme a la normativa. Méndez et al. (2009) expresan que el Pb es un contaminante altamente tóxico para el ambiente, su presencia se debe esencialmente a las actividades antropogénicas. Vásquez et al. (2019) señalan que la abundancia de plomo en los suelos es motivo de preocupación en la producción agrícola debido a los efectos nocivos sobre la microflora del suelo, el crecimiento de los cultivos y la seguridad alimentaria.

Los valores de Cd (0,34 mg/kg) y Hg (<0,002 mg/kg) se encuentran dentro del rango establecido por la norma. Méndez et al. (2009) indican que el Cd es uno de los metales de gran importancia en bajas concentraciones para las plantas, es fundamental para las células y presenta una ligera estimulación a la germinación y el crecimiento de las plantas.

Puga et al. (2006) señalan que el Hg en el suelo en bajas cantidades se reduce lentamente mediante la lixiviación, el consumo por plantas, la erosión y la deflación, sin embargo, es perjudicial para las plantas debido a que reduce la fotosíntesis, la velocidad de la transpiración y la incorporación de agua de la misma.

4.2.2. APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

En el cuadro 4.7 se detallan las medias del crecimiento de plantas para cada tratamiento en el periodo de los 21 días (Anexo 5).

Cuadro 4. 7. Medias de crecimiento de plantas semanales.

CRECIMIENTO DE PLANTAS (cm)					
TRATAMIENTO	REPETICIONES				MEDIA
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	
T ₀	1,50	1,50	1,40	1,70	1,52 ± 0,13
T ₁	1,60	1,50	1,70	1,60	1,60 ± 0,082
T ₂	2,20	2,30	2,70	2,30	2,38 ± 0,22

Nota: Mean ± SD

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4.1., se muestra el crecimiento de plantas en la tercera semana de prueba.

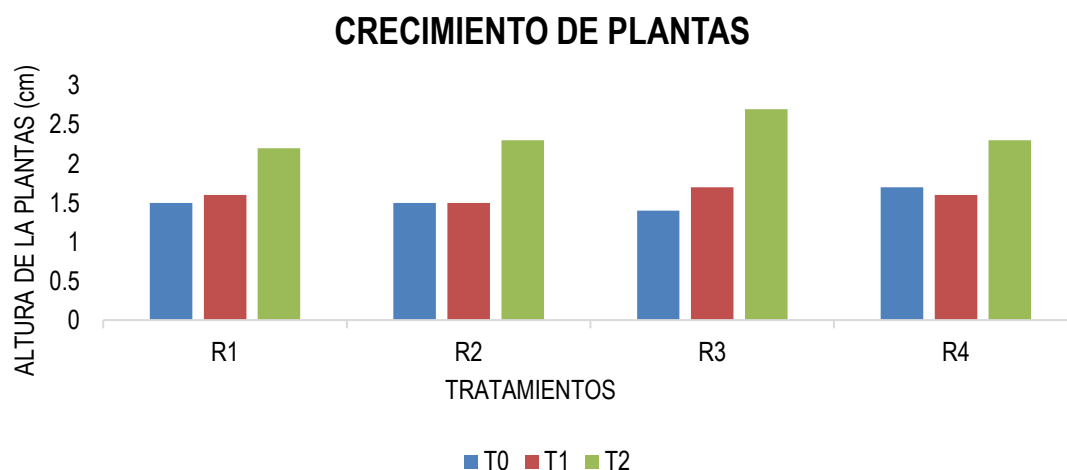


Gráfico 4. 1. Crecimiento de plantas según tratamientos.
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el gráfico 4.1, el tratamiento T₂ obtuvo mejor resultado siendo 2,38 cm, mientras que los tratamientos T₀ y T₁ fueron menos efectivos con valores de (1,52 y 1,60 cm) respectivamente.

4.2.2.1. ANALISIS ESTADISTICO

Se realizó el análisis de la varianza como se muestra en el cuadro 4.8., (Anexo 6).

Cuadro 4. 8. Análisis de Varianza de un factor.

ANOVA de un factor					
Crecimiento de plantas					
	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	1,772	2	,886	37,081	,000
Intra-grupos	,215	9	,024		
Total	1,987	11			

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar cuadro 4.8 la significancia brinda un valor $<0,05$ rechazando la hipótesis nula y aceptando la hipótesis alternativa donde hay diferencias entre las medias de los tratamientos.

Se realizó la prueba múltiple de medias Tukey al 95% de significancia para determinar subconjuntos homogéneos entre los tratamientos como se muestra en el cuadro 4.9 (Anexo 7).

Cuadro 4.9. Subconjuntos homogéneos según la prueba de Tukey

Crecimiento de plantas HSD de Tukeya			
Tratamientos	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
T ₀	4	1,5250	
T ₁	4	1,6000	
T ₂	4		2,3750
Sig.		,777	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 4.000.

Fuente: Elaboración propia.

Con la prueba múltiple de medias Tukey se determinó que hay dos subconjuntos, el primero conformado por los tratamientos T₀ y T₁ cuyas medias no difieren significativamente siendo lo de más bajos resultados. El segundo subconjunto está conformado por el tratamiento T₂ el cual difiere de los anteriores respecto a sus medias obteniendo valores más elevados.

Comprendiendo los resultados de los Cuadros 4.8 y 4.9 coincide con lo expresado por Aravena (2007) donde señala que, los lodos es una alternativa para mejorar las propiedades físicas y químicas en suelos degradados. En una investigación sobre la evaluación de lodos residuales como abono orgánico en suelos de uso agrícola realizada por Salcedo et al. (2007) hicieron una evaluación del efecto del lodo en el maíz, como resultados obtuvieron diferencias significativas entre los tratamientos, sin embargo, un solo tratamiento fue significativamente diferente al resto, siendo la de mayor concentración (100 g de lodo), observando un mejor crecimiento del maíz. Resultados similares fueron observados en un estudio donde evaluaron diferentes tipos y dosis de lodo en granos y paja de trigo, siendo los más efectivos los de mayor concentración, probablemente por los aportes nutricionales contenidos en el lodo utilizado (Walter et al., 1994). De esta manera concluimos que el aumento de la composición másica en las mezclas suelo

degradado-lodo residual influyó de manera favorable para el crecimiento de plantas.

4.3. FACTIBILIDAD ECONÓMICA DE APLICACIÓN DE LODO RESIDUAL PARA CULTIVOS FORESTALES

La evaluación económica de los tratamientos propuestos en la investigación se realizó mediante un análisis costo unitario en cuanto a los costos asociados al establecimiento y manejo de estos.

En el Cuadro 4.10 se especifica el valor total de lodo residual y suelo degradado utilizado para cada tratamiento.

Cuadro 4. 10. Valor total de cada tratamiento.

Tratamiento	Masa total del lodo residual (MTL _i) (g)	Masa total del suelo degradado (MTS _i) (g)	Costo del lodo residual (\$/g)	Costo del lodo (CTL _i) (\$)	Costo del suelo degradado (\$/g)	Costo del suelo degradado (CTS _i) (\$)	Costo total de la mezcla (CTM _i) (\$)
T ₀	-	1200	-	-	0,001	1,2	1.2
T ₁	360	840	0,002	0,72	0,001	0,84	1,56
T ₂	720	480	0,002	1,44	0,001	0,48	1,92

Fuente: Elaboración propia.

En los cuadros 4.11, 4.12 y 4.13 se detallan los costos en materia prima para cada tratamiento.

Cuadro 4. 11. Costos de materia prima para el T₀.

Materiales	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
Lodo residual T ₀	0	0,002	0,00
Suelo degradado T ₀	1200 g	0,001	1,2
Guantes	1	0,10	0,10
Fundas Herméticas	4	0,05	0,20
Semillas	8	0,10	0,80
Etiquetas	4	0,05	0,20
Recipientes	4	0,02	0,08
TOTAL			2,58

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4. 12. Costos de materia prima para el T₁.

Materiales	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
Lodo residual T ₁	360 g	0,002	0,72
Suelo degradado T ₁	840 g	0,001	0,84
Guantes	1	0,10	0,10
Fundas Herméticas	4	0,05	0,20
Semillas	8	0,10	0,80
Etiquetas	4	0,05	0,20
Recipientes	4	0,02	0,08
TOTAL			2,94

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4. 13. Costos de materia prima para el T₂.

Materiales	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
Lodo Residual T ₂	720 G	0,002	1,44
Suelo Degradado T ₂	480 G	0,001	0,48
Guantes	1	0,10	0,10
Fundas Herméticas	4	0,05	0,20
Semillas	8	0,10	0,80
Etiquetas	4	0,05	0,20
Recipientes	4	0,02	0,08
TOTAL			3,30

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4. 14. Costos de mano de obra.

Tratamiento	Descripción	Horas Laboradas	Jornal/Hora (\$)	Costo Total (\$)
T ₀	Trabajadores	3,33	4,50	15
T ₁	Trabajadores	3,33	4,50	15
T ₂	Trabajadores	3,33	4,50	15
TOTAL		10		45

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4. 15. Costos indirectos de producción.

Tratamiento	Descripción	Costo (\$)	Descripción	Costo (\$)
T ₀	Transporte	1,66	Análisis de laboratorio	25
T ₁	Transporte	1,66	Análisis de laboratorio	25
T ₂	Transporte	1,66	Análisis de laboratorio	25
TOTAL		5,00		75

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4. 16. Costos totales por tratamiento durante la investigación.

Tratamiento	Unidades experimentales	Materia prima (\$)	Mano de obra (\$)	Costos indirectos de producción (\$)	Costo (\$)	Costo unitario (\$/U)
T ₀	4	2,58	15,00	26,66	44,25	11,06/kg
T ₁	4	2,94	15,00	26,66	44,60	11,15/kg
T ₂	4	3,30	15,00	26,66	44,97	11,25/kg

Fuente: Elaboración propia

En el cuadro 4.16., se puede observar los costos unitarios por tratamientos durante toda la investigación, siendo el T₀ de menor costo con \$11,06/kg esto se vio influenciado ya que no se agregó la materia prima que fue el lodo residual mientras que en el T₁ se utilizó 360 g de lodo residual y 840 g de suelo degradado y para el T₂ 720 g de lodo residual y 480 g de suelo degradado. Pero cabe recalcar que el mejor tratamiento, el más eficiente fue el T₂, pero a su vez fue el de mayor costo unitario con \$11,25/kg pero este valor solo difiere entre 0,10 y 0,20 centavos en los tratamientos T₀ y T₁. Por lo que se puede utilizar en el tratamiento de suelo para sector forestal.

Cabe indicar que no obstante al costo unitario del tratamiento T₂ siendo el más alto en comparación a los demás su eficiencia se evidenció en los resultados obtenidos a través de la investigación ya que fue el que tuvo mayor crecimiento y mejores condiciones. Además, fue el tratamiento donde se utilizó más cantidad de lodo residual y menos suelo degradado, es por ello que dicho tratamiento obtuvo mayor crecimiento en su planta y mejor eficiencia.

Torres y Zarate (1996) mencionan que los lodos residuales sirven para ser reutilizados en la aplicación del suelo, teniendo una amplia ventaja ya que mejoran la productividad del terreno sirviendo como fertilizante para incrementar la producción de los cultivos y a su vez reducir los costos agrícolas. Así mismo, Hue et al. (1988) Señalan que la aplicación de lodos residuales en los cultivos ayuda al crecimiento de las plantas ya que contienen nutrimentos y además mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo, es decir que entre mayor

cantidad de lodo residual se utilice mejor será el resultado siempre y cuando el lodo tenga un tratamiento previo, de no ser así hay riesgo de presencia de patógenos.

En concordancia con lo antes mencionado Castrejón et al. (2000) recalca que la aplicación en el suelo es frecuente en cultivos forestales, para la recuperación de suelos degradados y biorremediación de suelos contaminados. Es así que se comprueba que el uso de lodos residuales para cultivos forestales es una técnica aconsejable, económica y ambientalmente viable para los agricultores.

4.4. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

A través de la prueba ANOVA de un factor realizada (cuadro 4.8), se determinó que si hay diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre tratamientos, por lo cual se rechaza la hipótesis nula, siendo el T₂ el tratamiento que obtuvo el máximo valor promedio (2,38 cm), el cual tuvo mayor concentración de lodo residual en el experimento, en comparación con la investigación realizada por Walter et al. (1994) donde se evalúan diferentes tipos de dosis de lodo residual en granos de paja de trigo en el que también se obtuvieron resultados favorables, siendo el tratamiento con mayor concentración el que resultó más eficiente, probablemente debido a los aportes nutricionales que el lodo contiene. Según Medina (2003) el lodo residual es una alternativa viable para el crecimiento de la planta, debido a sus características físicas, químicas y biológicas; siendo esto corroborado por Aravena (2007) quien argumenta que, los lodos residuales son una alternativa para mejorar las propiedades físico y químicas en suelos degradados ya que contienen minerales esenciales. Además, Enríquez y Sánchez (2019) en su investigación menciona que el lodo residual puede ser considerado apto para ser usado en cultivos, ya que se obtienen resultados favorables, siempre que se tenga en cuenta los métodos adecuados y las normas existentes al momento de su aplicación.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- En los análisis fisicoquímicos y microbiológicos realizados en el lodo residual, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 se clasificó de excelente para las concentraciones de Hg y Pb y bueno para el Cd ($<0,0002$ mg/kg, 142,6 mg/kg y 87 mg/kg) respectivamente. En cuanto a los coliformes fecales alcanzó la categoría de clase C ($4,3 \times 10^4$ NMP/g) y para huevos de helmintos la categoría de clase A (ausencia), permitiendo usarse en cultivos forestales.
- Con la evaluación de los promedios de la variable de crecimiento de la planta se puede concluir que el tratamiento T_0 tuvo un crecimiento de 1,52cm, el T_1 de 1,60cm y el T_2 de 2,38 cm, es por ello que se entiende que el mejor tratamiento fue el T_2 donde se utilizó más cantidad de lodo residual (180 g) y menos suelo degradado (120g).
- De acuerdo a la factibilidad económica el mejor tratamiento fue T_2 , pero a su vez fue el de mayor costo unitario con \$11,25/kg. Este valor solo difiere entre 0,10 y 0,20 centavos en los tratamientos T_0 (\$11,06/kg) y T_1 (\$11,15/kg) respectivamente.

5.2. RECOMENDACIONES

- Elaborar una normativa ambiental en Ecuador para lodos residuales, dándole un buen aprovechado y su uso respectivo.
- Utilizar los lodos residuales para la recuperación de suelos degradados.
- Implementar guías educativas para conocer las alternativas ambientales en relación a los costos de elaboración.

BIBLIOGRAFÍA

- Bonifácio , C., De Nóbrega, M., & Silveira, H. (2011). ANÁLISIS GRANULOMETRICO DE UN SISTEMA PEDOLOGICO EN EL MUNICIPIO DE TAMBOARA. *Geográfica de América Central*, 1-19.
- Amador, A., Veliz, E., & Bataller, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 26, 1-10.
- Andrade, M., Marcet, P., Reyzábal, M., & Montero, M. (2000). Contenido, evolución de nutrientes y productividad en un suelo tratado con lodos residuales urbanos. *Edafología*, 7(3), 21-29.
- APHA. (1992). *Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales* (Décimo séptima ed.). Washington, Estados Unidos: APHA.
- Araque, M. (2006). *Evaluación de los tratamientos térmico y alcalino en la desinfección del lodo generado en la PTAR El Salitre*. Bogotá D.C: Universidad de los Andes.
- Arellano , O., Gabith , Q., Ayaviri , D., & Escobar , F. (2017). Estudio de la Aplicación del Método de Costos . *Revista de Investigaciones Altoandinas*.
- Baird, C. (1999). *Química Ambiental* (Segunda ed.). W.H. Freeman & Company.
- Campos, E., García, N., Velásquez, A., & García, M. (2009). Análisis básico del reúso de los lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en suelos de pradera del Parque Nacional Nevado de Toluca. *QUIVERA*, 11(2), 35-51.

- Campos, E., Velázquez, A., & Gómez, A. (2011). Predicción y comparación de transferencia de nutrientes de dos tipos de Vermicomposteo de lodos residuales a suelos forestales. *QUIVERA*, 1-15.
- Carrasco, C. (2007). *Tratamiento físico químico de aguas residuales*. Chile: Universidad de Chile.
- Castrejón, A., Barrios, J., Jiménez, B., Maya, C., Rodríguez, A., & González, A. (2015). Evaluación de la calidad de lodos residuales de México. *Revista del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México*, 6-9.
- Chicón, L. (2003). *Especiación de metales pesados en lodos de aguas residuales de origen urbano y aplicación de lodos digeridos como mejoradores de suelos*. España: Universidad de Málaga.
- Cisterna, P., & Alvarado, V. (2003). *Gradientes de estabilización de lodos de acuerdo a los regímenes de procesos de fangos activos*. España: Universidad de Oviedo.
- Cuevas, J., Seguel, O., Ellies, A., & Dörner, J. (2006). Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencias a la adición de lodos urbanos. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 6(2), 1-12.
- Cupe, B., & Juscamaita, J. (2018). Tratamiento de lodos residuales de una industria cervecera a través de fermentación homoláctica para la producción acelerada de abono orgánico. *Ecología Aplicada*, 107-118.
- Donoso, S., Peña, K., Galdames, E., Pacheco, C., Espinoza, C., Durán, S., & Gangas, R. (2016). Evaluación de la aplicación de biosólidos en

plantaciones de *Eucalyptus globulus*, en Chile central. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 107-119.

EPA (Agencia de Protección Ambiental). (2003). *Método 3051a y 3051. Digestión ácida asistida por microondas de sedimentos, lodos, tierra y aceite.*

Estrada , R., Hidalgo , C., Guzman , R., & Navarra, H. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencias* .

Garrido, M. (2003). *Interpretación de análisis de suelos*. España: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Gómez, L., & Merchan, A. (2016). *Caracterización fisicoquímica de los lodos provenientes de una Planta de Tratamiento de Agua residual industrial de una empresa de café del Departamento de Caldas*. Manizales: Universidad Católica de Manizales.

González, I. (2015). *Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR*. Córdoba: Universidad de Córdoba.

González, I. (2016). *Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR*. Córdoba: Universidad de Córdoba.

Gualoto, J. (2016). *Propuesta de gestión de lodos residuales municipales. Caso de estudio: Planta de Tratamiento de Agua Residual de la Parroquia Rural de Nono*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Gulson, B., Mizon, K., Korsch, M., & Howarth, D. (1996). Las fuentes no minerales son contribuyentes significativos al plomo en la sangre de algunos niños con exposición baja a moderada al plomo en una comunidad minera mayor. *La Ciencia del Medio Ambiente Total*, 223-230.

- Hédiji, H., Djebali, W., Belkadhi, A., Cabasson, C., Moing, A., & Rolin, D. (2015). Impacto de la exposición a largo plazo al cadmio en el contenido mineral de las plantas de *Solanum lycopersicum*: consecuencias en la producción de fruta. *Revista Sudafricana de Botánica*, 176-181.
- Hernández, Y., Rodríguez, P., Peña, M., Meriño, Y., & Cartaya, O. (2019). Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos tropicales*, 40(3), 1-19.
- Huang, B., Xin, J., Dai, H., Liu, A., Zhou, W., & Yi, Y. (2015). Respuestas morfológicas de raíz de tres cultivares de pimiento picante a la exposición al Cd y sus correlaciones con la acumulación de Cd. *Ciencia Ambiental e Investigación de la contaminación*, 22(2), 1151-1159.
- Jaschek, J. (6 de Octubre de 2016). *Conductividad eléctrica*. Obtenido de Tiloam: <https://www.tiloam.com>
- Jinadasa, N., Collins, D., Holford, P., Milham, P., & Conroy, J. (2016). Reacciones al estrés por cadmio en una variedad de repollo tolerante al cadmio (*Brassica oleracea* L.): ¿Es la tolerancia al cadmio necesariamente deseable en cultivos alimentarios? *Ciencia Ambiental e Investigación de la Contaminación*, 23(6), 5296-5306.
- Kabata, A., & Pendias, H. (2001). *Oligoelementos en suelos y plantas*. Florida: CRC.
- Lavado, R., & Taboada, M. (2002). *Factilidad de valorización agrícola de biosólidos de plantas depuradoras*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Llivichuzca, M. (2016). *Tratamiento de lodos residuales de planta de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la*

disminución de la concentración de huevos de helmintos. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.

López, M., Espinosa, M., Martínez, V., Ramos, C., & Pellón, A. (2003). *Desarrollo y tendencias en la gestión de los residuos sólidos urbanos*. Ciudad de La Habana: Registro CENDA.

Lösch, R. (2004). Planta de respiración mitocondrial bajo la influencia de metales pesados. En R. Lösch, *Estrés de metales pesados en plantas* (págs. 182-200). Saltador.

Madigan, M., Martinko, J., Bender, K., Buckley, D., & Stahl, D. (2004). *Brock. Biología de los microorganismos*. Madrid: Prentice Hall.

MAE (Ministerio del Ambiente). (2015). *Acuerdo Ministerial 097A. Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*. Quito: Lexis.

Mancipe, L., & Triviño, M. (2018). Valoración de lodos de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) como materia prima para la extracción de lípidos en la obtención de biodiésel. *Ion*, *1*(31), 71-79.

Marín, J., Chinga, C., Velásquez, A., González, P., & Zambrano, L. (2015). Tratamiento de Aguas Residuales de una industria procesadora de pescado en reactores anaeróbicos discontinuos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, *25*(1), 27-42.

Martínez, C. (2003). *Abonos Orgánico: Origen, Usos y Aplicación*. Chiapas: Secretaría de Desarrollo Social del Gobierno del Estado de Chiapas.

- Melo, A., Rodríguez, A., & González, J. (2017). Manejo de biosólidos y su posible aplicación al suelo, caso Colombia y Uruguay. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 217-226.
- Metcalf, & Eddy. (2003). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, Vertido y reutilización*. Aravaca: McGraw-Hill.
- Morales, I. (2009). *Aprovechamiento de lodos primarios provenientes del tratamiento de aguas residuales de una industria láctea por medio de la producción de concentrados para animales del sector porcícola y ganadero vacuno*. Bogotá: Universidad de la Salle.
- Morales, P. (2005). *Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas y su aprovechamiento*. México: Universidad de las Américas Puebla.
- Morales, R., & Mariel, P. (2005). *Digestión anaerobia de lodos de plantas de tratamiento de aguas y su aprovechamiento*. Puebla: Universidad de Puebla.
- Mysliwa, B., Prasad, M., & Strzalka, K. (2004). Fotosíntesis en plantas estresadas de metales pesados. En M. Prasad, *Estrés de metales pesados en plantas: de biomoléculas a ecosistemas* (págs. 146-181). Berlin: Springer.
- Negrin, A., & Jiménez, Y. (2012). Evaluación del efecto agronómico del biosólido procedente de una planta de tratamiento por digestión anaerobia de residuales pecuarios en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L). *Cultivos Tropicales*, 33(2), 13-19.
- Oropeza, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 51-58.

- Ortiz, M., Sánchez, E., & Gutiérrez, M. (1999). Efectos de la adición de lodos residuales sobre un suelo agrícola y un cultivo de maíz. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 15(2), 69-77.
- Párraga, A. (2016). *Biosólidos provenientes de aguas residuales de una procesadora de pescado aplicados al cultivo de maíz en la provincia de Manabí*. Recuperado el 2 de Octubre de 2020, de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/11870/1/TESIS%20DE%20MAESTRIA%20P%20C3%81RRAGA%20CEDE%20C3%91O.pdf>
- Pellegrini, A. (2017). *Macronutrientes del suelo*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.
- Peñaherrera, M. (2015). *Estabilización de lodos provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas mediante digestión anaerobia*. Quito: Universidad de las Américas.
- Pérez, M. (2016). *Tratamiento de lodos residuales procedentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados (Pb)*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo, provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada*, 149-155.
- Quinchía, A., & Carmona, D. (2004). Factibilidad de disposición de los biosólidos generados en una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales combinada. *Revista EIA*, 89-108.
- Ramírez, A., & Stella, L. (2005). *Manual de Microbiología*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Red de Especialistas en Agricultura (AGRICULTURERS). (15 de Febrero de 2017). *Valores de referencia de un análisis de suelo*. Obtenido de AGRICULTURERS: <https://agriculturers.com/>

República de Colombia. (10 de Julio de 2014). *Decreto 1287 de 2014*. Obtenido de Sistema Único de Información Normativa: <http://www.suin-juriscal.gov.co/>

Riau, V., De la Rubia, M., & Pérez, M. (2013). *Mejora de la capacidad de deshidratación de los lodos de EDAR mediante digestión anaerobia en fases de temperatura*.

Rodríguez, A. (2006). Informe de Vigilancia Tecnológica. *Nota*, 10-16.

Rojas, R. (2002). Sistema de tratamiento de aguas residuales. *Revista del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente*, 8-16.

Ruiz, A., & Quevedo, L. (2017). *Análisis de lodos provenientes del Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Guatavita*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

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*, 115-120.

SEMARNAT. (2002). *Protección ambiental. Lodos y biosólidos*. México: SEMARNAT.

Separ, J. (2017). *Remoción de metales pesados Cd y Hg en lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria El Espinar – Puno, utilizando*

vermicomposteo. Obtenido de
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5070>

- Sinha, S., Yoon, Y., Amy, G., & Yoon, J. (2004). Determinar la efectividad de los coagulantes convencionales y alternativos a través de esquemas de caracterización efectivos. *Quimiósfera*, 57(9), 1115-1122.
- Terán, A. (2016). *Caracterización de los sólidos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Palandacocha, mediante análisis físico, químico y microbiológico, para proponer un Plan de Manejo Ambiental*. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Toro, 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.
- Torres, E. (2017). Reutilización de aguas y lodos residuales. *QUIVERA*, 11(2), 9-11.
- Torres, P., Escobar, J., Pérez, A., Imery, R., Nates, P., Sánchez, G., . . . Bermúdez, A. (2005). Influencia del material de enmienda en el compostaje de lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales - PTAR. *Revista Ingeniería e Investigación*, 25(2), 53-61.
- Turovskiy, I., & Mathai, P. (2006). *Procesamiento de lodos de aguas residuales*. Canadá: Wiley Interscience A. John Wiley and Sons, INC.
- USEPA. (1993). *Normas para el uso o la eliminación de lodos de depuradores; Reglas finales 40 CFR, partes 257, 403 y 502*. Estados Unidos: Agencia de Protección Ambiental EPA.

- Valencia, A. (2013). *Diseño de un Sistema de Tratamiento para las Aguas Residuales de la cabecera parroquial de San Luis - Provincia de Chimborazo*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Vargas, A., Calderòn , J., Velásquez , D., Castro, M., & Núñez, D. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(2), 315-322.
- Vasquez, J., & Vargas, G. (2018). *Aprovechamiento de los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio de Funza, como insumo de cultivo y mejoramiento del suelo*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Vera, A., Sánchez, E., Ortiz, M., Peña, J., & Ortega, M. (2010). Estabilización de lodos residuales municipales por medio de la técnica de Lombricompostaje. *Revista de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos*.
- Vigueras, S., Zafra, G., García, M., Martínez, M., & Pérez, J. (2013). Efecto del pretratamiento sobre la biodegradabilidad anaerobia y calidad microbiológica de lodos residuales secundarios. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(2), 293-301.

ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de flujo de la planta de tratamiento de aguas residuales El Carmen.

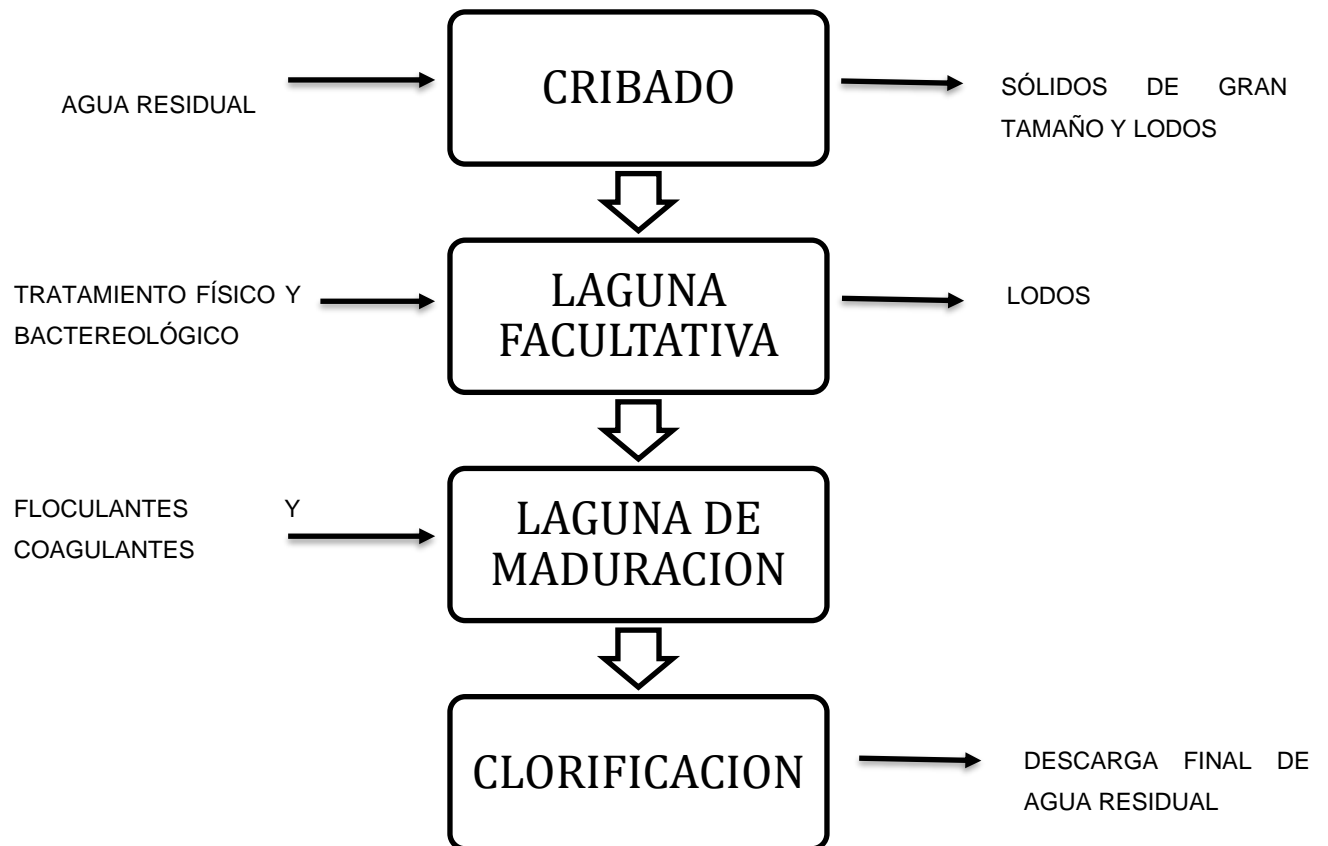


Figura 1.1. Flujo de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón El Carmen.

Fuente: Elaboración propia.

Colaboración: miembros de la PTAR cantón El Carmen.

Anexo 2. Base de datos de los resultados de análisis del laboratorio Universidad Técnica de Manabí.

Anexo 2.A. Base de datos.

Parámetros	U/M	R ₁	R ₂	R ₃	Mean ± SD
pH	-	7,61	7,58	7,55	7,58 ± 0,03
N	mg/kg	1,19	1,27	1,14	1,20 ± 0,65
P	mg/kg	21,00	26,00	28,00	25,00 ± 3,60
K	mg/kg	47,00	54,00	49,00	50,00 ± 3,60
Pb	mg/kg	160,90	137,60	129,40	142,60 ± 16,34
Cd	mg/kg	106,90	75,05	79,05	87,00 ± 17,34

Nota: donde R, repetición

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2.B. Resultados del análisis estadístico descriptivo en el software SPSS versión 21.

ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS					
Parámetros	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.
pH	3	7,55	7,61	7,5800	,03000
N	3	1,14	1,27	1,2000	,06557
P	3	21,00	28,00	25,0000	3,60555
K	3	47,00	54,00	50,0000	3,60555
Pb	3	129,40	160,90	142,6333	16,34207
Cd	3	75,05	106,90	87,0000	17,34957
N válido (según lista)	3				

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Informe de resultados del análisis de mercurio, coliformes fecales y huevos de helmintos; en el laboratorio LABOLAB.

LABOLAB
ANÁLISIS DE ALIMENTOS, AGUAS Y AMBIENTES
INFORME DE RESULTADOS

Orden de trabajo N°199290
Informe N° 199290
Hoja 2 de 2

DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE:

Nombre: Tania Iodo recudal Dayana Solórzano
Dirección: Cacha - Manabí
Muestra: Fecolosa
Descripción de la muestra: Lado
Fecha Elaboración: ---
Fecha Vaciamiento: ---
Fecha de Toma: ---
Lote: ---
Localización: ---
Envase: Fondo de polietileno
Conservación de la muestra: Ambiente

DATOS DEL LABORATORIO:

Fecha de recepción: 20 de diciembre del 2019
Toma de muestra por: Cliente
Fecha de realización del ensayo: 20 - 24 de diciembre del 2019, 3 - 8 de enero del 2020
Fecha de emisión del informe: 9 de enero del 2020
Condiciones ambientales: 21,4°C 63%HR

ANÁLISIS QUÍMICO:

PARÁMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADOS
Mercurio	mg/kg	Standard Methods 3112B Modificado	< 0.0002

Cecilia Lanza
Dra. Cecilia Lanza
GERENTE GENERAL

El presente informe sólo es válido para la muestra analizada tal como fue recibida en LABOLAB.
LABOLAB no es responsable por los datos proporcionados por el cliente.
Este informe no debe reproducirse más que en su totalidad previa autorización escrita de LABOLAB.
Los opiniones e interpretaciones no se encuentran dentro del alcance de acreditación del SAE ANÁLISIS DE ALIMENTOS, AGUAS Y AMBIENTES

Anexo 3.A. Resultado del análisis químico (mercurio).

LABOLAB

ANÁLISIS DE ALIMENTOS, AGUAS Y AFINES
INFORME DE RESULTADOS

Código de trabajo: 20190290
Informe N° 199290
Hoja 2 de 3

DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE

Nombre: Tercer lote residual Dayana Suárez
Dirección: Calcuta - Matabi
Muestra: Lodo residual
Descripción de la muestra: Lodo
Fecha Elaboración: ---
Fecha Vencimiento: ---
Fecha de Toma: ---
Lote: ---
Localización: ---
Envase: Farda de polietileno
Conservación de la muestra: Ambiente

DATOS DEL LABORATORIO

Fecha de recepción: 20 de diciembre del 2019
Toma de muestra por: Cliente
Fecha de realización del ensayo: 20 - 23 de diciembre del 2019
Fecha de emisión del informe: 9 de enero del 2020
Condiciones ambientales: 24,4°C 44%HR

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO:

PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADOS
Recuento de Coliformes fecales	NMP/g	PEEM/LA/97 BAM CAP1	4,5 x 10 ⁴

Cecilia Luzuriaga
Dra. Cecilia Luzuriaga
GERENTE GENERAL

El presente informe solo es válido para la muestra analizada tal como fue recibida en LABOLAB.
LABOLAB no se responsabiliza por los datos proporcionados por el cliente.
Este informe no debe reproducirse más que en su totalidad previa autorización escrita de LABOLAB.
Los operadores e interpretaciones no se encuentran dentro del alcance de acreditación del SAI.

LABOLAB
ANÁLISIS DE ALIMENTOS, AGUAS Y AFINES

INFORME TÉCNICO, FICHA DE ESTABILIDAD, INFORMACIÓN NUTRICIONAL PARA NOTIFICACION SANITARIA

Análisis físico, químico, microbiológico, sensorial de alimentos, aguas, bebidas, materias primas, balanceados, suplementos, pastillas, azúcares, metales pesados y otros.
Poa: Andrade Marín E7 28 y Diego de Almagro Telf.: 3583-221 / 2161-350 / 3238-503 / 3338-534 Cel.: 999 986 9412 / 099 944 2103 / 048 700 1081
E-mail: secretaria@labolab.com.ec / secretaria@labolab.com.ec / analisis@labolab.com.ec / inform@labolab.com.ec

www.labolab.com.ec

Quito - Ecuador

Anexo 3.B. Resultado de análisis microbiológico (coliformes fecales).

LABOLAB

ANÁLISIS DE ALIMENTOS, AGUAS Y AFINES
INFORME DE RESULTADOS

Código de trabajo: 07788781
Informe N° 199290
Hoja 2 de 3

DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE

Nombre: Tasa todo residual Bay en Solórzano
Dirección: Colecta - Manabí
Muestra: Lodo residual
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA: LARVA
Fecha Elaboración: ---
Fecha Vencimiento: ---
FILIAL DE TRABAJO: ---
Lote: ---
Localización: ---
Usuario: Escuela de pediatras
Conservación de la muestra: Ambiente

DATOS DEL LABORATORIO

Fecha de recepción: 30 de diciembre del 2019
Toma de muestra por: Cliente
Fecha de realización del ensayo: 20 - 23 de diciembre del 2019
Fecha de emisión del informe: 1 de enero del 2020
Condiciones ambientales: 21,4°C 65%HR

ANÁLISIS MICROSCÓPICO

PARÁMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADOS
Huevos de helminto	----	Microscópico	Negativo

Carla Amador
Dra. CARLA E. LAMOTHA
GERENTE GENERAL

El presente informe solo es válido para el trabajo solicitado en el formulario de solicitud de LABOLAB.
LABOLAB no se responsabiliza por los datos proporcionados por el cliente.
Este informe es de carácter informativo y no constituye un diagnóstico médico.
Los opiniones e interpretaciones no se encuentran dentro del alcance de acreditación del IAF. ANÁLISIS DE ALIMENTOS, AGUAS Y AFINES

Anexo 4. Análisis fisicoquímicos de suelo degradado en el laboratorio LABOLAB.



Orden de trabajo N°200621
Informe N° 200621
Hoja 1 de 1

DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE

Nombre: Tests lodo residual Dayana Solórzano
Dirección: Caceta, Manabí
Muestra: Lodo residual
Descripción de la muestra: Suelo seco color café
Fecha Elaboración: ---
Fecha Vencimiento: ---
Fecha de Toma: 12 de febrero del 2020
Lote: ---
Localización: Sector Correagua
Envase: Funda de polietileno
Conservación de la muestra: Ambiente

DATOS DEL LABORATORIO

Fecha de recepción: 13 de febrero del 2020
Toma de muestra por: Cliente
Fecha de realización del ensayo: 13 - 27 de febrero del 2020
Fecha de emisión del informe: 27 de febrero del 2020
Condiciones ambientales: 26,0°C 46%HR

PARÁMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADOS
pH (20°C)	---	PEE/LA/10 INEN 526	7,81
Conductividad	µS/cm	NOM-021-RECNAT-2000	4 280
Nitrógeno total	%	Kjeldahl	0,17
Fósforo total	mg/kg	AOAC 986 24	56,40
Cadmio	mg/kg	Standard Methods 3111B Modif	0,34
Plomo	mg/kg	Standard Methods 3111B Modif	20,56
Mercurio	mg/kg	Standard Methods 3111B Modif	4 0,002

Cecilia Luzuriaga
Dra. Cecilia Luzuriaga
GERENTE GENERAL

El presente informe sólo es válido para la muestra analizada tal como fue recibida en LABOLAB.
LABOLAB no se responsabiliza por los datos proporcionados por el cliente.
Este informe no debe reproducirse más que en su totalidad previa autorización escrita de LABOLAB.
Las opiniones e interpretaciones no se encuentran dentro del alcance de acreditación del SAE.



Anexo 5. Base de datos de experimento del Diseño Completamente al Azar

Anexo 5.A. Base de datos

Tratamiento	Crecimiento en plantas (cm)				Media
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	
T ₀	1,5	1,5	1,4	1,7	1,52 ± 0,13
T ₁	1,6	1,5	1,7	1,6	1,60 ± 0,08
T ₂	2,2	2,3	2,7	2,3	2,38 ± 0,22

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5.B. Resultados del análisis estadístico descriptivo en el software SPSS versión 21.

Descriptivos				
	Tratamientos	Estadístico	Error típ.	
Crecimiento de plantas	T ₀	Media	1,5250	,06292
		Varianza	,016	
		Desv. típ.	,12583	
		Mínimo	1,40	
		Máximo	1,70	
	T ₁	Media	1,6000	,04082
		Varianza	,007	
		Desv. típ.	,08165	
		Mínimo	1,50	
		Máximo	1,70	
	T ₂	Media	2,3750	,11087
		Varianza	,049	
		Desv. típ.	,22174	
		Mínimo	2,20	
		Máximo	2,70	

ANEXO 6. Prueba del supuesto de normalidad Shapiro-Wilk y Prueba de homogeneidad de varianzas.

Anexo 6.A. Prueba de normalidad Shapiro-Wilk

Tratamientos	Shapiro-Wilk			
	Estadístico	gl	Sig.	
Crecimiento de plantas	T ₀	,895	4	,406
	T ₁	,945	4	,683
	T ₂	,801	4	,103

Fuente: Elaboración propia (Resultados del Programa SPSS versión 21).

Anexo 6.B. Prueba de homogeneidad de varianzas

Prueba de homogeneidad de varianzas			
Crecimiento de plantas			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
1,718	2	9	,233

Fuente: Elaboración propia (Resultados del Programa SPSS versión 21)

Anexo 7. Resultados de las comparaciones múltiples de media Tukey.

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente: Crecimiento de plantas						
HSD de Tukey						
(I) Tratamientos	(J) Tratamientos	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
T ₀	T ₁	-,07500	,10929	,777	-,3801	,2301
	T ₂	-,85000*	,10929	,000	-1,1551	-,5449
T ₁	T ₀	,07500	,10929	,777	-,2301	,3801
	T ₂	-,77500*	,10929	,000	-1,0801	-,4699
T ₂	T ₀	,85000*	,10929	,000	,5449	1,1551
	T ₁	,77500*	,10929	,000	,4699	1,0801

Nota: La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

Fuente: Elaboración propia (Resultados del Programa SPSS versión 21).