



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL CON MENCIÓN EN DESARROLLO SOSTENIBLE

MODALIDAD: PROYECTO DE DESARROLLO

Título:

“Caracterización y tratamiento de lodos en las lagunas de oxidación de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná, para la gestión sostenible. 2023.”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magíster en Gestión Ambiental con Mención en Desarrollo Sostenible

Autora:

Ing. Ibañez Esquivel Gabriela Maritza

Tutor:

Ing. Ágreda Oña José Luis Mg.

LATACUNGA-ECUADOR

2024

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Caracterización y tratamiento de lodos en las lagunas de oxidación de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná, para la gestión sostenible. 2023.” presentado por Ibañez Esquivel Gabriela Maritza, para optar por el título magíster en Gestión Ambiental con Mención en Desarrollo Sostenible.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, mayo, 2024



.....
Ing. José Luis Ágreda Oña Mg.

C.I. 0401332101

APROBACIÓN TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: Caracterización y tratamiento de lodos en las lagunas de oxidación de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná, para la gestión sostenible. 2023, ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, previo a la obtención de título en Magíster en Gestión Ambiental con Mención en Desarrollo Sostenible; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

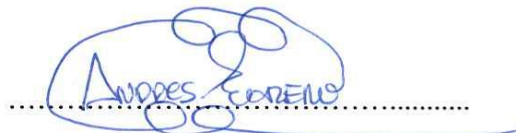
Latacunga, mayo, 2024



Mg. Vladimir Marconi Ortiz Bustamante

C.I. 0502188451

Presidente del tribunal



Mg. Andrés Sebastián Moreno Ávila

C.I. 0503220063

Lector 2



PhD. Manuel Patricio Clavijo Cevallos

C.I. 0501444582

Lector 3

DEDICATORIA

Este logro alcanzado quiero dedicarlo con todo mi amor para mis hijos, Domenica Monserratte y Juan José, quienes son el motor que da sentido a mi vida y me impulsan a ser mejor cada día en todo lo que Dios me permite realizar.

Gabriela Maritza Ibañez Esquivel

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios y mis ángeles en el cielo, que cada día con sus bendiciones me cuidan y protegen.

A mis padres, que siempre están para apoyarme en todas las etapas de mi vida.

A mis hermanos, que con su amor me demuestran que nunca estaré sola.

A mi esposo, le agradezco por haber caminado de mi mano en este logro que lo cumplimos juntos por y para nuestros hijos.

Y por supuesto a la Universidad Técnica de Cotopaxi y sus docentes, de manera especial, al Mg. José Ágreda, Mg. Vladimir Ortiz, Mg. Andrés Moreno y PhD. Patricio Clavijo, quienes contribuyeron con sus conocimientos y enseñanzas para el desarrollo y ejecución de este proyecto.

Para todos mi mayor reconocimiento y gratitud.

Gabriela Maritza Ibañez Esquivel

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación.

Latacunga, mayo, 2024




.....
Ing. Gabriela Maritza Ibañez Esquivel
C.I. 0502876899

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, mayo, 2024


.....
Ing. Gabriela Maritza Ibañez Esquivel
C.I. 0502876899

AVAL DEL PRESIDENTE

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “Caracterización y tratamiento de lodos en las lagunas de oxidación de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná, para la gestión sostenible. 2023”, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los miembros del tribunal en la predefensa.

Latacunga, mayo, 2024



.....
Ing. Vladimir Marconi Ortiz Bustamante Mg.
C.I. 0502188451

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL CON MENCIÓN EN
DESARROLLO SOSTENIBLE

Título: “CARACTERIZACIÓN Y TRATAMIENTO DE LODOS EN LAS LAGUNAS DE OXIDACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL CANTÓN LA MANÁ, PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE. 2023”.

Autora: Gabriela Maritza Ibañez Esquivel

Tutor: Ing. José Luis Ágreda Oña Mg.

RESUMEN

Los lodos provenientes de lagunas de oxidación, en este caso de La Maná se han constituido en la principal preocupación en la gestión integral del tratamiento de aguas residuales debido a su gran producción per cápita. El objetivo del presente estudio fue caracterizar el lodo proveniente de oxidación aeróbica para establecer un proceso de secado idóneo y finalmente la revalorización del mismo a través de biochar. La metodología utilizada para el estudio fue realizar análisis de patógenos, demanda química de oxígeno, cromo, arsénico y mercurio en un sistema de muestreo aleatorio en las diferentes partes de la laguna de oxidación para obtener datos representativos, adicional a aquello se estableció mediante criterios de diseño que la mejor opción de secado del lodo, y finalmente utilizando el lodo como materia orgánica se produjo biochar y se evaluó su eficiencia en la filtración de agua con mercurio como una opción ambientalmente sustentable para revalorizar este desecho del proceso de tratamiento de aguas residuales. Como resultados se estableció que las camas de secado idóneas deben ser cubiertas por las condiciones climáticas de la zona, teniendo una capacidad de 35 lb/año en un metro cuadrado y complementándose con un área útil 1040 m², la marcha analítica demostró que la filtración elimina presencia de metales pesados, en este caso mercurio.

Palabras Clave: biochar, lodos activados, camas de secado, aguas residuales, lagunas de oxidación

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL CON MENCIÓN EN
DESARROLLO SOSTENIBLE**

TITLE: “CHARACTERISATION AND TREATMENT OF SLUDGE IN THE OXIDATION LAGOONS OF THE WASTEWATER TREATMENT PLANT OF CANTÓN LA MANÁ, FOR SUSTAINABLE MANAGEMENT. 2023’.

Author: Gabriela Maritza Ibañez Esquivel

ABSTRACT

Sludge from oxidation ponds, in this case from La Maná, has become the main concern in the integrated management of wastewater treatment due to its high per capita production. The objective of this study was to characterise the sludge from aerobic oxidation in order to establish a suitable drying process and finally the revaluation of the sludge through biochar. The methodology used for the study was to carry out analyses of pathogens, chemical oxygen demand, chromium, arsenic and mercury in a random sampling system in the different parts of the oxidation lagoon to obtain representative data. In addition, design criteria were used to establish the best option for drying the sludge, and finally, using the sludge as organic matter, biochar was produced and its efficiency in the filtration of water with mercury was evaluated as an environmentally sustainable option to revalue this waste from the wastewater treatment process. As results it was established that the ideal drying beds should be covered by the climatic conditions of the area, having a capacity of 35 pounds/year in one square meter and complemented with a useful area of 1040 m², the analytical march showed that the filtration eliminates the presence of heavy metals, in this case mercury.

KEYWORDS: Biochar, Activated sludge, Drying beds, Wastewater, Oxidation ponds.

Alison Paulina Mena Barthelotty, con cédula de identidad número: 0501801252, licenciada en: Ciencias de la Educación especialidad Inglés con número de registro de la SENESCYT: 1027-15-86059706; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del artículo: “**CHARACTERIZACIÓN Y TRATAMIENTO DE LODOS EN LAS LAGUNAS DE OXIDACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL CANTÓN LA MANÁ, PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE. 2023.**” de: Ibañez Esquivel Gabriela Maritza, aspirante a magister en **GESTIÓN AMBIENTAL CON MENCIÓN EN DESARROLLO SOSTENIBLE**

Latacunga, mayo de 2024


Msc. Alison Paulina Mena Barthelotty
C.C: 0501801252



ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	2
PROBLEMÁTICA	3
Antecedentes investigativos	3
OBJETIVOS.....	4
Objetivo General:	4
Objetivos Específicos:.....	4
SISTEMATIZACIÓN DE TAREAS Y OBJETIVOS	5
Preguntas científicas:.....	6
Variables:.....	6
Dependiente.....	6
Independiente	6
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	7
1.1. Gestión sostenible.....	7
1.2. Lagunas de oxidación	9
1.3. Tipos de Lagunas de oxidación:	9
1.3.1. Lagunas aireadas.	9
1.3.2. Lagunas facultativas.	11
1.4. Lodos residuales	11
1.4.1. Sistema de tratamiento de lodos residuales	11
1.5. Lagunas de lodos	12
1.6. Remoción de lodos de lagunas de estabilización.....	13
1.7. Coagulación y floculación.	13

1.8.	Tratamiento de Pirólisis para lodos residuales de lagunas de oxidación	14
1.8.1.	Tipos de pirólisis.....	14
1.9.	Biochar	15
2.	Marco Conceptual.....	16
2.1.	Biochar.....	16
2.2.	Biodegradable	16
2.3.	Biodiversidad	17
2.4.	Biomasa.....	17
2.5.	Biosólidos.....	17
2.6.	Coliformes fecales.....	17
2.7.	CRETIB	17
2.8.	Demanda biológica de oxígeno.....	17
2.9.	Demanda química de oxígeno.....	17
2.10.	Efluentes	18
2.11.	Georreferenciación.....	18
2.12.	Gestión sostenible	18
2.13.	Impacto ambiental.....	18
2.14.	Lodos residuales.....	18
2.15.	Pirólisis.....	18
2.16.	Residuos peligrosos.....	18
2.17.	Marcha analítica.....	18
3.	Marco Legal.....	19
3.1.	Constitución de la República del Ecuador	19
3.2.	Normativa ambiental ecuatoriana	19
3.3.	Acuerdo ministerial 097A	19
3.4.	NTE INEN 2266:2014	19

3.5.	Ordenanzas municipales	20
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
4.1.	Metodología.....	21
4.2.	Enfoque.....	21
4.3.	Materiales y métodos	22
4.4.	Tipo de investigación.....	22
4.4.1.	Actividades de Campo.....	22
4.4.2.	Documental y bibliográfico.....	23
4.5.	Métodos específicos de la especialidad	23
4.6.	Caracterización de muestras	23
4.7.	Potencial Hidrógeno	24
4.8.	Sólidos Totales.....	25
4.9.	Metodología demanda química de oxígeno	25
4.10.	Metales pesados	26
4.11.	Método de cálculo coliformes fecales	26
4.12.	Diseño de la cama de secado de lodo.	27
4.13.	Aspectos biofísicos de La Maná.	27
4.14.	Dimensionamiento	28
4.15.	Requisitos del terreno	31
4.16.	Cubierta de camas de secado	32
4.17.	Acondicionamiento del lodo.....	32
4.18.	Remoción del lodo	32
4.19.	Corrientes laterales	33
4.20.	Criterios de dimensionamiento de las camas de secado	33
4.21.	Disposición final de lodos residuales proveniente de la cama de secado.	36
4.21.1.	Secado de muestra para producción de biochar	36

4.21.2.	Metodología para la evaluación de contaminación del agua por metales pesados	37
4.21.4.	Metodología para la síntesis de Biochar.....	38
4.22.	Método Analítico	40
4.23.	Análisis de datos.	40
4.23.1.	Factores de Estudio	40
4.24.	Metodología de contaminación de agua con metales pesados.....	41
4.24.1.	Muestra de agua contaminada	41
4.25.	Identificación de los cationes del Grupo I	43
4.26.	Ensayo de plomo.....	43
4.27.	Separación del AgCl y de Hg ₂ Cl ₂	43
4.28.	Metodología para análisis de eficacia del tratamiento.....	44
4.29.	Tabla de Frecuencias	45
4.29.1.	Frecuencia Absoluta	45
4.29.2.	Frecuencia Relativa	45
4.30.	Metodología para caracterización de biochar	45
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
5.1.	Caracterización del lodo residual de la laguna de oxidación.....	47
5.1.1.	Ubicación Geográfica de la zona de estudio	47
5.1.2.	Datos climáticos del cantón de La Maná.....	48
5.1.3.	Resultados de laboratorio	49
5.2.	Resultados del diseño de una cama de secado de cables	50
5.2.1.	Porcentaje de humedad.....	55
5.3.	Revalorización de los lodos residuales mediante la síntesis con biochar.	56
5.3.1.	. Porcentaje de cenizas.....	59
5.4.	Evaluación de eficiencia del biochar a través de contaminación de agua con metales pesados.....	60

5.4.1.	Marcha analítica de metales pesados del Grupo I- Mercurio (Hg)	60
5.5.	Análisis de eficacia de la remoción de mercurio	60
5.5.1.	Carga óptima	60
5.5.2.	Tabla de frecuencias	62
5.6.	Caracterización de biochar	64
6.	CONCLUSIONES	67
7.	RECOMENDACIONES.....	68
8.	BIBLIOGRAFIA	69
9.	ANEXOS	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sistematización de los objetivos y actividades	5
Tabla 2 Descripción de los tipos de pirólisis según las condiciones de operación	14
Tabla 3 Actividades planteadas para el desarrollo de la investigación	22
Tabla 4. Datos del desempeño del sistema de deshidratación.	31
Tabla 5. Estándares recomendados para el área de la cama de deshidratación.....	32
Tabla 6. Criterios per cápita para dimensionar camas de secado.....	33
Tabla 7. Resumen de criterios de diseño camas de secado medido en pies cuadrados por persona.....	36
Tabla 8. Tipos de pirólisis aplicadas a la investigación	38
Tabla 9. Factores de estudio.....	41
Tabla 10. Análisis de laboratorio	49
Tabla 11. Porcentaje de humedad de las muestras	56
Tabla 12. Pirólisis realizadas para obtención de biochar	56
Tabla 13. Datos de biochar obtenido	57
Tabla 14. Porcentaje de cenizas del biochar	59
Tabla 15. Proceso cualitativo de remoción en función de la carga óptima.....	61
Tabla 16. Tabla de frecuencias para % de eficacia de remoción.	62
Tabla 17. Caracterización físico- química del biochar a 350°C.	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de la concentración de sólidos en el agua de drenaje.....	29
Figura 2. Tiempo de drenaje en función del cambio del grosor de la capa de lodo.	29
Figura 3. Contenido de humedad del lodo en función del espesor de la capa.	30
Figura 4. Mapa de ubicación.....	47
Figura 5. Probabilidad diaria de precipitación la maná.....	48
Figura 6. Energía solar de onda corta incidente diario promedio en la maná.....	49
Figura 7. Sistema de secado de lodos.....	53
Figura 8. Gráfica estadística del % de eficacia de remoción de mercurio del agua	64

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales que se realiza genera dos tipos de subproductos que son: el agua tratada y los lodos residuales. Por lo que dichos subproductos deberían obtener algún tipo de tratamiento adicional para disminuir su contaminación al medio ambiente.

Las lagunas estabilizadas han sido ampliamente utilizadas para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en ciudades pequeñas con grandes extensiones de terreno, debido a sus características favorables como buen rendimiento, bajo costo, bajo mantenimiento y sostenibilidad. Entre los distintos tipos de lagunas estabilizadas, las más comunes son las anaeróbicas, facultativas, maduras y aireadas. La configuración más común de sistemas lagunares consiste en lagunas anaeróbicas y facultativas y también puede incluir lagunas maduras dependiendo de los requisitos de tratamiento requeridos.

En la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná no se dispone de una disposición final adecuada de los lodos residuales generados por el proceso de tratamiento de las aguas residuales, por lo que es importante para esta investigación plantear una línea de solución.

Cabe destacar que la gestión de este tipo de residuos no sólo tiene beneficios ambientales, sino también administrativos y económicos. Si estos lodos se pueden utilizar como fertilizante según los ingredientes, sin el floculante utilizado afecta su uso en terrenos agrícolas. Teniendo en cuenta todo esto, la recuperación de estos residuos es importante tanto para el reciclaje y la optimización de procesos como para su uso en otras aplicaciones prácticas.

Teniendo en consideración la problemática que se presenta los lodos residuales se plantea como solución el tratamiento de los mismos por un sistema de pirólisis para deshidratarlos y de ser factible obtener biochar para utilizarlo como insumo para los filtros de tratamiento de efluentes y suelos contaminados.

JUSTIFICACIÓN

Los lodos residuales son sólidos remanentes del proceso de tratamiento de las aguas residuales municipales, que son removidos para que el agua pierda sus propiedades contaminantes y pueda volver a utilizarse. Los lodos residuales también deben ser tratados para eliminarlos o transformarlos, y para que sus elementos contaminantes no representen un riesgo a la salud o al ambiente. Por ello, es importante que las plantas de tratamiento de aguas residuales no solo contemplen cómo tratar el agua sino también deben explicar qué hacer con los lodos residuales generados.

Cabe la pena señalar que este tipo de gestión de residuos proporciona no sólo beneficios ambientales, sino también administrativos y económicos. Si estos lodos se pudieran utilizar como fertilizante por su composición, no utilizar floculantes afectaría su uso en campos agrícolas. En vista de todo esto, la recuperación de estos residuos es importante para el reciclaje y la optimización y utilización de procesos en otras aplicaciones prácticas.

El manejo adecuado de lodos residuales radica en que estos no son considerados un tema importante en las políticas públicas del manejo de residuos y, por lo tanto, no se controlan ni se tratan adecuadamente, convirtiéndose en un problema de contaminación ambiental y de salud pública de las ciudades.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales suelen encontrarse instaladas cerca de zonas habitadas, por lo que la percepción social sobre el manejo y aprovechamiento de los lodos residuales es importante, permitiendo una gestión sostenible.

En la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná no se cuenta con los análisis ni metodología de tratamiento para los lodos residuales que se generan.

Considerando la problemática que se presenta con los lodos residuales de la planta de tratamiento del cantón La Maná, es necesario realizar una caracterización de los lodos provenientes de la laguna de oxidación fijando una línea de tratamiento

adecuada para su disposición, realizando un diseño de un sistema de tratamiento de lodos que permita obtener un lodo deshidratado con una eficacia del 80%.

Por lo expuesto se plantea establecer una metodología de tratamiento de los lodos residuales con la generación de biochar cómo insumo para los filtros de tratamiento de efluentes y suelos contaminados.

PROBLEMÁTICA

La planta de tratamiento de aguas residuales del Cantón La Maná debido a su diseño presenta condicionantes que limitan el manejo adecuado de los lodos generados en el proceso de tratamiento de aguas residuales; por este motivo en la actualidad existen problemas para la disposición, manejo y tratamiento de los lodos generados, lo que permite la producción de malos olores, problemas en la calidad del efluente y en la reducción de la eficiencia bacteriológica para los cuales fueron diseñadas las lagunas de oxidación del cantón La Maná.

Según las características que presentan los lodos tales como su origen, su edad, tipo de proceso del cual provienen y de la fuente original de los mismos, se emplean procesos para su tratamiento que sirven para mejorar sus condiciones sanitarias y de esta manera poder reducir los impactos negativos al medio ambiente.

Estos lodos son de interés para esta investigación, ya que deben ser tratados antes de que se les dé una disposición final, debido a que muchos de ellos pueden contener microorganismos patógenos o sustancias tóxicas, mismos que por sus características llevan procesos de putrefacción altos y estos pueden atraer vectores que son un problema para el ambiente y para la salud pública.

¿Los lodos que se generan en las lagunas de oxidación de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná provocan impactos ambientales negativos?

Antecedentes investigativos

Para iniciar con la investigación se debe realizar un análisis previo de la situación actual con respecto a los lodos residuales. Según (Oropeza, 2016):

El tratamiento de las aguas residuales, tanto municipales como industriales, tiene como objetivo remover los contaminantes presentes con el fin de hacerlas

aptas para otros usos o bien para evitar daños al ambiente. Sin embargo, los procesos traen como consecuencia la formación de lodos residuales, subproductos difíciles de tratar y que implican un costo extra en su manejo y disposición. El lodo, resultado de los procesos de tratamiento de aguas residuales debe someterse a un análisis para determinar sus características corrosivas, de reactividad, explosividad, toxicidad y biológico- infecciosas (análisis CRETIB), lo que permitirá precisar si el lodo es considerado como un residuo peligroso o como un residuo no peligroso y en base a este resultado plantear las alternativas para el manejo y disposición del mismo.

Las investigaciones relacionadas con el manejo de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales aparecen a comienzos del siglo XX con el surgimiento de los procesos para tratar las aguas servidas y la consecuente generación de grandes volúmenes de lodo.

En la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná no se dispone de antecedentes investigativos relacionados al tratamiento de lodos residuales, por lo que es importante establecer una metodología para su adecuada disposición.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Establecer un sistema de tratamiento de lodos provenientes de las aguas residuales de la laguna de oxidación del cantón La Maná para integrar estrategias de disposición final sostenibles.

Objetivos Específicos:

- Caracterizar los lodos mediante análisis físicos químicos para establecer la naturaleza del residuo.
- Determinar una línea de tratamiento para el lodo residual en base a su caracterización y adecuar el mejor proceso de remediación que se ajuste en las condiciones del cantón La Maná.

- Establecer una metodología de tratamiento de los lodos residuales para generación de biochar cómo insumo para los filtros de tratamiento de efluentes y suelos contaminados.

SISTEMATIZACIÓN DE TAREAS Y OBJETIVOS

En la tabla 1, se relaciona las actividades principales con la metodología para dar resultado y solvencia a los objetivos planteados en el trabajo de titulación.

Tabla 1 Sistematización de los objetivos y actividades

Objetivos	Actividades	Metodología	Resultados
Caracterizar los lodos mediante análisis físicos químicos para establecer la naturaleza del residuo.	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación del área de estudio. • Recolección de muestras de lodo. • Estimación media de la cantidad de lodo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Georreferenciación del área de estudio. • Planificación de muestreo mediante un sistema de recolección establecido. • Monitoreo programado para determinar la cantidad de lodo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mapa del sitio de estudio. • Caracterización CRETIB de los lodos provenientes de la laguna de oxidación. • Estimación media de la cantidad de lodo mensual.
Determinar una línea de tratamiento para el lodo residual en base a su caracterización y adecuar el mejor proceso de remediación que se ajuste en las condiciones del cantón La Maná.	<ul style="list-style-type: none"> • Secado de lodo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Recolección de muestras para tratamiento. • Procesos de diseño. • Establecer cual tratamiento es el más adecuado 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño de un sistema de tratamiento.

<p>Establecer una metodología de tratamiento de los lodos residuales para generación de biochar cómo insumo para los filtros de tratamiento de efluentes y suelos contaminados.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de biochar con lodos residuales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de proceso de pirólisis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Metodología de tratamiento de los lodos residuales para generación de biochar.
---	--	---	--

Nota: Elaborado por la investigadora (2024).

Preguntas científicas:

- ¿El diseño de un sistema de tratamiento de lodos residuales permitirá obtener un lodo adecuado para la producción de biochar?
- ¿El tratamiento de lodos residuales provenientes de las lagunas de oxidación del cantón La Maná permitirá disminuir los niveles de contaminación en la comunidad?

Variables:

Son los valores que centralizaron el estudio de la presente investigación, generando los comandos esenciales para realizar los procedimientos pertinentes a la indagación correspondiente.

Dependiente

Caracterización y tratamiento de lodos

Independiente

Gestión sostenible del cantón La Maná.

CAPÍTULO I.

1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1. Gestión sostenible

Según Cárdenas et al. (2019) La gestión sostenible es un decálogo de principios y valores humanos, éticos y medioambientales, desde la perspectiva del bienestar, la calidad de vida y la excelencia, que tiene por objeto dotar a las organizaciones y a las instituciones, de instrumentos y herramientas de gestión para el desarrollo sostenible, asegurando así la dignidad humana y fortaleciendo el tejido económico y social del planeta.

Según Chong (2011) Desde el inicio, la Organización de la Naciones Unidas (ONU) asumió el compromiso de liderar el desarrollo sostenible la humanidad de manera continua; se debe abogar por un estilo de desarrollo que sea ambientalmente sostenible en el acceso y uso de recursos naturales y en la preservación de la biodiversidad; que sea socialmente sostenible en la reducción de la pobreza y de las desigualdades sociales que promueva la justicia y la equidad; que sea culturalmente sostenible en la conservación del sistema de valores, prácticas y símbolos de identidad de los distintos pueblos, al tiempo que favorezca la interculturalidad; que sea políticamente sostenible al profundizar en la democracia y garantizar el acceso y la participación de todos en la toma de decisiones públicas; y que sea económicamente sostenible, alumbrando nuevos modelos de producción y consumo, respetuosos con los ecosistemas y la biosfera

El gobierno ecuatoriano en septiembre del 2015, conjuntamente con otros 193 países, adoptaron un compromiso histórico al aprobar los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que fueron consensuados después de más de 3 años de negociaciones y con la participación de todos los países miembros de la ONU, ONG y otros agentes.

Para el año 2000 se adoptaron 8 Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) que fueron la promesa para defender los principios de dignidad humana, igualdad y equidad, y liberar al mundo de la pobreza extrema. El año 2015 era la fecha fijada para el cumplimiento de estos ODM, sin embargo, no se lograron todas las metas establecidas. Por tal motivo, los Estados renovaron su compromiso con el desarrollo social y la lucha contra la pobreza con la nueva agenda que traza una hoja de ruta para los próximos 15 años, bajo el nombre: Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

Es importante destacar que, la apuesta de este compromiso será conseguir el desarrollo sostenible en el ámbito económico, social y ambiental de forma equilibrada e integrada, a través de 17 objetivos con 169 metas. Entre los nuevos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que hacen relevancia a la presente investigación se resaltan los siguientes:

- **Hambre Cero:** Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible. La nutrición eficiente provoca el 45% de las muertes de menores de 5 años.
- **Agua y Saneamiento:** Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todas las personas en el mundo. 884 millones de personas en todo el mundo todavía no tienen acceso a agua potable.
- **Energía Asequible y No Contaminante:** Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. Unas de cada cinco personas no tienen acceso a la electricidad moderna.
- **Industria, Innovación e Infraestructura:** Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar

la innovación para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, con especial hincapié en el acceso equitativo y asequible para todos.

- Ciudades y Comunidades sostenibles: Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. (pp. 670-699)

Los objetivos descritos anteriormente, nos hacen reflexionar que, para lograrlos de manera efectiva, el Estado ecuatoriano, requiere una verdadera inserción de la sostenibilidad, en el ámbito social, ambiental y económico.

La gestión sostenible debe ser considerada como un proceso que se implementa en cada proyecto u obra para contribuir en el desarrollo equilibrado, específicamente en el cantón La Maná.

1.2. Lagunas de oxidación

El Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN, 1992) indica que: Se entiende por lagunas de estabilización a estanques construidos de tierra, de profundidad reducida (< 5 m), diseñados para el tratamiento de aguas residuales, por medio de la interacción de la biomasa (algas, bacterias, protozoarios, etc.), la materia orgánica del desecho y otros procesos naturales (sub modelos hidráulicos y factores físicos, químicos y meteorológicos). La finalidad de este proceso es de entregar un efluente de características múltiples establecidas (DBO, DQO, OD, SS, algas, nutrientes, parásitos, enterobacterias, coliformes, etc.).

1.3. Tipos de Lagunas de oxidación:

1.3.1. Lagunas aireadas.

Las lagunas aireadas son generalmente empleadas como primera unidad de un sistema, en casos en donde la disponibilidad de terreno es limitada o para el tratamiento de desechos domésticos con altas concentraciones y desechos industriales. Estas lagunas son muy empleadas en climas fríos.

Se distinguen los siguientes tipos de lagunas aireadas:

- Lagunas aireadas de mezcla completa: las mismas que mantienen la biomasa en suspensión, con una alta densidad de energía instalada (>15 W/m³). Son consideradas como un proceso incipiente de lodos activados sin separación

y recirculación de lodos y la presencia de algas no es aparente. En este tipo de lagunas la profundidad varía entre 3 m y 5 m y el período de retención entre 2 d y 7 d. Para estas unidades es recomendable el uso de aireadores de baja velocidad de rotación. Este es el único caso de laguna airada para el cual existe una metodología de dimensionamiento. El uso de lagunas airadas en serie no es recomendado.

- Lagunas airadas facultativas: las cuales mantienen la biomasa en suspensión parcial, con una densidad de energía instalada menor que las anteriores (de 1 W/m^3 a 4 W/m^3 , recomendable 2 W/m^3). Este tipo de laguna presenta signos de acumulación de lodos, observándose frecuentemente la aparición de burbujas de gas de gran tamaño en la superficie, por efecto de la digestión de lodos en el fondo. En este tipo de lagunas los períodos de retención varían entre 7 d y 20 d (variación promedio entre 10 d y 15 d) y las profundidades son por lo menos 1,5 m. En climas cálidos y con buena insolación se observa un apreciable crecimiento de algas en la superficie de la laguna.
- Laguna facultativa con agitación mecánica: la cual es exclusivamente aplicable a unidades sobrecargadas del tipo facultativo en climas cálidos. Tienen una baja densidad de energía instalada (del orden de $0,1 \text{ W/m}^3$), la misma que sirve para vencer los efectos adversos de la estratificación termal, en ausencia del viento. Las condiciones de diseño en estas unidades son las de lagunas facultativas. El uso de los aireadores puede ser intermitente.
- Lagunas de oxidación airadas: empleadas generalmente en climas con cuatro estaciones. La fuente de oxígeno es principalmente la fotosíntesis y en el invierno es suplementada por aireación con difusión de aire comprimido en el fondo. Como el diseño se efectúa para condiciones de invierno, las cargas de diseño son generalmente bajas (del orden de $50 \text{ kg DBO}/(\text{ha}\cdot\text{d})$), las condiciones de diseño en estas unidades son las de lagunas facultativas, con una profundidad reducida del orden de 1 m a 1,5 m.

Los dos primeros tipos de lagunas airadas antes mencionados, deben ser seguidas de lagunas facultativas diseñadas con la finalidad de tratar el efluente de la laguna primaria, asimilando una gran cantidad de sólidos en suspensión.

1.3.2. *Lagunas facultativas.*

Según la definición de este tipo de lagunas, sus características principales son el comensalismo entre algas y bacterias en el estrato superior y la descomposición anaeróbica de los sólidos sedimentados en el fondo. Por consiguiente, su ubicación como unidad de tratamiento en un sistema de lagunas puede ser:

- Como laguna primaria única (caso de climas fríos en los cuales la carga de diseño es tan baja que permite una adecuada remoción de bacterias) o seguida de una laguna secundaria y/o terciaria (normalmente referida como laguna de maduración); y,
- Como una unidad secundaria después de lagunas anaeróbicas o aireadas, para cumplir el propósito de procesar sus efluentes a un grado mayor.

Los criterios de diseño en los que se refiere a temperaturas y mortalidad de bacterias se deben determinar en forma experimental. (pp. 235-238).

Revisando el tipo de lagunas de oxidación que se encuentran, se identifica que en la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná se dispone de una laguna aireada del tipo, lagunas aireadas facultativas.

1.4. Lodos residuales

Según Medina et al. (2020), “Los lodos residuales son agregados constituidos por microorganismos, nutrientes y sustancias poliméricas extracelulares producto del tratamiento de aguas residuales” (p. 578).

Para los autores Montiel et al. (2016), “son los residuos sólidos remanentes del proceso de tratamiento de aguas de desecho, que están compuestos por materia orgánica residual no descompuesta, microorganismos, compuestos no biodegradables y potencialmente tóxicos y sales inocuas y/o potencialmente tóxicas que se han removido durante el tratamiento” (p. 2).

1.4.1. *Sistema de tratamiento de lodos residuales*

Según INEN (1992) para proceder al diseño de facilidades de tratamiento de lodos, se realizará un inventario de producción de lodos en los procesos de tratamiento de la planta, debiéndose tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El inventario se realizará para condiciones de caudales y concentraciones medias y temperaturas correspondientes al mes más caliente.
- Para lodos primarios se determinará el volumen y masa de sólidos en suspensión totales y volátiles teniendo en consideración los porcentajes de remoción, contenido de sólidos y densidades.
- Para procesos de tratamiento biológico como los de lodos activados y filtros biológicos se determinará la masa de lodos biológicos producidos por síntesis de la materia orgánica menos la cantidad destruida por respiración endógena.
- En los procesos de lodos activados con descarga de lodos directamente desde el tanque de aeración, se determinará el volumen de lodo producido a partir del parámetro de la edad de lodos. En este caso la concentración del lodo de exceso es la misma que la del tanque de aeración.
- En los procesos de lodos activados con descarga del lodo de exceso antes del tanque de aeración, se determinará el volumen de lodo producido a partir de la concentración del lodo recirculado del fondo del sedimentador secundario.

1.5. Lagunas de lodos

Las lagunas de lodos pueden emplearse como digestores o para almacenamiento. Su profundidad generalmente varía entre 3 m y 5 m y su superficie se determinará con el uso de una carga superficial entre 0,1 kg SSV/(m³ .d) y 0,25 kg SSV/(m² .d). Para evitar la presencia de malos olores se deben usar cargas hacia el lado bajo.

Las facilidades de lagunas de lodos deben diseñarse teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los diques y fondo de estas lagunas son preferiblemente diseñadas con recubrimiento de losetas de hormigón.
- Los taludes de los diques pueden ser de mayor pendiente que para lagunas de estabilización. El fondo de las mismas debe tener pendiente hacia una tolva central.

- Se deben incluir facilidades para remoción del lodo digerido en el fondo y del sobre nadante, en por lo menos tres niveles superiores.
- En forma similar que para lagunas de estabilización se deberán incluir facilidades para limpieza, circulación de vehículos, rampas de acceso, etc.

1.6. Remoción de lodos de lagunas de estabilización.

Para remoción de lodos de lagunas primarias, se procederá al drenado mediante el uso de sifones. Las lagunas deberán drenarse hasta alcanzar el mínimo nivel, en estas condiciones el lodo quedará expuesto al ambiente. La operación de secado debe escogerse en la estación seca y tiene una duración no mayor a dos meses. Durante esta operación el agua residual debe idealmente tratarse sobrecargando una batería paralela.

El lodo del fondo debe dejarse secar a la intemperie. El mecanismo de secado es exclusivamente por evaporación y su duración depende de las condiciones ambientales, principalmente de la temperatura. En condiciones de climas cálidos y templados, el lodo de una laguna se seca en períodos entre 4 y 6 semanas, formando grietas en forma similar a la de lechos de secado.

Una vez que se ha logrado un contenido de sólidos de alrededor del 35%, el lodo es manejable y puede ser removido en forma manual o con la ayuda de equipo pesado. Para instalaciones grandes es recomendable la remoción de lodo con cargadores frontales y volquetas.

El lodo seco debe almacenarse en pilas de hasta 2 m de altura previo a su uso como abono. Los lodos secos tienen gran demanda como abono y solamente en el caso de no ser factible el uso agrícola, se debe proceder a su disposición idealmente en el relleno sanitario de la ciudad. (pp. 258-262).

1.7. Coagulación y floculación.

Según Chávez (2017) La coagulación y la floculación son dos procesos que tienen como finalidad la aglutinación de partículas en suspensión para la formación de pequeñas masas llamadas flóculos.

Estos procesos se utilizan en conjunto con otros tratamientos de aguas residuales, entre ellos el sistema DAF, centrifugación, sedimentación, entre otros.

De forma más explicativa, la coagulación mediante el uso de aditivos químicos (coagulantes), hacen posible la neutralización de las partículas coloidales en el efluente. Por otro lado, la floculación se encarga de la aglomeración de las partículas pequeñas para formar los flóculos, convirtiéndose en partículas sólidas de mayor tamaño que se sedimentan más rápido. (p.547) (Chávez, 2017)

1.8. Tratamiento de Pirólisis para lodos residuales de lagunas de oxidación

Según Barzola y Reyes (2019) plantean que el pirólisis es un proceso termoquímico mediante el cual se degrada la biomasa, en suministro limitado de oxígeno o su ausencia total. Durante este proceso, las moléculas complejas de biomasa se descomponen en moléculas más simples y más pequeñas, específicamente de bio-oil, gas pirolítico y bio-carbón (productos). (p.6).

Para Blagojevic (2017) La proporción de los productos del proceso de pirólisis depende de varios factores, entre ellos la composición química de los lodos, temperatura del proceso, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia. (p.4)

1.8.1. Tipos de pirólisis.

Se detallan los tipos de pirólisis: (Chivatá & Duarte, 2018)

Tabla 2. Descripción de los tipos de pirólisis según las condiciones de operación

Proceso de pirólisis	de Tiempo de resistencia	de Tasa de calentamiento	de Temperatura final (°C)	Productos
Carbonización	Días	Muy baja	400	Carbón
Convencional	5-30 minutos	Baja	700	Ceniza, aceite pirolítico, gas
Rápida	< 2 segundos	Muy alta	500	Aceite pirolítico

Flash	< 1 segundos	Alta	<650	Aceite pirolítico, químicos, gas
Ultra-rápida	< 0,5 segundos	Muy alta	1000	Químicos, gas
Al vacío	2-30 segundos	Media	400	Aceite pirolítico
Hidropirólisis	< 10 segundos	Alta	<500	Aceite pirolítico
Metano Pirólisis	- < 10 segundos	Alta	>700	Químicos

Nota: Chivata y Duarte (2018)

1.9. Biochar

Según González (2021) El biochar es un material rico en carbono que se obtiene de la descomposición termoquímica de residuos orgánicos a temperaturas que generalmente oscilan entre 300 y 700 °C y en ausencia de oxígeno (pirólisis). El proceso de pirólisis estabiliza el carbono existente en la materia orgánica en una forma más resistente a la descomposición química y biológica, por lo que al ser incorporado al suelo no se degrada y el carbono no es emitido a la atmósfera como ocurre con la descomposición de materia orgánica sin pirolizar. Las características del biochar le confieren la capacidad potencial de mejorar las propiedades físico-químicas del suelo y aumentar la productividad de los cultivos, contribuyendo además al secuestro de C, lo que convierte al biochar en una herramienta para luchar contra el cambio climático.

El biochar puede utilizarse para una amplia gama de aplicaciones, dentro de las cuales se destacan: como agente para mejorar el suelo, para mejorar la eficiencia del uso de los recursos, remediar y/o proteger contra la contaminación ambiental en

particular, y como una vía para la mitigación de gases de efecto invernadero. (p.24)

Mencionan Verheijen et al (2010), Es un material orgánico producido mediante pirólisis de compuestos a base de C. materias primas (biomasa) y se describe mejor como un “acondicionador del suelo”. A pesar de Se han propuesto muchos materiales diferentes como materia prima de biomasa para biocarbón (incluyendo madera, residuos de cultivos y estiércol), la idoneidad de cada uno La materia prima para dicha aplicación depende de una serie de sustancias químicas, factores físicos, ambientales, así como económicos y logísticos.

1.9.1. Estudio y origen del biochar

Escalante et al. (2016) indican que: El biochar (o biocarbón) es un derivado carbonado estable producido a partir de biomasa vegetal y/o animal, para su aplicación en distintos procesos, dentro de los que se destaca la agricultura sostenible. El mismo se produce bajo condiciones térmicas reductoras. El biochar debe poseer una calidad bien definida y controlada, pudiendo aplicarse para mejorar las propiedades físicas, químicas y/o la actividad biológica del suelo. Para su producción se pueden emplear una amplia variedad de materias primas orgánicas, sujetas a requisitos de sostenibilidad, como que no compitan con la cadena de alimentación humana o la nutrición animal y vegetal; y que procedan de una fuente sostenible para el medio ambiente y la protección del clima. (p.34).

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. Biochar

Según Esalente et al. (2016), “El biochar es el producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos (biomasa) con escaso o limitado suministro de oxígeno” (p. 369).

2.2. Biodegradable

Producto o sustancia que puede descomponerse en elementos químicos naturales por la acción de agentes biológicos, como el sol, el agua, las bacterias, las plantas o los animales.

2.3. Biodiversidad

Abarca a la diversidad de especies, de plantas, de animales, hongos y microorganismos que viven en un espacio determinado, a su variabilidad genética, a los ecosistemas de los cuales forman parte estas especies y a los paisajes o regiones en donde se ubican los ecosistemas.

2.4. Biomasa

Materia orgánica fijada por la fotosíntesis y la materia derivada de las transformaciones naturales o artificiales de dichos compuestos orgánicos.

2.5. Biosólidos

Son los residuos orgánicos que resultan del tratamiento de aguas residuales de origen comercial, industrial y municipal.

2.6. Coliformes fecales

Las coliformes son una familia de bacterias que se encuentran comúnmente en las plantas, el suelo y los animales, incluyendo los humanos.

2.7. CRETIB

El acrónimo CRETIB se deriva de las palabras: corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable, biológico-infeccioso; y esta es la clasificación de los residuos peligrosos.

2.8. Demanda biológica de oxígeno

La DBO es la demanda bioquímica de oxígeno que tiene un agua. Es la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias (aeróbicas o anaeróbicas), hongos y plancton, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra.

2.9. Demanda química de oxígeno

La DQO es la demanda química de oxígeno del agua. Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en CO₂ y H₂O. Cuanto mayor es la DQO, más contaminada está el agua.

2.10. Efluentes

El efluente es la salida de agua desde un cuerpo natural de agua o desde una estructura fabricada por el ser humano. Los efluentes, desde el punto de vista humano, se suelen considerar como contaminación.

2.11. Georreferenciación

La Georreferenciación se la maneja en diferentes aplicaciones, aunque uno de los conceptos en que se apoyan como el GPS (Sistema de posicionamiento global), esta nos proporciona como resultado la geolocalización.

2.12. Gestión sostenible

La gestión sostenible es un decálogo de valores humanos, éticos y medioambientales, desde la perspectiva de la calidad y la excelencia, que tiene por objeto dotar a las sociedades de un instrumento de referencia, para el desarrollo sostenible de las empresas, las instituciones y las comunidades, asegurando así la competitividad y fortaleciendo el tejido económico y social del planeta.

2.13. Impacto ambiental

Se define como impacto ambiental a la modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.

2.14. Lodos residuales

Los lodos residuales consisten en una mezcla de agua y sólidos separada de agua residual, como resultado de procesos naturales o artificiales.

2.15. Pirólisis

La pirolisis es una degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, por lo que dichas sustancias se descomponen mediante calor, sin que se produzcan las reacciones de combustión.

2.16. Residuos peligrosos

Son aquellos residuos que por sus componentes afectan a los seres vivos y a su entorno.

2.17. Marcha analítica

“En el campo de la química analítica, la ‘marcha analítica’ describe una serie de técnicas sistemáticas diseñadas para la separación y detección de sustancias

químicas. Estas técnicas categorizan las sustancias basándose en sus respuestas únicas a diferentes solventes o reactivos, enfocándose principalmente en iones inorgánicos, pero ocasionalmente incluyendo iones orgánicos con comportamientos análogos.”

3. MARCO LEGAL

3.1. Constitución de la República del Ecuador

El estudio se basa desde la carta magna en el siguiente tenor “Título II Derechos, Capítulo segundo: Derechos del buen vivir; Sección primera: agua y alimentación, Sección segunda: ambiente sano, Sección séptima: salud.

Título VI Régimen del buen vivir, Capítulo segundo: Biodiversidad y recursos naturales; Sección primera: Naturaleza y ambiente, Sección segunda: biodiversidad, Sección cuarta: recursos naturales, Sección quinta: suelo, Sección sexta: agua, Sección séptima: biósfera, ecología urbana y energías alternativas.”(Constitución Ecuador, 2008).

3.2. Normativa ambiental ecuatoriana

Los instrumentos jurídicos a revisar son: Libro VI del texto unificado de legislación secundaria del ministerio del ambiente: Anexo 1, Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua.

Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN: Normas para el estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes; Décima Parte: Sistema de tratamiento de aguas residuales.

Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN: Calidad del agua. Muestreo. Parte 13: Guía para el muestreo de lodos (ISO 5667-13:2011, IDT).

3.3. Acuerdo ministerial 097A

El Acuerdo ministerial 97A anexo 1 y 2, habla sobre la calidad del suelo y agua Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua. Que se completa con el Acuerdo ministerial 021: Procedimiento de gestión integral en consumo y producción sustentable a nivel nacional.

3.4. NTE INEN 2266:2014

Es la normativa técnica ecuatoriana que rige para el manejo, transporte,

almacenamiento de sustancias peligrosas, esta normativa se utiliza para caracterizar los lodos en cuanto a peligrosidad tóxica según la clasificación 6 de la NTE 2266.

3.5. Ordenanzas municipales

Ordenanza que establece el plan de desarrollo y ordenamiento territorial; uso, ocupación y gestión del suelo; Normas de arquitectura y urbanismo; y, para regular la preservación del territorio del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón La Maná. Título II: Componente estructurante; Capítulo I: Del suelo y tratamiento del suelo.

CAPÍTULO II.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Metodología

Considerando los objetivos planteados a desarrollarse se determina como una investigación cualitativa que nos permitirá obtener un diseño para el tratamiento de los lodos residuales de las lagunas de oxidación de la planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná, mediante la observación y análisis descriptivo de la información obtenida.

4.2. Enfoque

El presente trabajo tiene un enfoque cualitativo desde su concepción con la única orientación de presentar mejoras en la disposición final de lodos provenientes de una PTAR, entendiéndose que es un residuo muy difícil de manejar en los nuevos tiempos. Además, el enfoque cualitativo en el estudio de los lodos de aguas residuales se centra en la comprensión detallada de las características y propiedades de los lodos, así como de los procesos biológicos y químicos que ocurren durante su tratamiento. Este enfoque permite una evaluación más profunda de los factores que pueden influir en la eficacia del tratamiento de los lodos, como la composición de los microorganismos presentes, las condiciones ambientales y las interacciones entre diferentes componentes del sistema de tratamiento (Smith, J., & Johnson, L., 2024).

4.3. Materiales y métodos

Los materiales utilizados fueron equipos de laboratorio que permitieron el muestreo y preservación adecuados de los lodos y sus análisis físico-químicos con el fin de tener insumos para las propuestas de sostenibilidad en el tema de materiales iniciales para la disposición adecuada de este residuo proveniente del saneamiento de aguas residuales.

Fueron utilizados los siguientes equipos:

-Medidor de potencial hidrógeno

-Mufla

-Espectrofotómetro

-GPS

Adicional los materiales que se requirieron fueron elementos de laboratorio como; crisoles, matraces, vasos de precipitación, mezcladores.

4.4. Tipo de investigación

4.4.1. Actividades de Campo

Para desarrollar la investigación se plantea las siguientes actividades descritas a continuación en la tabla 3:

Tabla 3. Actividades planteadas para el desarrollo de la investigación

Técnica	Instrumento	Producto
Georreferenciación	GPS	Mapa cartográfico
Entrevista	Entrevista documentada	Análisis de la entrevista
Recolección de muestras	Instrumentos de recolección y transporte de muestras	Muestras para analizar en el laboratorio.
Análisis de muestras	Aparatos e instrumentos de laboratorio	Resultados del análisis

Proceso de Pirólisis	Implementación de proceso	de	Resultados del proceso
Biochar	Implementación metodológica	de	Obtención de biochar

Nota: Elaborado por la investigadora, 2023

4.4.2. Documental y bibliográfico

Se implementa investigación documental y bibliográfico como herramientas para obtener información confiable y de importancia para el desarrollo de la investigación.

4.5. Métodos específicos de la especialidad

Se plantea realizar las actividades asociadas a la investigación con el fin de caracterizar los lodos de la PTAR y definir medidas de diseño de tratamiento.

- Plan de muestreo
- Metodología de análisis CRETIB
- Cálculos de cantidad de biomasa
- Cálculos para el diseño del espesor de lodos
- Mezcla rápida de lodos
- Dosificación de coagulante y floculante
- Dispositivo para deshidratación de lodo
- Pirólisis para generar biochar

4.6. Caracterización de muestras

4.6.1. Plan de muestreo

Se realizó un muestreo sistemático al azar donde se recolectaron 5 muestras de partes someras y medias para garantizar la representatividad de las muestras. El muestreo al azar en lodos residuales de lagunas de oxidación es un proceso que consiste en seleccionar submuestras de manera aleatoria en distintos puntos y tiempos para conformar una muestra representativa. Este método es esencial para adquirir datos fiables sobre la composición y propiedades de los lodos, lo que

facilita la evaluación de su calidad y viabilidad para su reutilización (Bastidas Chávez, Malacatus Cobos, & Chuquitarco Moreno, 2019).

En un estudio llevado a cabo, se analizaron los componentes químicos y biológicos de los lodos producidos en una laguna de oxidación para determinar su peligrosidad y destino adecuado. Se recolectaron muestras compuestas en diferentes puntos y profundidades, asegurando una representación confiable de los lodos. Los hallazgos indicaron que los lodos podrían ser empleados en la agricultura debido a su contenido nutricional y su clasificación como no peligrosos según normativas nacionales e internacionales (Bastidas Chávez et al., 2019).

Para llevar a cabo el muestreo de lodos residuales de una laguna de oxidación, se seguirá una metodología específica. En primer lugar, se seleccionará una muestra representativa de la laguna, considerando criterios como tiempo de operación, ubicación geográfica y volumen de lodos. Posteriormente, se planificará el muestreo, determinando la frecuencia y el momento adecuado para la recolección de muestras. Las muestras se tomarán en diferentes puntos de la laguna, siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN ISO 5667-13 (1998). En el laboratorio, se realizarán análisis fisicoquímicos y microbiológicos para evaluar las características de los lodos. Finalmente, se documentarán los procedimientos de muestreo y se registrarán los resultados obtenidos.

4.6.2. Caracterización de muestras

Primeramente, se midió el contenido de sólidos totales mediante un proceso gravimétrico que tiene la muestra para poder definir el tratamiento posterior de secado, luego para establecer un sistema de mitigación idóneo para el lodo de la muestra. A la vez se tomaron dos alícuotas para formar muestras compuestas y hacer una posterior caracterización físico-química.

4.7. Potencial Hidrógeno

El pH (potencial de hidrógeno) es una medida fundamental en química y biología, que indica la acidez o alcalinidad de una solución. Para medir el pH con precisión, se siguen métodos estandarizados que garantizan la trazabilidad y la comparabilidad internacional. Uno de los métodos primarios más utilizados es la célula de Harned, que se basa en mediciones electroquímicas en una celda ideal sin

transferencia de carga. Además, existe un convenio internacional para el coeficiente de actividad de un solo ion, que se aplica en la determinación del pH. La NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología) emite Materiales de Referencia Estándar (SRMs) para el pH, que sirven como puntos de referencia en mediciones prácticas en todo el mundo. Estos SRMs están certificados utilizando la medición primaria reconocida internacionalmente para el pH. Para obtener más detalles y referencias bibliográficas, se puede consultar el trabajo de Pratt et al. sobre la medición del pH, que proporciona recomendaciones y procedimientos específicos (NIST, 2024; Pratt et al., 2002).

4.8. Sólidos Totales

Para medir los sólidos totales en un lodo residual de una laguna de oxidación, se pueden seguir métodos estandarizados que garantizan resultados confiables y comparables. A continuación, se describen algunos enfoques comunes:

Método de Gravimetría (Método 1684 de la EPA): Este método se aplica a muestras sólidas o semisólidas, como suelos o lodos separados de tratamientos de agua y aguas residuales mediante filtración, centrifugación u otros procesos. Consiste en secar la muestra a una temperatura específica para eliminar la humedad y luego pesarla. La diferencia entre el peso inicial y el peso después del secado proporciona la cantidad de sólidos totales. Este método se encuentra detallado en el Método 1684 de la EPA1.

4.9. Metodología demanda química de oxígeno

Para medir el DQO se diluyó la muestra en un vaso de precipitación en 50 ml de agua destilada, La determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en lodos residuales de lagunas de oxidación implica el uso de técnicas analíticas estandarizadas. A continuación, se describe el proceso para medir la DQO:

Preparación de la muestra:

Pipetear 25.0 ml de la muestra de lodo residual en un matraz cónico de 250 ml.

Pipetear 10.0 ml de solución de $K_2Cr_2O_7$ en el matraz y agregar 1 gota de H_2SO_4 en proporción 1:1 (que contiene sulfato de plata y $HgSO_4$).

Añadir 2-3 gotas de indicador de Ferroína.

Titular contra una solución estándar de sal de Mohr hasta que el color cambie de verde azulado a marrón rojizo1.

4.10. Metales pesados

Cromo, Para medir el cromo total en un lodo residual de una laguna de oxidación, se pueden seguir los siguientes pasos, preparación de la Muestra: Secar la muestra a temperatura ambiente o en una estufa. Triturar y homogeneizar la muestra para obtener una mezcla uniforme.

Digestión Ácida: Realizar una digestión ácida para solubilizar el cromo presente en la muestra.

Utilizar ácido nítrico (HNO_3) y ácido perclórico (HClO_4) para descomponer los compuestos orgánicos y liberar el cromo.

Determinación del Cromo Total: Utilizar técnicas analíticas como la espectrofotometría de absorción atómica (AAS) o la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) para cuantificar el cromo total en la muestra.

Cálculos y Resultados: Calcular la concentración de cromo total en la muestra en unidades como mg/L o ppm.

4.11. Método de cálculo coliformes fecales

Preparación de la Muestra: Homogeneizar la muestra para obtener una mezcla uniforme.

Transferir una porción de la muestra a un recipiente estéril.

Dilución y Preparación de Placas: Diluir la muestra en agua estéril para obtener diferentes concentraciones. Verter las diluciones en placas de agar nutritivo o agar lauril sulfato de sodio (LSA). Incubar las placas a una temperatura adecuada (generalmente 35-37°C) durante 24-48 horas.

Conteo de Colonias: Contar las colonias que presenten características de coliformes (coloración roja o verde en agar LSA). Registrar el número de colonias en cada placa.

Cálculo de Concentración: Calcular la concentración de coliformes totales en la muestra original basándose en las diluciones utilizadas y el número de colonias contadas.

Interpretación de Resultados: Comparar los resultados obtenidos con los estándares establecidos por las normativas locales o internacionales. Documentar los valores obtenidos y su significado.

4.12. Diseño de la cama de secado de lodo.

Existen muchas técnicas que satisfacen la definición funcional de deshidratación, pero su eficacia varía considerablemente. Es crucial recordar esto al comparar distintos equipos de deshidratación y secado. Las camas de secado de lodos y las lagunas de evaporación, por ejemplo, pueden deshidratar y secar un lodo específico hasta una concentración de sólidos superior al 50-60%. El lodo deshidratado de un dispositivo mecánico puede variar desde una forma casi líquida hasta una forma más dura y quebradiza, dependiendo del dispositivo utilizado.

Las camas de secado de lodos y las lagunas de evaporación de lodos son los métodos más comunes de deshidratación y secado de lodos municipales en los Estados Unidos. Actualmente, dos tercios de todas las plantas de tratamiento de aguas residuales en los Estados Unidos utilizan camas de secado, y el 50% de todos los lodos municipales en el Ecuador se deshidratan mediante este método. Aunque se podría pensar que las camas de secado se utilizan principalmente en plantas más pequeñas y en regiones más cálidas y soleadas, también se utilizan en varias instalaciones grandes en climas más fríos. Las tasas de precipitación y evaporación son factores clave en los dos procesos de secado natural. Este capítulo se centra en el secado de lodos utilizando camas de secado de lodos."

4.13. Aspectos biofísicos de La Maná.

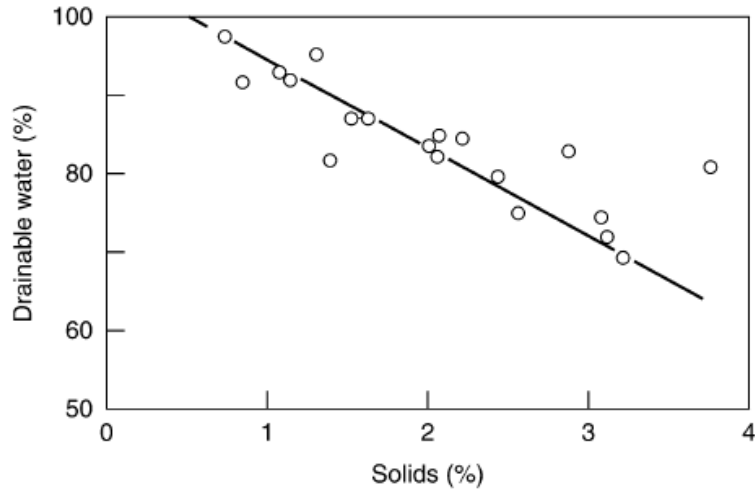
Se tomarán en cuenta repositorios climatológicos en donde se puede revisar heliofanía, exposición UV y precipitación en la zona, insumos que se usan para definir la eficiencia del secado del lodo residual de la laguna de oxidación.

4.14. Dimensionamiento

El dimensionamiento va a estar enfocado a establecer medidas idóneas para una cama de deshidratación y un posterior tratamiento para hacer un proceso sustentable de la reducción de residuos a través de biochar que estará dirigido a la aplicación de tecnologías de la mejora de suelos y agua. En condiciones climáticas favorables, con lodos secundarios, primarios o mixtos adecuadamente digeridos, es posible obtener un contenido de sólidos de 40-45% en un periodo de 2 a 6 semanas. El uso de acondicionamiento químico puede disminuir el tiempo de deshidratación en un 50% o incluso más. Aunque se han registrado contenidos de sólidos de hasta 85-90% en lechos de arena, los tiempos necesarios para obtener dichos niveles de lodo seco suelen ser poco prácticos. Los procesos de eliminación de agua implican una serie de variables operativas que influyen en el diseño de los lechos de secado; dichas variables son, condición del lodo, características del lodo, permeabilidad del suelo, disponibilidad de suelos y costos. Se consideraron factores que aceleran o disminuyen la deshidratación del lodo, la lluvia es un factor que se considera como retardante de la deshidratación, pero su efecto se reduce si el lodo se ha reducido y ha empezado a formar una costra, sin embargo, el agua lluvia disuelve importantes nutrientes y reduce el potencial de fertilización del lodo. Otras variables consideradas son, aire, temperatura, humedad relativa, porcentaje de brillo de sol y velocidad del viento que afecta directamente a la velocidad de secado; dichas variables fueron obtenidas de repositorios climáticos para el diseño del sistema. El sistema de secado está basado en la metodología descrita por Wang L. et al.

Primer paso es verificar el agua que se puede drenar a través de la cama de arena vs. el porcentaje de sólidos, asumiendo una libertad de grasas y aceites que entorpecerían el proceso. En la gráfica 1 se puede ver una imagen producto de investigaciones que se han ajustado mediante una regresión lineal.

Figura 1. Efecto de la concentración de sólidos en el agua de drenaje.



Otro indicador de diseño para las camas de secado es considerar que no se debe exceder 15lb de sólidos secos por pie cuadrado en camas que están si cubierta, y para camas con cubierta puede trabajarse con 25 libras por pie cuadrado. Otra variable a considerarse es el grosor de la capa de lodo, que va a afectar directamente el tiempo de drenaje y la hidratación del lodo, tal como se observa en la figura 2 y 3.

Figura 2. Tiempo de drenaje en función del cambio del grosor de la capa de lodo.

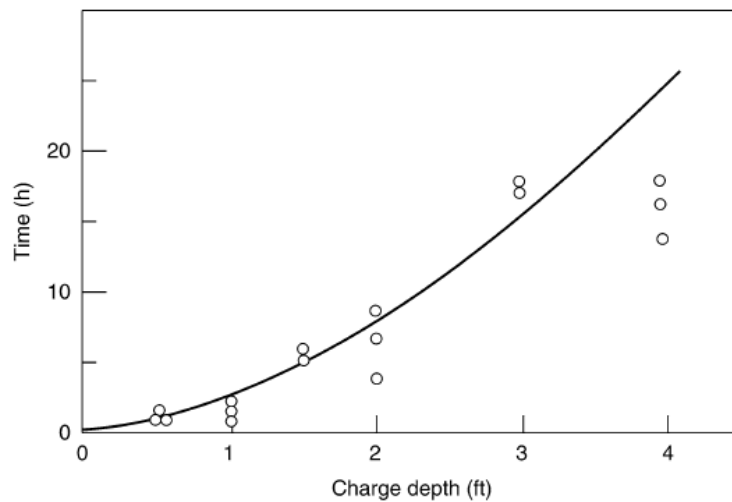
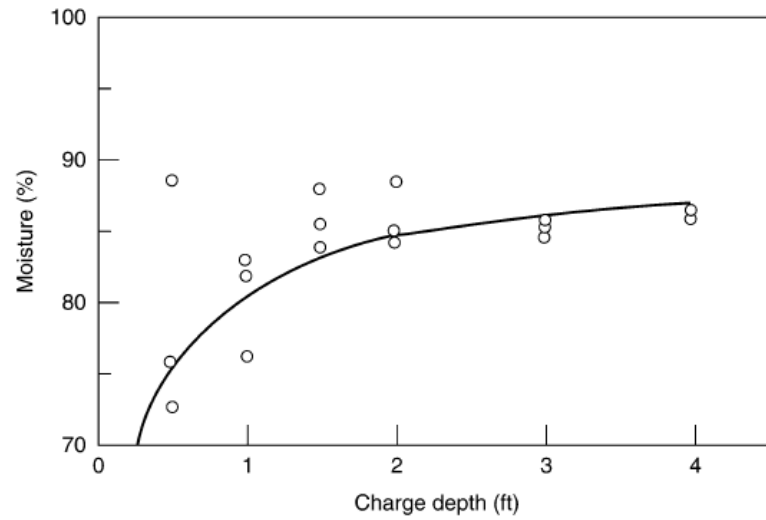
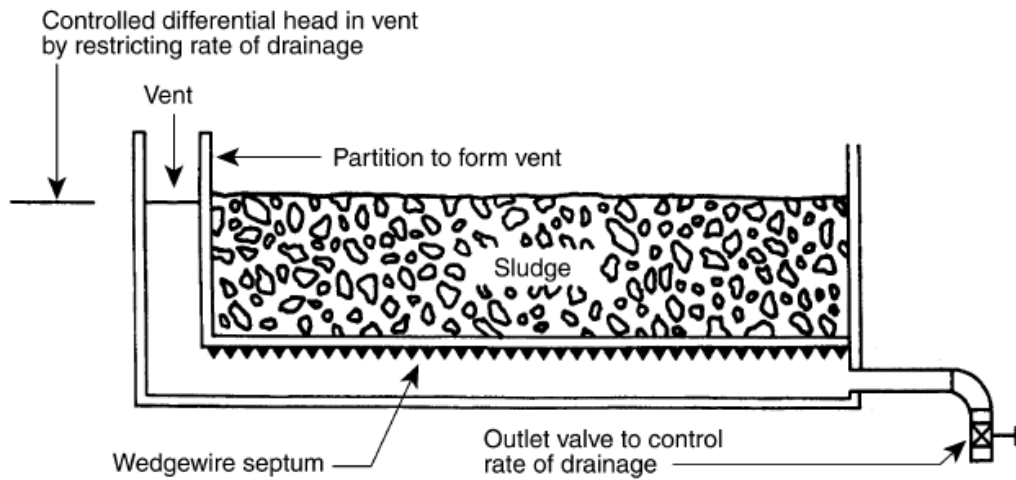


Figura 3. Contenido de humedad del lodo en función del espesor de la capa.



El criterio que se va a aplicar para la deshidratación de lodos va enfocado a camas de deshidratación mediante malla de claves tipo cuña. Según la figura 4 se puede identificar la vista en corte la cama de secado con la que se va a trabajar.

Figura 4. Corte en planta del sistema de secado de lodos tipo malla



En la tabla 1 se puede observar los valores del desempeño del sistema en función de la calidad y características del lodo.

Tabla 4. Datos del desempeño del sistema de deshidratación.

<i>Tipo de lodo</i>		Sólidos de alimentación [%]	Concentración de Sólidos [%]	Tiempo de deshidratación	Captura de Sólidos [%]
<i>Lodo primario</i>	<i>Activado</i>	8,5	25	14d	99
Humus de filtro	percolador	2,9	8,8	20h	85
Digestión Primaria		3	10	12d	86
Lodos Activados frescos		0,7	6,2	12h	94
Lodos Activados frescos		1,1	9,9	8d	87
Lodos activados espesos		2,5	8,1	41h	100

4.15. Requisitos del terreno

La tasa de secado de lodos, dependiendo de los parámetros previamente discutidos, determina las áreas mínimas de terreno requeridas para la instalación de camas. Los tamaños recomendados para las camas de secado de arena se dan en la Tabla 2. Las camas abiertas requieren áreas más grandes que las camas cubiertas. En climas más cálidos, los requisitos de área pueden ser menores que los mostrados en la Tabla 2. Furman recomienda un área de solo 0.3 ft²/capita para el secado de lodos primarios digeridos y de humus de filtro percolador en Florida (38). Esto es menos de 1/3 del tamaño requerido en los estados del norte. Eckenfelder y O'Connor recomiendan cargas sólidas anuales por unidad de área de cama para varios tipos de lodos de aguas residuales en el rango de 15–27 lb/ft² como se da en la Tabla 3 (8). El efecto del tipo de lodo en los requisitos de área de cama recomendados en Inglaterra se muestra en la Tabla 4. Los requisitos de área disminuyen para los lodos acondicionados químicamente. Esto se debe a las cargas sólidas más altas permitidas para lodos acondicionados, la aplicación de cargas de lodo más profundas y las tasas de secado más rápidas de dichos lodos. La falta de disponibilidad de terrenos limita la aplicación de camas de secado de lodos de arena

en las cercanías de las grandes ciudades. Sin embargo, las camas de arena seguirán siendo instalaciones importantes de secado de lodos en ciudades y pueblos medianos y pequeños.

Tabla 5. Estándares recomendados para el área de la cama de deshidratación.

Tipo de Lodo	Área de la cama (ft ² /cápita)	
	Cama descubierta	Cama cubierta
Primario	1	0,75
Filtro Percolador de alta tasa	1,5	1,25
Lodo Activado	1,75	1,35

El transporte de lodos fluidos a áreas rurales podría resultar económico y ventajoso para el secado de lodos y la aplicación en terrenos.” (Furman, 2024; Eckenfelder & O’Connor, 2024).

4.16. Cubierta de camas de secado

Cuando se prevé un período prolongado de lluvia, nieve o clima frío, o cuando hay problemas potenciales de olores, insectos o estética, se debe considerar el uso de cubiertas para las camas de secado. Las camas de arena cubiertas, cuando están adecuadamente ventiladas, pueden requerir un 25–33% menos de área que las camas de arena abiertas (ver Tabla 2). Aunque se pueden proporcionar cubiertas para camas pavimentadas, de alambre en forma de cuña y de vacío, no existe documentación disponible sobre cómo las cubiertas afectarían o mejorarían las tasas de carga para dichas camas.

4.17. Acondicionamiento del lodo

El acondicionamiento del lodo puede tener un impacto significativo en la capacidad de las camas de secado y debe considerarse como parte del diseño. Esto es especialmente relevante para lodos difíciles de deshidratar.

4.18. Remoción del lodo

En la mayoría de las instalaciones de Estados Unidos, se utiliza mano de obra manual para retirar el lodo seco de las camas de secado. Con este método, se requiere una concentración sólida del 30–40%. Sin embargo, los sistemas

mecánicos de remoción de lodo pueden manejar concentraciones sólidas entre el 20 y el 30%. Para las camas de secado con alambre en forma de cuña, existe una unidad cultivable similar al mecanismo de elevación y descarga de un camión volquete.

4.19. Corrientes laterales

La única corriente lateral en una operación de cama de secado es el licor de drenaje inferior. Por lo general, este flujo no se trata por separado, sino que se recicla a la entrada de la planta. Es importante considerar el alto contenido de nitrógeno de esta corriente reciclada en el diseño de las unidades aguas arriba en la planta de tratamiento.

4.20. Criterios de dimensionamiento de las camas de secado

La mayoría de los datos de diseño publicados y utilizados profesionalmente se basan en operaciones durante las décadas de 1940 y 1950. Las Tablas 3 y 4 resumen los datos disponibles para el dimensionamiento de las camas de secado de arena. En ese momento, los lodos aplicados a las camas de arena eran predominantemente digeridos anaeróbicamente. Provenían de plantas con procesos de tratamiento primario, primario más filtros percoladores o primario más lodos activados convencionales. Muchos de los lodos generados actualmente no se ajustan fácilmente a estas categorías. También se debe tener en cuenta que la mayoría de los datos se informan en términos de pies cuadrados de área superficial de la cama requerida para la deshidratación per cápita (Tablas 3 y 4). Este criterio solo es válido para las características de un agua residual particular y no tiene una base de diseño racional. El mejor criterio para dimensionar las camas de secado de arena es en términos de carga de sólidos, libras de sólidos por pie cuadrado de área superficial de la cama por año (Tabla 3). Los mejores criterios también tendrían en cuenta las condiciones climáticas (como temperatura, velocidad del viento y precipitación), las características del lodo (arena, grasa, fibra y contenido biológico) y la concentración de sólidos.

Tabla 6. Criterios per cápita para dimensionar camas de secado

<i>Fuente Inicial de lodo</i>	<i>Área Sin Carga Cubierta</i>	<i>Área/Cubierta</i>
-------------------------------	--------------------------------	----------------------

	(ft ² /capita)	(lb sólidos/ft ² /yr)	(ft ² /capita)
<i>Primario</i>			
<i>Ref.51</i>	1	27,5	0,75-1
<i>Ref.52</i>	1-1,5		
<i>Ref.53</i>	1,25		0,93
<i>N45°N Latitud</i>	1		0,75
<i>entre 40-45°N</i>	0,75		0,56
<i>S40°N latitud</i>			
<i>Primario+químicos</i>			
<i>Ref.51</i>	2	22	1-1,25
<i>Ref.52</i>	2-2,2		
<i>Ref.53</i>	2,5		1,87
<i>N45°N Latitud</i>	2		1,5
<i>entre 40-45°N</i>	1,5		1,12
<i>S40°N latitud</i>			
<i>Primario+filtro percolador de tasa baja</i>			
<i>Ref.51</i>	1,6	22	
<i>Ref.52</i>	1,25-1,75		1-1,25
<i>Ref.53</i>	1,87		1,56
<i>N45°N Latitud</i>	1,5		1,25
<i>entre 40-45°N</i>	1,12		0,93
<i>S40°N latitud</i>			
<i>Primario+lodo activado</i>			
<i>Ref.51</i>	3	15	
<i>Ref.52</i>	1,75-2,25		1,25-1,5
<i>Ref.53</i>	2,18		1,68
<i>N45°N Latitud</i>	1,75		1,35
<i>entre 40-45°N</i>	1,31		1,01
<i>S40°N latitud</i>			

También se tomó en cuenta un parámetro fundamental en el diseño de la cama de secado el cual contempla el consumo energético, que considera energía mecánica de consumo y de bombeo:

$$E_t = E_p + E_{ms} + E_{sr} \quad (1)$$

$$E_p = 3.89 \times 10^6 Q(THD) \times 100/\varepsilon \quad (2)$$

$$E_{ms} = \text{estimado } 3.2 \times \frac{10^6 \text{ Btu}}{\text{año}} \text{ a } 900 \text{ lb solidos secos/MG} \quad (3)$$

$$E_{sr} = \text{estimado } 10\% \text{ de } E_{ms} = 0.32 \times 10^6 \text{ Btu/MGD} \quad (4)$$

Donde, E_t es la energía anual de consumo (Btu/año); E_{ms} es la energía mecánica usada en el proceso de secado (Btu/año); E_p es la energía consumida por concepto de bombeo (Btu/año); ε es la eficiencia (%); Q es el flujo de lodo (MGD); THD es la presión total dinámica de cabeza (ft).

En la tabla 4 se ha recopilado información de diferentes casos de estudio los cuales han apoyado como criterios de diseño para el sistema de camas de secado de los lodos de tratamiento de la PTAR La Maná. Para dicho diseño es de suma importancia establecer la fuente de origen del lodo residual a tratar ya que de esas características depende el área a seleccionarse y el tipo de sistema de secado. Los niveles de exposición a los rayos UV y diferentes factores de intemperie ayudan de manera rigurosa al proceso de desactivación de los consorcios microbianos para generar un componente rico en nutrientes capaz de mejorar los suelos desde la perspectiva ambiental ecosistémica. Seck, A. et al en su obra del 2015 manifiesta la importancia de generar procesos de secado de lodos activados, que aportan de manera eficiente en los campos de energía y sostenibilidad a través de las metodologías adecuadas en base al contexto de tratamiento residual.

Es importante considerar los factores presentados en la tabla 7

Tabla 7. Resumen de criterios de diseño camas de secado medido en pies cuadrados por persona

	Región EPA													
	I		II		IVb	VI		VIIb	VIII		IXb	Xc		
	Ud	Cd	U	C	U	U	C	U	U	C	U	U	C	
Solo lodo primario oxidado anaeróbicamente	1,5	1	1,5	0,75	0,5-1	1		1				1,5	1	
primario+baja tasa de filtro percolador	1,75	1,25	1,5	0,75	0,75-1,2	0,5-1	0,25	1,5	1	1	1	1,5-2	1-1,25	
primario+filtro de arena					1	1					0,5			
primario+alta tasa de filtro percolador					1	1			1,25	1,25	1	2	1,25	
primario+sistema lodos activos	2,5	1,5	2	1	1,5-2,5	1-1,5	1		1,35	1,35	1	1,5-2,5	1-1,5	
primario+químico Imhoff			2	1	1-1,33	1		1,5	1,3			3	2	
Imhoff+baja tasa filtro percolador			1,5	0,75	0,66-1	1-1,2	1							

Nota: IV., VII y IX no tienen estudios para camas cubiertas.

4.21. Disposición final de lodos residuales proveniente de la cama de secado.

4.21.1. Secado de muestra para producción de biochar

El método gravimétrico, que es un enfoque directo para medir la humedad, implica pesar la muestra antes y después del secado y luego calcular el contenido de humedad. Este método se aplicó al secado de muestras (Quichimbo et al., 2016). De acuerdo con García Martínez y Fernández Segovia (2019), el uso de una estufa de secado es esencial en el método gravimétrico. Para productos con un alto contenido de azúcares, la temperatura máxima de secado es de 70°C. Esto se

consideró para el lodo para preservar la mayor cantidad posible de materia orgánica sin eliminar completamente sus propiedades.

4.21.2. Metodología para la evaluación de contaminación del agua por metales pesados

Muestra de agua contaminada, Para obtener muestras de agua contaminada, se siguió un procedimiento específico. Se tomaron 80 ml de agua destilada por el biochar y se expusieron a concentraciones de mercurio (Hg) diferentes. Según Tovar et al en su obra del 2021 se discute que es importante destacar que el mercurio es altamente tóxico, incluso en concentraciones tan bajas como 0,001 mg/L a 0,1 mg/L en el agua.

Los materiales utilizados en este proceso incluyeron termómetros de mercurio (con una cantidad de 1,5 g a 2 g de Hg), muestras de agua y los elementos necesarios para llevar a cabo la marcha analítica de metales pesados del Grupo I. Esta marcha analítica permitió la identificación cualitativa de los cationes del grupo I, como Ag, Pb⁺² y Hg. Para ello, se emplearon los siguientes materiales: 3 vasos de precipitado, 2 pipetas graduadas de 10 ml, 1 gradilla, 10 tubos de ensayo, 1 embudo, 1 mechero, 1 trípode, papel filtro, centrífuga y tubos para centrífuga.

Los reactivos utilizados en el proceso incluyeron HNO₃ diluido, HCl 6M y NH₄ OH. La muestra problema también se trató con K₂CrO₄ 0,5M para identificar la presencia de mercurio (Hg) en dicha muestra (Ramirez Avila, 2014)

4.21.3. Cálculo de porcentaje de humedad

Para obtener el porcentaje de humedad, se pesó en una balanza digital las muestras obtenidas en el secado, aplicando la ecuación 5.

$$\% \text{ de humedad} = \frac{W_{\text{muestra seca}}}{W_{\text{muestra inicial}}} \times 100 \quad (5)$$

Fuente: (Equipos y Laboratorio, 2022)

Dónde:

W: es el peso de la muestra

Según Fernández Vivanco & López Portilla (2018), el porcentaje de humedad de la biomasa debe ser baja o menor al 50%, de humedad para obtener condiciones de trabajo óptimas dentro del equipo y que el proceso de pirólisis sea más eficaz.

4.21.4. Metodología para la síntesis de Biochar

Pirólisis, metodología y análisis

Una vez secas las muestras de lodo residual, se procedió a realizar la pirólisis, para ello se utilizó los siguientes materiales:

Materiales:

Crisol con Tapa

Papel aluminio

Balanza digital

Mufla

Pinzas metálicas

Guantes anticalor (hasta 800°C).

En la tabla 5 se puede apreciar los tipos de pirólisis, los cuales ayudaron para aplicar la temperatura y tiempo adecuado para obtención del biochar.

Tabla 8. Tipos de pirólisis aplicadas a la investigación

Proceso	Velocidad de calentamiento	Temperatura °C máxima	Tiempo de residencia	Productos
Carbonización	Muy Lenta	350 a 400	Minutos- Horas- Días	Biochar
Pirólisis Lenta	0,01- 2 °C/s Lenta	400 a 500	45 a 60 minutos	Biochar
Pirólisis Convencional	Lenta	500 a 600	5- 30 minutos	Biochar Bioaceite
Pirólisis	Muy rápida	650	0,5 a 5	Gas

Rápida			segundos
Pirólisis	Muy rápida	650	0,5 a 5 segundos
Rápida			segundos

Nota: Tipos de pirólisis con sus respectivas temperaturas y tiempo de residencia de la muestra.

Fuente: (Gómez Zuñiga & Quevedo Gamba, 2020)

4.21.5. Pirólisis lenta

La pirólisis lenta según la tabla 4, dice que la velocidad de calentamiento es de 0,01- 2°C/s a una temperatura de entre los 400°C y 500°C con un tiempo de residencia de la biomasa de 45 a 60 minutos para la obtención de biochar (Gómez Zuñiga & Quevedo Gamba, 2020).

4.21.6. Pirólisis convencional

La pirólisis convencional se genera a una velocidad de calentamiento lenta, alcanzando una temperatura máxima entre 500-600°C. En estas condiciones, se obtienen tres productos: sólidos, líquidos y gases, en proporciones significativas, utiliza velocidades de calentamiento bajas (~0.1-1 K/s), el tiempo de residencia de los volátiles varía entre 5 y 60 minutos, la biomasa se calienta hasta alrededor de 500°C y usa tamaños de partícula entre 5-50 mm (Baray Guerrero et al., 2019).

4.21.7. Pirólisis rápida

La pirólisis rápida según la tabla 4, nos dice que la velocidad de calentamiento es rápida a una temperatura de 650°C con un tiempo de residencia de la biomasa de 0,5 a 5 segundos para la obtención de bio aceite (Gómez Zuñiga & Quevedo Gamba, 2020).

4.21.8. Procedimiento para producción de biochar

A partir del método de (Constante Tamayo & Machado Muñoz, 2020), se pesó 111 g previamente secada y triturada dentro de un crisol el cual tapamos y envolvimos con papel aluminio para impedir la entrada de oxígeno a la muestra, se colocó la biomasa pesada en el interior de la mufla, cerramos y sesteamos la

temperatura deseada según el tipo de pirólisis guiándonos en la tabla 4, una vez culminado se apagó el equipo y se dejó que este se enfríe por un lapso máximo de 24 horas, ya frío se abrió la mufla para recoger el biochar y se procedió a pesar para obtener el peso final y se almacenó en una funda ziploc posteriormente se envolvió en papel aluminio.

4.21.9. Carbonización

La temperatura máxima para la carbonización de la biomasa según la tabla 4 tiene un máximo de 400°C, a partir de ello se aplicó el método de (Constante Tamayo & Machado Muñoz, 2020), se realizó el proceso de pirólisis a una temperatura de 350°C con una duración de 30 minutos, una vez terminado se apaga el equipo y se dejó que enfríe para recoger el biochar el cual se procedió a almacenar en una funda ziploc y se pesó su peso final.

4.22. Método Analítico

4.22.1. Porcentaje de cenizas

Para obtener el porcentaje de cenizas, una vez frío el crisol, pesamos en una balanza digital y se aplicó la fórmula 6 antes mencionada.

$$\% \text{ CENIZAS} = \frac{W \text{ muestra final}}{W \text{ muestra inicial}} \times 100 \quad (6)$$

Fuente: (Constante Tamayo & Machado Muñoz, 2020)

Dónde:

W: es el peso de la muestra

4.23. Análisis de datos.

4.23.1. Factores de Estudio

Se identificó tres factores, el factor A trata de las dos biomásas utilizadas para la producción de biochar, el factor B identifica los dos pesos de biochar utilizados para el proceso de remoción de biochar y el factor C identifica las tres temperaturas de producción de biochar como se puede evidenciar en la tabla 5.

Tabla 9. Factores de estudio

	Factores	Variables	Repeticiones	Tratamientos
A (biomasa)	Biochar a 400 °C	2		
	Biochar a 500 °C			
B (pesos de biochar)	0.5 g	2		
	5 g			
C (temperatura de producción de biochar)	350°C	3		12
	400°C			
	500°C			

Nota: La tabla muestra los factores, variables, repeticiones y tratamientos totales del proyecto de investigación, correspondientes al diseño experimental.

4.24. Metodología de contaminación de agua con metales pesados

4.24.1. Muestra de agua contaminada

Para obtener la muestra de agua contaminada, se procedió a tomar 80 ml de agua destilada para cada biochar y colocar concentraciones del mercurio (Hg), ya que el mercurio es muy tóxico, incluso en concentraciones del orden de 0,001 mg/L a 0,1 mg/L en el agua (Tejada Tovar et al., 2012).

Materiales:

Termómetros de mercurio (1.5 g a 2 g de Hg)

Muestra de agua

Marcha analítica de metales pesados del Grupo I

Se realizó la marcha analítica para la identificación cualitativa de los cationes del grupo I: Ag, $[Pb]^{(+2)}$ y Hg, precipitados con HCl para así identificar el mercurio (Hg) en una muestra problema. Para ello se empleó los siguientes materiales:

Materiales:

3 Vasos de precipitado

2 pipetas graduadas 10ml

1 gradilla
10 tubos de ensayo
1 Embudo
1 Mechero
1 Trípode
Papel filtro
Centrífuga
Tubos para centrífuga
Balanza (Ramírez Avila, 2014).

Reactivos:

HNO₃ diluido
HCl 6M
NH₄ OH
Muestra Problema
K₂CrO₄ 0.5M (Ramírez Avila, 2014).

Proceso:

Se realizó el proceso de Ramírez Avila (2014), para la identificación, siguiendo los siguientes pasos:

Se colocaron 5 gotas de la muestra problema en un tubo de ensayo.

Seguido se colocó 15 gotas de agua destilada y 2 gotas de HCl 6 M.

Se dejó escurrir 1 gota de HCl 6M por la pared del tubo de ensayo que contiene el precipitado, si la solución sobre el precipitado queda clara, o casi clara, quiere decir que todos los iones del Grupo I se precipitaron completamente, si se forma más precipitado, significa que la cantidad de agente precipitante es insuficiente. Si es el caso se agita, se centrifuga y se agrega otra gota de HCl 6M, repitiendo todas las operaciones hasta que al momento de adición HCl ya no se forme más precipitado.

Se procedió a enfriar, dejando correr agua por el exterior del tubo y se decantó la solución que queda clara sobre el precipitado.

El precipitado puede ser PbCl_2 , AgCl , Hg_2Cl_2 o cualquier posible combinación de los tres.

4.25. Identificación de los cationes del Grupo I

Al precipitado que quedó en el tubo de ensayo se le agregó 1 ml de agua destilada y se calentó el tubo de ensayo por 2 minutos en un baño de agua caliente, agitando varias veces durante el calentamiento.

Se sacó el tubo y se centrifugó inmediatamente por no más de 30 segundos.

Se procedió a decantar y la solución se guardó para el ensayo de plomo en caso de requerir y el precipitado se guardó para la identificación de Plata y Mercurio (Ramírez Avila, 2014).

4.26. Ensayo de plomo

Para el ensayo del plomo se tomaron 5 gotas de la solución obtenida en el paso 9 y se las colocó en un tubo de ensayo limpio, se agregó 110 gotas de agua destilada y 2 gotas de K_2CrO_4 0.5M, si se forma un precipitado amarillo, esto es indicio de que el plomo puede estar presente en la muestra. Para confirmar se tomaron otras gotas de la solución obtenida en el paso 9 y se le agrega 6 gotas de H_2SO_4 9M dando la formación de un precipitado blanco es evidencia de la presencia de plomo (Ramírez Avila, 2014).

4.27. Separación del AgCl y de Hg_2Cl_2

Se procedió a lavar el precipitado del paso 9 con agua caliente y se le añadió 5 gotas de agua destilada y 5 de hidróxido de amonio concentrado, se agitó, se centrifugó y se decantó la solución a un vaso de precipitado, en este paso se logra disolver al AgCl y el Hg_2Cl_2 reacciona con el NH_3 o con HCl para formar partículas muy pequeñas de Hg y de $\text{Hg}(\text{NH}_2)\text{Cl}$ (Blancas). La presencia por tanto de un color gris o blanco polvoriento se entiende como una prueba positiva de la presencia del Hg.

A la solución obtenida en el paso anterior se le agregó lentamente 1 ml de HNO_2 concentrado (esto debe hacerse con mucho cuidado para evitar salpicaduras, debe dejarse resbalar el HNO_3 por las paredes del vaso y se debe agitar constantemente), la formación de un precipitado blanco en este paso es indicativo de la presencia de Plata para que esto suceda la solución debe ser ácida (Ramírez Avila, 2014).

4.28. Metodología para análisis de eficacia del tratamiento

Aplicación de biochar para remoción de mercurio del agua contaminada

Una vez obtenida la solución con presencia de mercurio, utilizamos los siguientes materiales:

Materiales:

Vasos de precipitación de 100 ml

Balón de destilación de 100 ml

Tubos de ensayo

Gradilla

Guantes

Varilla de agitación

Biochar (350°C, 400°C y 500°C)

Cuchara pequeña

Balanza

Papel filtro

Embudos

Papel aluminio

Reactivos:

Ácido clorhídrico (HCl) 6M.

Muestra problema de mercurio

Determinación de carga óptima

Se pesó cada tipo de biochar el cual se colocó sobre el embudo que contiene el papel filtro y se colocó 80 ml de solución de mercurio, se dejó que el biochar filtre el agua y una vez filtrada el agua se procedió a colocar una parte de la muestra de agua en 1 tubo de ensayo al cual se colocó 1 ml de HCl 6M, si el agua muestra partículas de tonalidad blanca polvorienta significa que el agua aún tiene presencia de Mercurio y si el agua no presenta partículas de tonalidad blanca polvorienta significa que el biochar si ayuda a remover el mercurio del agua. Este proceso de filtrado se realizó 5 veces o más para verificar la remoción por medio de la observación directa con la identificación química de metales pesados y con una repetibilidad de 3 veces por cada biochar de diferente temperatura y con diferente peso.

Se identificó la evidencia de remoción de mercurio con un máximo a los 5 filtrados eliminando todas las partículas blancas polvorientas que evidencian la presencia de mercurio y se evidencia la ausencia de remoción de mercurio al necesitar un mayor número de filtraciones superiores a 5 filtraciones de agua.

4.29. Tabla de Frecuencias

Para dar una justificación porcentual se realizó una tabla de frecuencias con ayuda del software Excel en el que se calculó las siguientes frecuencias:

4.29.1. Frecuencia Absoluta

Se realizó el conteo del número de veces que se repite la variable cualitativa de remoción de mercurio en el conjunto de datos obtenidos posteriormente.

4.29.2. Frecuencia Relativa

Se realizó el cálculo porcentual correspondiente a las veces que se repite un número en el conjunto de datos respecto al total de los mismos.

4.30. Metodología para caracterización de biochar

Al finalizar la comparación cualitativa de eficiencia de absorción de cada tipo de biochar, se identificó el biochar más eficiente, el que no presentó cambio en su color después del filtrado (no cambio a la coloración blanca polvorienta

indicativa de la presencia de mercurio), posteriormente se analizó 150 g de muestra de dicho biochar, en el cual realizó los siguientes análisis cuantitativos:

pH: El método empleado fue EPA 9045 C y la técnica de electrometría a 25°C.

Conductividad: El método para medición de conductividad utilizado fue APHA 2510 B y técnica de electrometría a 25°C.

Humedad: El método para medición del porcentaje de humedad utilizado fue Infrarrojo y técnica de termogravimetría.

Cenizas: La técnica empleada para medición del porcentaje de cenizas fue termogravimetría.

Materiales volátiles (carbono fijo): La técnica para medición de materias volátiles utilizada fue termogravimetría.

Granulometría: Para la obtención del tamaño, forma y granulometría, se utilizó la técnica fotográfica (Camsizer).

CAPÍTULO III.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

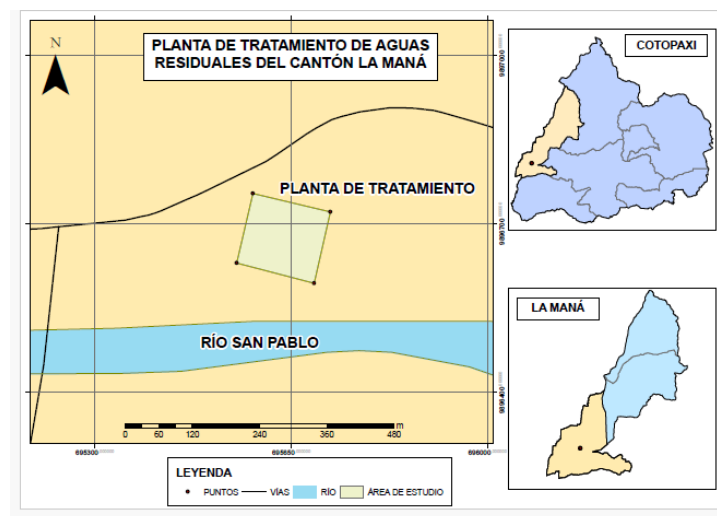
A continuación, se presentan los principales hallazgos en la caracterización del lodo residual, diseño y revalorización.

5.1. Caracterización del lodo residual de la laguna de oxidación

5.1.1. Ubicación Geográfica de la zona de estudio

La planta de tratamiento de aguas residuales se encuentra ubicado en el sector San Gonzalo, cantón La Maná, provincia de Cotopaxi, Ecuador. Se localiza a una altitud de 200 msnm y con un clima lluvioso tropical de 21,2 °C en promedio, se evidencia la ubicación según la figura 4, detallada a continuación.

Figura 4. Mapa de Ubicación



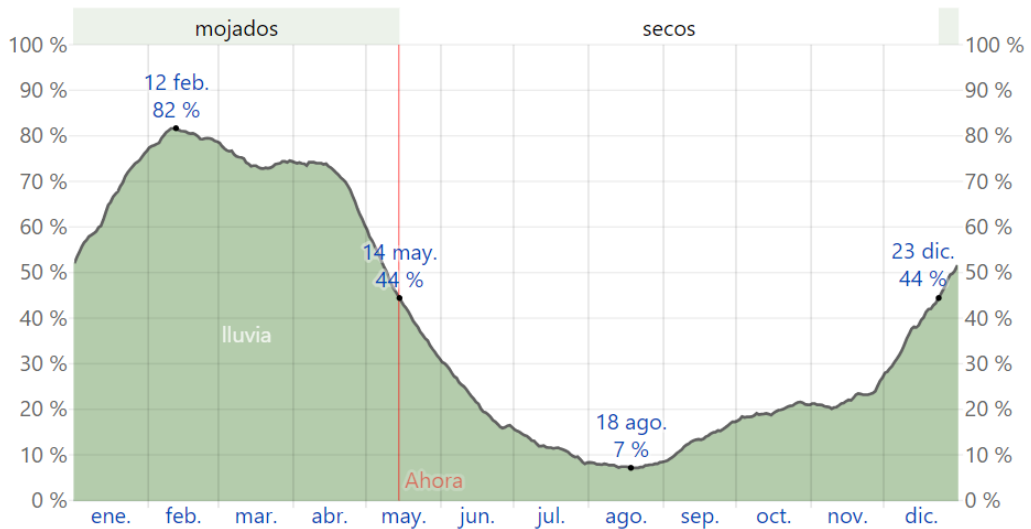
Fuente: IGM_2023

Los resultados de la presente investigación vienen dados por los datos biofísicos de la zona, los criterios de diseño y el proceso de transformación biochar para implementar métodos de gestión a los residuos producto del tratamiento de aguas residuales.

5.1.2. Datos climáticos del cantón de La Maná

Los datos climáticos son indispensables para poder establecer la calidad de secado del lodo residual. En primer lugar, se analizó los datos de precipitación del cantón como insumo esencial para el criterio de diseño del tratamiento de lodos residuales, en la figura xx se puede observar los datos de precipitación.

Figura 5. Probabilidad diaria de precipitación en La Maná

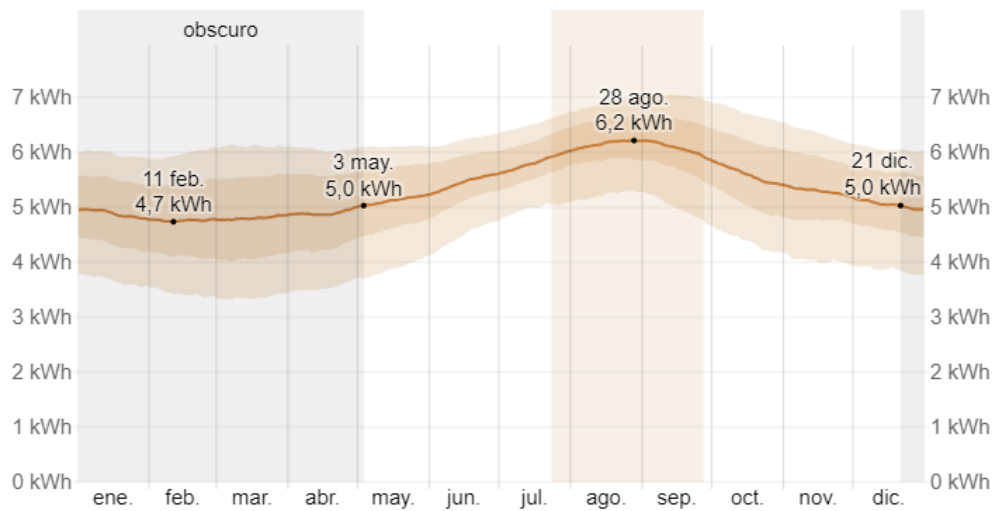


Fuente: <https://es.weatherspark.com/y/19368/Clima-promedio-en-La-Maná-Ecuador-durante-todo-el-año>

Como resultado principal se puede observar que se tiene una media del 50% probabilidad de precipitación anual, dato fundamental que establece que el diseño de la cama de secado netamente debe ser con cobertura para maximizar la efectividad de secado. A su vez también se establece una media de 5 kWh de energía solar que se aporta como factor fundamental en el secado del lodo residual siendo una cantidad energética suficiente para poder vaporizar el contenido de humedad del lodo, entendiéndose en la bibliografía como un valor de 1.16 kWh completo para poder vaporizar 12 m³ de humedad de agua.

En el caso de las muestras se estableció un porcentaje de sólidos totales 80% en un total de 53 m³ mensuales de lodo. Estableciendo que una cantidad 1,3 m³ mensuales deben vaporizarse por efecto de la radiación solar y a su vez la incidencia de la radiación UV desactiva totalmente los procesos microbiológicos del lodo, los niveles de energía analizados se pueden ver en la figura xx.

Figura 6. Energía solar de onda corta incidente diario promedio en La Maná



Fuente: <https://es.weatherspark.com/y/19368/Clima-promedio-en-La-Man%C3%A1-Ecuador-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-SolarEnergy>

5.1.3. Resultados de laboratorio

Para el análisis de laboratorio se estableció parámetros físico químicos como % ST, pH, DQO, Metales pesados y patógenos, obteniendo los siguientes resultados establecidos en la tabla 8.

Tabla 10. Análisis de laboratorio

Muestra	pH	DQO	% ST	Cr	Hg	As	Coliformes
1_2	6.2	460 mg/kg	80	15.97 mg/kg	1.1701 mg/kg	< 5mg/kg	210 NMP/g
3_4	6.4	450 mg/kg	76	9.43 mg/kg	1.6813 mg/kg	< 5mg/kg	43 NPM/g

5_6	6.2	503	82	7.64	1.98	<	1100
		mg/kg		mg/kg	mg/kg	5mg/kg	NPM/g
7_8	6.5	420	75	7.69	1.89	<	460
		mg/kg		mg/kg	mg/kg	5mg/kg	NPM/g
9_10	6.3	478	86	11,31	1.44	<	290
		mg/kg		mg/kg	mg/kg	5mg/kg	NPM/g

Los resultados fueron obtenidos de muestras aleatorias al azar a dos tipos de profundidad para tener una referencia adecuada de la calidad del lodo residual, Como factor a resaltar es que tenemos presencia pronunciada de cromo como metal pesado. El tema de patógenos es muy importante conocer para establecer el proceso de inactivación mediante UV.

Comparativa con el Acuerdo Ministerial 097 A

EL AM 097A en su anexo tres en la tabla 1 donde se habla de criterios de calidad de suelo, se establece los siguientes parámetros máximos permisibles: Arsénico 12 mg/kg, Mercurio 0.1 mg/kg y cromo 0.4 mg/kg. Los análisis presentados en cuanto a metales pesados, demuestran que el arsénico está dentro los límites máximos permisibles (LMP, el cromo y mercurio sobrepasan de gran manera los LMP, indicando que existen actividades industriales que envían sus efluentes al tratamiento municipal.

Calibración del lodo residual para eliminación de metales pesados.

Se estableció una concentración de 6mg/kg de cascarilla de arroz para encapsular los metales pesados debido a su estructura de celulosa, como resultado se tuvo que la marcha analítica no tuvo ningún indicador cualitativo de la presencia de metales, tanto como Hg y Cr Total. Esta prueba indicó la eficiencia de la zeolita para encapsular contaminantes pesados.

5.2. Resultados del diseño de una cama de secado de cables

El deshidratado de lodos sépticos utilizando lechos de secado de arena es un método conveniente para comunidades pequeñas en áreas donde la disponibilidad de tierra no es una restricción importante. El lodo séptico se coloca en lechos de

secado compuestos de arena y grava, y se permite que se seque. La deshidratación ocurre tanto por el drenaje a través del lecho de arena como por la evaporación. A medida que el lodo séptico se seca, se forman grietas en la superficie, lo que permite una mayor evaporación y secado en las capas inferiores. El filtrado que drena a través de la arena se recoge en un sistema de tuberías perforadas y de uniones abiertas ubicado debajo de los lechos de arena. Puede devolverse al punto de entrada de la planta de tratamiento o tratarse por separado como un efluente antes de su disposición final. El lodo deshidratado se retira del lecho de arena mediante cargadoras frontales o palas, y luego se transporta para su aplicación en tierra o para su disposición final. Un sistema típico de secado en lecho de arena se muestra en las Figuras 1 y 2.

La planta de tratamiento de aguas residuales cuenta con un lecho de secado de 200 pies de largo y 20 pies de ancho. El lodo generado en la planta tiene una concentración de sólidos del 5%. El lodo se aplica al lecho hasta una profundidad máxima de 9 pulgadas. Calcula la cantidad de libras de sólidos que se pueden secar cada año por cada pie cuadrado de área del lecho de secado, el proceso de secado del lodo toma 3 semanas y la remoción de sólidos 2 días (60).

Resultados de diseño:

Volumen de lodo aplicado:

$$\text{Volumen} = 200 \text{ ft} \times 20 \text{ ft} \times (9/12) \text{ ft} = 3000 \text{ ft}^3$$

$$\text{Convierte a galones: } 3000 \text{ ft}^3 \times (7.48 \text{ gal/ft}^3) = 22,440 \text{ galones.}$$

Peso de sólidos secos (en libras):

$$\text{Peso} = 22,440 \text{ galones} \times (8.34 \text{ lb/galón}) \times (5/100) = 9360 \text{ lb.}$$

Número de días por ciclo (secado + remoción):

$$\text{Días por ciclo} = 3 \text{ semanas} \times (7 \text{ días/semana}) + 2 \text{ días} = 23 \text{ días.}$$

Producción diaria de sólidos secos:

Peso diario = $9360 \text{ lb} / 23 = 407 \text{ lb/día}$.

Peso anual de sólidos secos producidos:

Peso anual = $407 \text{ lb/día} \times 365 \text{ días/año} = 148,600 \text{ lb/año}$.

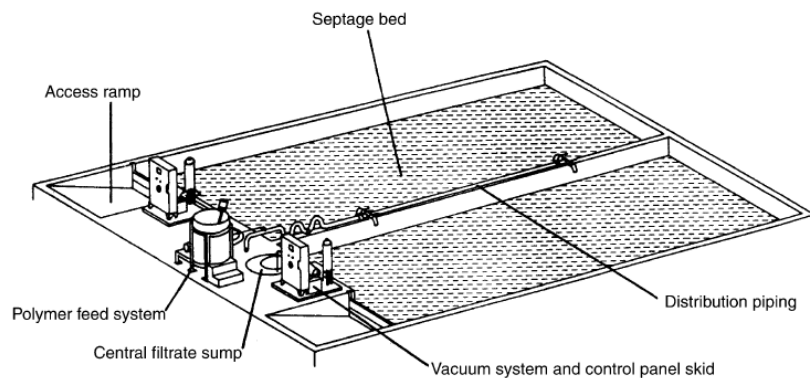
Peso de sólidos secados por cada pie cuadrado de área del lecho:

Peso por pie cuadrado = $(148,600 \text{ lb/año}) / (200 \text{ ft} \times 20 \text{ ft}) = 37 \text{ lb/año/ft}^2[1]$.

Como resultado final es que el peso de sólidos que se puede secar cada año por cada pie cuadrado de área del lecho de secado es de 37 libras. Siendo un dato anual per cápita que se utiliza de 2 ft^2 por persona, de la información se considera que sirve a un sector de 5600 habitantes se genera un área de 11200 ft^2 de área para el secado y al final se tiene un área útil de 1040 m^2 .

Este es un sistema relativamente nuevo para deshidratar lodos químicos. Consiste en una cama de secado compuesta por un medio permeable al que se aplica lodo tratado con polímeros a profundidades de aproximadamente 30 cm (1 pie), y se permite que drene por gravedad. Luego se aplica vacío y se mantiene hasta que la superficie del lodo se agrieta. El pastel de lodo está listo para ser retirado por cargadores frontales especialmente equipados con cubos de fondo de goma. Después de un paso de lavado, el proceso puede reiniciarse. El proceso se ilustra esquemáticamente en la Figura 7.

Figura 7. Sistema de secado de lodos



Fuente: David Hendrics, 2020. Unit Process Wastewater treatment

Hay sistemas patentados de tres fabricantes diferentes disponibles. Estos sistemas son bastante similares y se basan en el concepto de que un vacío aplicado a una manta permeable cargada de lodo mejora significativamente la eficiencia de deshidratación.

Este sistema de deshidratación de lodos sépticos puede tener varias ventajas:

- Simplicidad en la construcción.
- Capacitación y atención mínimas del operador.
- Capacidad para producir pastel de lodo transportable en 24 horas.
- Bloques porosos que resisten la obstrucción y el cegamiento y solo requieren enjuague para limpiarlos.
- Capacidad de carga alta.

Aunque las camas de secado al aire libre pueden requerir áreas grandes, la provisión de vacío reduce significativamente los requisitos de área en comparación con las camas de secado de arena convencionales. Además, la capacidad para retirar el pastel de lodo en ciclos de 24 horas o menos reduce los requisitos totales de área de la cama. Al igual que con otros sistemas de deshidratación para lodos sépticos, se requiere acondicionamiento químico antes de aplicarlo en la cama. El nivel de acondicionamiento de lodos sépticos aún no se ha probado, pero la experiencia con lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (STP) indica que la estabilización con cal o la digestión aeróbica o anaeróbica serían suficientes antes del tratamiento con polímeros. Se afirma que se logra un contenido de sólidos en el pastel de lodo que oscila entre el 15% y el 25% en 24 horas o menos, lo que es un

rendimiento muy alto en comparación con las camas de secado de arena por gravedad (5,52,56). Este sistema de deshidratación parece ser adecuado para el tratamiento independiente de lodos sépticos, ya que combina la simplicidad de un sistema de deshidratación por gravedad con las tasas de deshidratación rápidas de un sistema mecánico. Dado que en muchos casos los sistemas de tratamiento de lodos sépticos independientes pueden ser pequeños y estar ubicados en áreas relativamente remotas, un sistema simple y eficiente con bajos requisitos de mantenimiento es muy deseable.

Según el patrón de generación de lodos sépticos y las condiciones climáticas, generalmente estas camas requerirán recintos calefaccionados en las regiones del norte. Actualmente no hay datos de rendimiento sobre la aplicación de este sistema al tratamiento de lodos sépticos. Las camas de secado de arena convencionales pueden cargarse desde 10 hasta 270 kg de sólidos secos/m²/año (2-55 lb/ft²/año), según el tipo de lodo, el clima, el nivel de sequedad requerido y si la cama está cubierta o descubierta. La carga para las camas de secado de lodo asistidas por vacío ha variado hasta 950 kg de sólidos secos/m²/año (195 lb/ft²/año), con adiciones típicas de polímeros entre 2 y 6 kg/T de sólidos secos (4 y 12 lb/t). Los fabricantes afirman que es posible una carga significativamente mayor (53). Aquí, 1T = 1000 kg y 1t = 2000

La planta de La Maná tiene una producción total de lodo de 0.5 MGD (millones de galones por día), que se bombea a los lechos de secado a una altura dinámica total de 40 pies con una eficiencia de cable a agua del 60%. Se determinó el consumo energético anual total.

Lechos de secado: 427

1. Según la ecuación (2), el requisito de energía de bombeo es:

$$E_p = 3.89 \times 10^6 \cdot Q \cdot TDH \cdot \epsilon 100$$

$$= 3.89 \times 10^6 \cdot 0.50 \cdot 40 \cdot 60 100 = 129.7 \times 10^6 \text{ Btu/año}$$

2. Según la ecuación (3), las necesidades de energía para el raspado mecánico son:

$$Ems=(3.2\times 10^6\text{Btu/año/MGD})\cdot(Q\text{MGD})$$

$$=3.2\times 10^6\cdot 0.5=1.6\times 10^6\text{Btu/año}$$

3. Según la ecuación (4), el consumo de energía para la reposición de arena es:

$$Esr=10\%\text{de}Ems$$

$$Esr=0.10\cdot 1.6\times 10^6=0.16\times 10^6\text{Btu/año}$$

4. La energía total anual consumida en Btu/año es:

$$Et=Ep+Ems+Esr$$

$$Et=129.7\times 10^6+1.6\times 10^6+0.16\times 10^6=131.46\times 10^6\text{Btu/año}$$

5. Por lo tanto, el consumo energético anual total ET en kWh/año es:

$$ET=131.46\times 10^6\text{Btu/año}\cdot 2.928\times 10^{-4}\text{kWh/Btu}$$

$$=38,500\text{kWh/año}$$

NOMENCLATURA:

- Cae: costo de administración e ingeniería, USD
- Cc: costo de construcción de los lechos de arena, USD
- Ct: costo de capital total, USD
- Ems: consumo de energía para el raspado mecánico, Btu/año
- Ep: consumo de energía de bombeo, Btu/año
- En: consumo de energía para la reposición de arena, Btu/año
- Et: consumo energético anual total, Btu/año
- ET: consumo energético anual total, kWh/año
- Q: caudal, MGD
- t: tonelada (tonelada inglesa)
- T: tonelada métrica (tonelada métrica)
- TDH: altura dinámica total, pies
- ϵ : eficiencia de cable a agua, %"

5.2.1. *Porcentaje de humedad*

Para obtener el porcentaje de humedad, se utilizó los datos del peso inicial y peso final de la tabla 7 y se reemplazó aplicando la fórmula 1 antes mencionada en el presente proyecto de investigación, los resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 11. Porcentaje de humedad de las muestras

PRIMER SECADO DE MUESTRAS		SEGUNDO SECADO DE MUESTRAS		TERCER SECADO DE MUESTRAS	
% Humedad		% Humedad		% Humedad	
M1	23,95	M1	20,17	M1	17,04
M2	19,40	M2	19,19	M2	12,81
% Humedad		M3	13,35	M3	12,59
M3	16,45	M4	18,39	M4	12,49
M4	16,41	M7	13,48	M5	12,88
		% Humedad		M6	12,37
		M5	15,88		
		M6	15,59		

Elaborado por: La investigadora, 2024.

En esta tabla se puede observar el porcentaje de humedad de cada una de las muestras, por tanto se ha calculado el promedio del porcentaje de humedad, obteniendo como resultados el 16,01% de humedad.

5.3. Revalorización de los lodos residuales mediante la síntesis con biochar.

A partir de la tabla 3, se generó la tabla 9 de los tipos de pirólisis utilizados en el proyecto de investigación, para la realización del biochar con su respectiva variación de tiempo.

Tabla 12. Pirólisis realizadas para obtención de biochar

Proceso	Velocidad de calentamiento	Temperatura °C máxima	Tiempo de residencia	Productos
---------	----------------------------	-----------------------	----------------------	-----------

Carbonización	Muy Lenta		350 a 400	30 minutos	Biochar
Pirólisis Lenta	0,01- 2 Lenta	°C/s	400 a 500	20 minutos	Biochar
Pirólisis Convencional	Lenta		500 a 600	10 minutos	Biochar

Elaborado por: La investigadora, 2024.

Como se puede observar en la tabla 9, se realizó 3 tipos de pirólisis para los dos tipos de biomasa y son la carbonización a 350°C por 30 minutos, la pirólisis lenta a 400°C por 20 minutos y la pirólisis convencional a 500°C por 10 minutos, cabe recalcar que al aumentar la temperatura se debe disminuir el tiempo de residencia de la muestra, para evitar la quema excesiva de la misma y el exceso de cenizas. Una vez terminado el proceso se apagó el equipo y se dejó que enfríe por un lapso de 24 horas dentro de la mufla y del desecador para impedir la absorción de humedad del ambiente previo a su almacenamiento como se puede observar en el anexo 6.

Tabla 13. Datos de biochar obtenido

Temperatura 350°C			
Muestras	Tiempo (minutos)	Peso inicial (g)	Peso final (g)
M1	30	32,36	16,34
M7	30	32,38	14,86
M8	30	26,03	12,94
Muestras	Tiempo (minutos)	Peso inicial (g)	Peso final (g)
M2	30	12,50	6,50
M5	30	12,50	6,10

M6	30	12,50	6,98
-----------	----	-------	------

Temperatura 400°C

Muestras	Tiempo (minutos)	Peso inicial (g)	Peso final (g)
M9	20	20,62	8,40
M10	20	19,54	9,32
M12	20	23,97	10,17

Muestras	Tiempo (minutos)	Peso inicial (g)	Peso final (g)
M3	20	12,50	5,68
M4	20	12,50	5,90
M11	20	12,50	6,20

Temperatura 500°C

Muestras	Tiempo (minutos)	Peso inicial (g)	Peso final (g)
M13	10	21,90	8,45
M14	10	20,52	8,72
M17	10	25,55	10,47

Muestras	Tiempo (minutos)	Peso inicial (g)	Peso final (g)
M15	10	12,51	5,16
M16	10	12,51	5,42
M18	10	13,08	5,80

Elaborado por: La investigadora, 2024.

Se puede observar la cantidad de biochar obtenido en cada pirólisis a diferentes temperaturas, por tanto, se ha calculado el promedio del total de pérdida de peso, obteniendo como resultado que la M5_6 mayor pérdida de peso con un promedio de 13,69 g a comparación de las otras medias.

5.3.1. . Porcentaje de cenizas

Los resultados obtenidos del cálculo del porcentaje de cenizas utilizando la fórmula 2, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 14. Porcentaje de cenizas del biochar

Temperatura 350°C	
Muestras	% Cenizas
M1	50,49
M7	45,89
M8	49,71
Muestra	% Cenizas
M2	52,00
M5	48,80
M6	55,84
Temperatura 400°C	
Muestra	% Cenizas
M9	40,74
M10	47,70
M12	42,43
Muestra	% Cenizas
M3	45,44

M4	47,20
M11	49,60
Temperatura 500°C	
Muestra	% Cenizas
M13	38,58
M14	42,50
M17	40,98
Muestra	% Cenizas
M15	41,25
M16	43,33
M18	44,34

Elaborado por: La investigadora, 2024.

En esta tabla se puede observar el porcentaje de cenizas de cada una de las muestras, por tanto, se ha calculado el promedio del porcentaje de cenizas, obteniendo como resultados el 44,34% de cenizas para el biochar de 47,53% de cenizas.

5.4. Evaluación de eficiencia del biochar a través de contaminación de agua con metales pesados.

5.4.1. Marcha analítica de metales pesados del Grupo I- Mercurio (Hg)

Una vez contaminada la muestra de agua con mercurio e identificada su presencia con una correcta dilución, se utilizó en total 80 mL (anexo 12) de muestra problema para cada prueba de remoción de mercurio del agua.

5.5. Análisis de eficacia de la remoción de mercurio

5.5.1. Carga óptima

Una vez realizadas las pruebas para la determinación de la carga óptima se presenta los resultados cualitativos obtenidos en la tabla 12:

Tabla 15. Proceso cualitativo de remoción en función de la carga óptima

Parámetro	Muestra	
Presenta/No	350°C	
Hg	0,5 g	5 g
	No	No
	No	Si
	No	Si
	400°C	
Hg	0,5 g	5 g
	No	Si
	No	No
	No	No
	500°C	
Hg	0,5 g	5 g
	No	Si
	No	No
	No	No

Elaborado por: La investigadora 2024.

Se obtiene como resultados que a mayor cantidad de biochar la remoción de mercurio del agua es más eficiente y que el biochar con mayor eficiencia de remoción es el producido a 350°C, seguido por el de biochar a 400°C y el biochar a 350°C, y los menos eficientes en el proceso de remoción son el biochar de a 400°C

y 500°C y el biochar a 500°C, se debe a que proceso de pirólisis a mayor temperatura deben mantener estrictamente condiciones de ausencia de oxígeno.

Según Constante Tamayo & Machado Muñoz (2020), comprobaron que el biochar producido a 350°C tiene mayor eficiencia que el biochar producido a 500°C, ya que garantiza un rendimiento de 39,93% y un porcentaje de cenizas de 16,85% siendo el de mayor cantidad a comparación del biochar generado a 500°C, comprobando que a mayor temperatura el biochar tiene menor rendimiento al momento de utilizarlo para remoción de metales o abono agrícola, entre otros usos.

También Macías Cedeño (2021), comprobó que el biochar producido a 350°C es un buen medio filtrante de contaminantes presentes en muestras de agua, ya que mantiene el 90,43% de humedad y presenta un rendimiento del 61,65%, en su caso siendo más eficiente que el biochar producido a 375°C, nuevamente se comprueba que a mayor temperatura el biochar disminuye su rendimiento de remoción de contaminantes del agua.

Por último, Palomino Quispe & Rodriguez Flores (2019), de igual manera comprobaron que el parámetro más significativo en el proceso de pirólisis es la temperatura, obteniendo mejores porcentajes de adsorción de metales pesado a menores temperaturas, es decir el biochar de 350°C es más eficiente que el biochar producido a 450°C y 550°C en su investigación.

Con estas comparaciones bibliográficas comprobamos que el biochar más eficiente fue a 350°C y que el parámetro de temperatura juega un rol importante en el rendimiento del mismo para el proceso de remoción, ya que a mayor temperatura el biochar disminuye su rendimiento de remoción.

5.5.2. *Tabla de frecuencias*

Los resultados obtenidos de la tabla de frecuencias a partir de los datos de la tabla 12 son los siguientes:

Tabla 16. Tabla de frecuencias para % de eficacia de remoción.

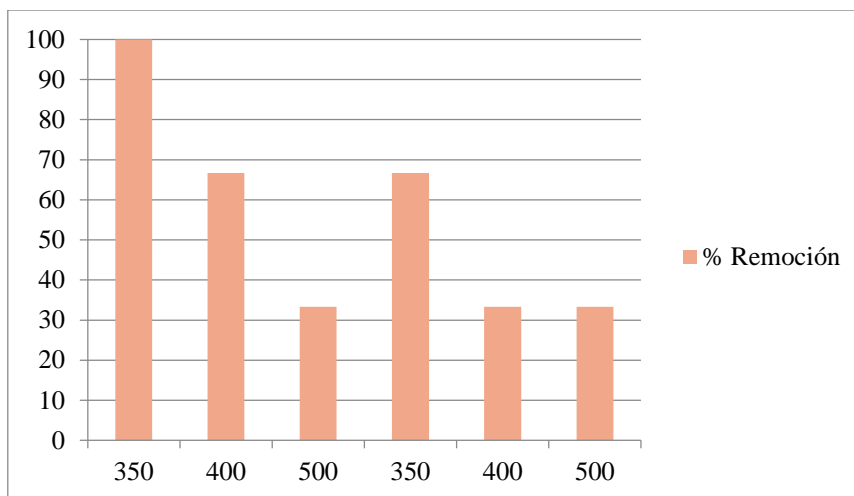
Biochar	Remoción a 5 g	Temperatura	F. absoluta	F. relativa	F. relativa %
M1_2	SI	350	3	1	100

	NO	350	0	0	0
	Total		3	1	100
	Remoción a 5 g	Temperatura	F. absoluta	F. relativa	F. relativa %
	SI	400	2	0,67	66,67
M2_3	NO	400	1	0,33	33,33
	Total		3	1,00	100
	Remoción a 5 g	Temperatura	F. absoluta	F. relativa	F. relativa %
	SI	500	1	0,33	33,33
M3_4	NO	500	2	0,67	66,67
	Total		3	1,00	100
	Remoción a 5 g	Temperatura	F. absoluta	F. relativa	F. relativa %
	SI	350	2	0,6667	66,67
M5_6	NO	350	1	0,3333	33,33
	Total		3	1	100
	Remoción a 5 g	Temperatura	F. absoluta	F. relativa	F. relativa %
	SI	400	1	0,33	33,33
M6_7	NO	400	2	0,67	66,67
	Total		3	1,00	100
	Remoción a 5 g	Temperatura	F. absoluta	F. relativa	F. relativa %
	SI	500	1	0,33	33,33
M7_8	NO	500	2	0,67	66,67
	Total		3	1,00	100

Elaborado por: La investigadora, 2024.

Los resultados obtenidos justifican a los resultados antes mencionados en la tabla 12, evidenciando que el mejor tratamiento para la remoción de mercurio del agua es el biochar 350°C con un porcentaje de eficacia de remoción del 100%, seguido por el de biochar de a 400°C con un porcentaje de eficacia de remoción del 66,67% y el biochar a 350°C con un porcentaje de eficacia de remoción del 66,67%, y los menos eficientes en el proceso de remoción son el biochar a 400°C y 500°C y el biochar a 500°C con un porcentaje de eficacia de remoción del 33,33%.

Figura 8. Gráfica estadística del % de eficacia de remoción de Mercurio del agua



Elaborado por: La investigadora, 2024.

En la figura se puede evidenciar los porcentajes de la eficacia de remoción antes mencionados, con lo cual se acepta la Hipótesis alternativa ya que la aplicación de al menos uno de los biochar, si tiene un efecto significativo en la remoción del mercurio presente en el agua contaminada, al mismo tiempo que mejora la calidad de dicha agua comprobado mediante la reacción química del HCl 6M correspondiente a la marcha analítica de metales pesados del grupo I, tomando en cuenta que a mayor cantidad de biochar la eficacia de remoción aumenta.

5.6. Caracterización de biochar

Los resultados del análisis físico- químico del biochar producido a 350°C, se evidencia en la tabla 14.

Tabla 17. Caracterización físico- química del biochar a 350°C.

Parámetro	Método/ Técnica	Análisis de resultados
pH	EPA 9045 C (Electrometría)	Presenta un pH de 9,47 considerado alcalino

Conductividad	APHA 2510 B (Electrometría)	Presenta una conductividad de 32,7 mS/cm
Humedad	Infrarrojo (Termogravimetría)	Presenta un porcentaje de humedad de 1,55%
Cenizas	(Termogravimetría)	Presenta un porcentaje de cenizas de 15,24%P
Materia volátil (carbono fijo)	(Termogravimetría)	Presenta un total de carbono fijo de 42,53%P
Tamaño de partícula y granulometría	Fotografía (Camsizer)	Presenta tamaños de partículas de 0,5 mm, 2,45 mm, 4,40 mm, 6,35 mm, 8,30 mm, 10,25 mm, 12,20 mm, 14,15 mm, 16,10 mm, 18,05 mm y 20 mm, es decir que su tamaño oscila entre los 0,5 mm y 20 mm, a su vez la gráfica estadística nos muestra la distribución de las partículas, donde la concentración mayor es del 18,71% con un

tamaño de partícula
de 8,30 mm.

Elaborado por: La investigadora, 2024.

La Tabla 17 presenta una variedad de usos para los lechos de secado de lodos en el proceso de deshidratación del lodo séptico. Según los datos, los ejemplos proporcionados muestran distintas combinaciones posibles de periodos de secado y agentes químicos acondicionadores para obtener diferentes concentraciones de sólidos en la torta deshidratada. Feige observó que añadir alrededor de 90 kg de cal por tonelada de sólidos secos (aproximadamente 180 libras de cal por tonelada) resultaba en una torta con un 25% de sólidos en 6 días, y un 38% en 19 días. Los experimentos de Condren demostraron que el lodo tratado con alumbre alcanzaba un 15% de sólidos en la torta después de un día, mientras que el lodo tratado con cloruro férrico y cal lograba un 10-11% de sólidos después de dos días. Por otro lado, el tratamiento con cal ácida llevaba a obtener una torta con un 24% de sólidos en dos días. Perrin analizó las propiedades de deshidratación del septage en pruebas de laboratorio, utilizando el tiempo de succión capilar (CST) como medida de referencia. Descubrió que el lodo con un CST de 50 segundos dejaba de drenar por sí solo en un lecho de secado de arena en 48 horas o menos, resultando en una torta con aproximadamente un 20% de contenido de sólidos. Los estudios de Shaboo y Crowe indicaron que un CST de 50 segundos se podría alcanzar tratando el lodo con 0.1-0.2 kg de cal por kg de sólidos secos. No obstante, no es posible comparar estos dos valores de CST directamente debido a las diferencias en los sólidos totales y los métodos de prueba empleados. La evaporación es un factor clave en la eficacia de la deshidratación en lechos de arena, por lo que la profundidad de aplicación del lodo es un aspecto crucial para el diseño y operación del sistema. Un estudio reveló que el lodo tratado químicamente se deshidratava más eficientemente a una profundidad de 15 cm que a 30 cm. Con base en esto y en otros estudios piloto y a gran escala, se sugiere una profundidad de aplicación de 20 cm para el lodo. El periodo de secado depende del drenaje y la evaporación, siendo el drenaje el principal mecanismo en lechos de arena, que suele completarse en 7-10 días. Sin embargo, la evaporación también puede contribuir de manera significativa a la

deshidratación, especialmente hacia el final del periodo de secado. El tiempo promedio de secado es de 2-4 semanas, pero el tratamiento previo puede reducir este tiempo a 10-15 días para el lodo tratado. La Tabla 17 resume los resultados de varios estudios sobre la deshidratación de lodos en lechos de arena. Aunque los estudios a pequeña escala y las pruebas piloto sugieren un tiempo de secado de 2 a 6 días, se estima que las operaciones a gran escala pueden requerir un periodo más largo. El secado en lechos de arena es un método simple para la deshidratación de lodos, con ventajas como su construcción simple, mínima capacitación y supervisión requerida, y bajos costos de capital y operación. Las desventajas incluyen la necesidad de grandes áreas de arena y posibles dificultades operativas durante temporadas frías y húmedas, a menos que los lechos estén cubiertos.

6. CONCLUSIONES

- El tema de diseño de un sistema de secado de lodos sépticos estuvo sustentado en la información climatológica y en la metodología de camas de secado por cables, en donde se aprovechó un factor de 2,5 ft² por habitante para generar un área de la cama adecuada, siendo esta un área de 1040 m², y además se estableció una probabilidad de precipitación del 50% diario por lo que se propone establecer una cobertura de lona de geo membrana. el consumo energético anual total ET en kWh/año $131.46 \times 10^6 \text{ Btu/año} \cdot 2.928 \times 10^{-4} \text{ kWh/Btu} = 38,500 \text{ kWh/año}$.
- Además, se debe considerar la alta presencia de cromo en el lodo activado, estableciendo la presencia de actividades industriales que envían sus aguas residuales al sistema de alcantarillado, esto puede ser un gran problema al momento de establecer tratamientos secundarios en las piscinas de oxidación y generar mala calidad de agua. ara evaluar la capacidad de los biochar para eliminar mercurio, se utilizó un diseño experimental cualitativo que incluyó 12 tratamientos diferentes.
- Se llevó a cabo un análisis cualitativo de metales pesados del Grupo I para determinar la carga óptima y detectar la presencia de mercurio en el agua, lo cual se hizo observando una coloración blanca polvorienta. Los

resultados indicaron que cuanto mayor es la cantidad de biochar, más eficiente es la eliminación de mercurio del agua. Se encontró que el biochar producido a 350° C es el más eficaz en el proceso de eliminación de mercurio, con una eficacia de tratamiento del 100%. Además, este biochar tiene un pH de 9,47 (alcalino), una conductividad de 32,7 mS/cm, una humedad del 1,55%, un contenido de cenizas del 15,24%P, materiales volátiles del 42,53%P y un tamaño de partícula que varía entre 0,5 mm y 20 mm.

- Se realizó una evaluación cualitativa de metales pesados mediante marcha analítica, esto dio un indicador que el biochar puede ser usado como mejorador de suelo y filtro de aguas, debido a que no se detectó el indicador químico de la presencia de metales en el agua resultante del filtrado. Esto garantiza que se puede cumplir lo establecido en la tabla 2 del anexo tres del Acuerdo Ministerial 097 A, mediante la adecuación del lodo por medio de cascarilla de arroz, un material relativamente barato y adecuado en costos operativos.

7. RECOMENDACIONES

- Establecer nuevos métodos de pirolisis para caracterizar el biochar de manera más efectiva debido a que en la caracterización del lodo se estimó niveles altos de cromo, pudiendo contribuir a la disolución de metales pesados en aguas y suelos.
- En cuanto a las camas de secado debería probarse otros diseños como son camas de arena y pavimentadas para mejorar la experiencia de secado en zonas de alta precipitación como es el cantón La Maná. Establecer puntos críticos para mejorar el consumo energético de operación del sistema. Establecer medidas en el las PTAR para no receptor aguas con metales pesados, esto perjudica directamente al sistema biológico de tratamiento.
- La revalorización de los lodos activados debe estudiarse de manera profunda desde el punto de vista de radicales orgánicos dirigidos a la captura de metales pesados, y así industrializar el proceso para tener un insumo importante para la remediación de agua.

8. BIBLIOGRAFIA

- Aguilar-Torrejón, J. A., Balderas-Hernández, P., Roa-Morales, G., Barrera-Díaz, C. E., Rodríguez-Torres, I., & Torres-Blancas, T. (2023). Relación, importancia y desarrollo de técnicas analíticas: DQO, DBO y TOC en agua: una visión general a lo largo del tiempo. *SN Applied*
- Arévalo Moscoso, P., & Lituma Vintimilla, P. (2010). Digestión de lodos residuales de las lagunas de oxidación de Ucubamba, Cuenca Centro de Investigación y Valoración de la Biodiversidad (CIVABI), Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. 1.
- Barzola, F., & Reyes, W. (2019). Diseño básico de una planta piloto de pirólisis para valorización de lodos. (<https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/52973>)
- Bastidas Chávez, P. I., Malacatus Cobos, P. N., & Chuquitarco Moreno, P. A. (2019). Análisis químico y de peligrosidad de lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales en la industria de palma. Universidad Central del Ecuador.
- Blagojevic, V., Sustersic, V., & Bozickovic, S. (2017). Pyrolysis and gasification in the process of sewage sludge treatment. *Zastita Materijala*, 58(3), 305–312. <https://doi.org/10.5937/zasmat1703305b>
- Bastidas Chávez, P. I., Malacatus Cobos, P. N., & Chuquitarco Moreno, P. A. (2019). Análisis químico y de peligrosidad de lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales en la industria de palma. Universidad Central del Ecuador.
- Cárdenas, G. (2022). Alternativas de gestión de lodos residuales. Caso de estudio: Laguna de estabilización de Ábrego, Norte de Santander.
- Chávez, I. (2017). Diseño e Implementación De Un Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales. *Dominio de Las Ciencias*, 3(1), 536–560. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6134928>
- Chivatá, D., & Duarte, C. (2018). Diseño conceptual de una planta para el

aprovechamiento de caucho molido de neumáticos usados a partir de pirólisis. *Energies*, 6(1), 1–8.

Chong, G. (2011). Diseño de un modelo de gestión para el desarrollo sostenible y competitivo de las pequeñas unidades agrícolas rurales del Perú. Una experiencia aplicada en el valle de Virú. Peru. <https://hdl.handle.net/10535/7913>

David Hendrics, 2020. Unit Process Wastewater treatment.

Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Campo, J., Valtierra, E., & Etchevers, J. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34, 367–382.

Eckenfelder, W., & O'Connor, D. (2024). Annual solid loadings per unit bed area for various types of wastewater sludges. *Journal of Wastewater Treatment*, 8(2), 30-44.

García Martínez, E.M., Fernández Segovia, I., & Fuentes López, A. (2019). Determinación de polifenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu. Universitat Politècnica de València

González, L. (2021). El BIOCHAR como una alternativa para la biorremediación. September.

F. Verheijen, S. Jeffery, A.C. Bastos, M. van der Velde, I. (2010) Diafas. Biochar Application to Soils. European Communities. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=repl>

Furman, P. (2024). Drying of digested primary sludge and trickling filter humus in Florida. *Journal of Sludge Management*, 38(1), 15-27.

Furman, P. (2024). Drying of digested primary sludge and trickling filter humus in Florida. *Journal of Sludge Management*, 38(1), 15-27.

Javeriana University. (n.d.). Análisis cuantitativo de cromo en aguas residuales Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia

Medina-Herrera, M. D. R., Negrete-Rodríguez, M. de la L. X., Gámez-Vázquez, F. P., Álvarez-Bernal, D., & Conde-Barajas, E. (2020). La aplicación de lodos

residuales afecta, a corto plazo, la biomasa microbiana y su actividad en suelos sódicos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(3), 577–591. <https://doi.org/10.20937/RICA.53425>

NIST. (2024). pH Metrology. NIST. (2024). pH Metrology. Enlace : Pratt, K., Buck, R., Rondinini, S., Covington, A., Baucke, F., Brett, C., Camoes, M., Milton, M., Mussini, T., Naumann, R., Spitzer, P., & Wilson, G. (2002). *Measurement of pH: Definition, Standards, and Procedures (IUPAC Recommendations 2002)*. Pure and Applied Chemistry.

Oropeza, G. (2016, noviembre 11). Lodos residuales: Estabilización y manejo.

Pratt, K., Buck, R., Rondinini, S., Covington, A., Baucke, F., Brett, C., Camoes, M., Milton, M., Mussini, T., Naumann, R., Spitzer, P., & Wilson, G. (2002). *Measurement of pH: Definition, Standards, and Procedures (IUPAC Recommendations 2002)*. Pure and Applied Chemistry.

Quichimbo, P., Guamán, J., Cajamarca, M., & Aguirre, A.J. (2016). Evaluación del contenido de humedad del suelo por gravimetría y reflectometría. *ECUADOR ES CALIDAD: Revista Científica Ecuatoriana*, 2016, Especial de Suelos1.

Ramírez Avila, J. (2014). *Análisis de metales pesados en aguas residuales*. Editorial Científica Internacional.

Seck, A., Gold, M., Niang, S., Mbéguéré, M., Diop, C., & Strande, L. (2015). Faecal sludge drying beds: increasing drying rates for fuel resource recovery in Sub-Saharan Africa. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 5(1), 72-80.

Smith, J., & Johnson, L. (2024). *Qualitative Approach in Wastewater Sludge Treatment*. City: Publisher.

Tejada Tovar, C., et al. (2012). Título del artículo. *Revista de Contaminación Ambiental*, 20(3), 123-135.

UNE-EN ISO 5667-13:1998. *Calidad del agua. Muestreo. Parte 13: Guía para el muestreo de lodos procedentes de aguas residuales y de las instalaciones de tratamiento del agua*.

Universidad de América. (2018). Propuesta para la recuperación y reutilización de cromo en lodos galvánicos de Ingecrom Ltda. A nivel laboratorio Programa de Ingeniería Química, Bogotá, D.C. 2.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2001). Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solid, and Semisolid Samples. Enlace

9. ANEXOS

1. Resultados de laboratorio



AGRORUM
Asesoría Agroindustrial Ambiental

INTO@agrorum.net

Informe Analítico: IA-24-LB-000639-01

Lab-ID: GYE-24/0449 1 al 2

IBAÑEZ ESQUIVEL GABRIELA MARITZA

attn.Ibañez Esquivel Gabriela Maritza
gabymaryie@hotmail.com
El Oriente N 2 SN y SN
La Maná - Ecuador

Lugar de ejecución del ensayo:

AGRORUM S.A. (Asesoría Agroindustrial Ambiental)
info@agrorum.net
Cda. Kennedy, Av. San Jorge # 205 y calle 2da. Oeste
Guayaquil - Ecuador

DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE	
Matriz de la muestra:	Lodos y residuos orgánicos
Descripción de la muestra:	Lodos de PTAR - Sitio Punto 1 - Muestra 1 y 2
Lote N°:	---
Fecha/Hora/ de toma de muestra:	2024-02-06 / 10:01
Lugar de toma de muestra:	Piscina de tratamiento / Planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná
Muestra tomada por:	Ibañez Gabriela (Cliente)

DATOS DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA EN LABORATORIO	
Fecha de Recepción:	2024-02-07
Cantidad de muestra:	~ 800 g
Tipo de envase:	Funda plástica
Temperatura de Recepción:	Refrigerada

Fecha inicio:	2024-02-08
Fecha fin análisis:	2024-02-27

RESULTADOS DE ANÁLISIS

Parámetro	Unidad	Resultado	Método de ensayo
Fisicoquímicos			
Arsénico*	mg/kg	<0,5	ME-LB-245, Horno grafito
Cromo*	mg/kg	15,97	ME-LB-249, Absorción atómica - Llama
Mercurio**	mg/kg	1,1701	EPA Method 6010 D EPA 3050 B
Microbiológicos			
Coliformes fecales*	NMP/g	210,0	ME-LB-251, BAM Capítulo 4; 2020

Informe Analítico: IA-24-LB-000640-01

Lab-ID: GYE-24/0450 1 al 2

IBAÑEZ ESQUIVEL GABRIELA MARITZA

attn.Ibañez Esquivel Gabriela Maritza
gabymaryie@hotmail.com
El Oriente N 2 SN y SN
La Maná - Ecuador

Lugar de ejecución del ensayo:

AGRORUM S.A. (Asesoría Agroindustrial Ambiental)
info@agrorum.net
Cda. Kennedy, Av. San Jorge # 205 y calle 2da. Oeste
Guayaquil - Ecuador

DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE

Matriz de la muestra:	Lodos y residuos orgánicos
Descripción de la muestra:	Lodos de PTAR - Sitio Punto 2 - Muestra 3 y 4
Lote N°:	---
Fecha/Hora/ de toma de muestra:	2024-02-06 / 10:09
Lugar de toma de muestra:	Piscina de tratamiento / Planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná
Muestra tomada por:	Ibañez Gabriela (Cliente)

DATOS DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA EN LABORATORIO

Fecha de Recepción:	2024-02-07
Cantidad de muestra:	~ 650 g
Tipo de envase:	Funda plástica
Temperatura de Recepción:	Refrigerada

Fecha inicio:	2024-02-08
Fecha fin análisis:	2024-02-27

RESULTADOS DE ANÁLISIS

Parámetro	Unidad	Resultado	Método de ensayo
Fisicoquímicos			
Arsénico*	mg/kg	<0,5	ME-LB-245, Horno grafito
Cromo*	mg/kg	9,43	ME-LB-249, Absorción atómica - Llama
Mercurio**	mg/kg	1,6813	EPA Method 6010 D EPA 3050 B
Microbiológicos			
Coliformes fecales*	NMP/g	43,0	ME-LB-251, BAM Capítulo 4; 2020

Informe Analítico: IA-24-LB-000641-01
Lab-ID: GYE-24/0451 1 al 2

IBAÑEZ ESQUIVEL GABRIELA MARITZA
atn.ibañez Esquivel Gabriela Maritza
gabymaryie@hotmail.com
El Oriente N 2 SN y SN
La Maná - Ecuador

Lugar de ejecución del ensayo:
AGRORUM S.A. (Asesoría Agroindustrial Ambiental)
info@agrorum.net
Cda. Kennedy, Av. San Jorge # 205 y calle 2da. Oeste
Guayaquil - Ecuador

DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE	
Matriz de la muestra:	Lodos y residuos orgánicos
Descripción de la muestra:	Lodos de PTAR - Sitio Punto 3 - Muestra 5 y 6
Lote N°:	---
Fecha/Hora/ de toma de muestra:	2024-02-08 / 10:13
Lugar de toma de muestra:	Piscina de tratamiento / Planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná
Muestra tomada por:	Ibañez Gabriela (Cliente)

DATOS DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA EN LABORATORIO	
Fecha de Recepción:	2024-02-07
Cantidad de muestra:	~ 600 g
Tipo de envase:	Funda plástica
Temperatura de Recepción:	Refrigerada

Fecha inicio:	2024-02-08
Fecha fin análisis:	2024-02-27

RESULTADOS DE ANÁLISIS			
Parámetro	Unidad	Resultado	Método de ensayo
Fisicoquímicos			
Arsénico*	mg/kg	<0,5	ME-LB-245, Horno grafito
Cromo*	mg/kg	7,64	ME-LB-249, Absorción atómica - Llama
Mercurio**	mg/kg	1,9795	EPA Method 6010 D EPA 3050 B
Microbiológicos			
Coliformes fecales*	NMP/g	1100,0	ME-LB-251, BAM Capítulo 4; 2020

Informe Analítico: IA-24-LB-000642-01

Lab-ID: GYE-24/0452 1 al 2

IBAÑEZ ESQUIVEL GABRIELA MARITZA

attn.Ibañez Esquivel Gabriela Maritza
gabymaryie@hotmail.com
El Oriente N 2 SN y SN
La Maná - Ecuador

Lugar de ejecución del ensayo:

AGRORUM S.A. (Asesoría Agroindustrial Ambiental)
info@agrorum.net
Cda. Kennedy, Av. San Jorge # 205 y calle 2da. Oeste
Guayaquil - Ecuador

DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE	
Matriz de la muestra:	Lodos y residuos orgánicos
Descripción de la muestra:	Lodos de PTAR - Sitio Punto 4 - Muestra 7 y 8
Lote N°:	---
Fecha/Hora/ de toma de muestra:	2024-02-06 / 10:18
Lugar de toma de muestra:	Piscina de tratamiento / Planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná
Muestra tomada por:	Ibañez Gabriela (Cliente)

DATOS DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA EN LABORATORIO	
Fecha de Recepción:	2024-02-07
Cantidad de muestra:	~ 550 g
Tipo de envase:	Funda plástica
Temperatura de Recepción:	Refrigerada

Fecha inicio:	2024-02-08
Fecha fin análisis:	2024-02-27

RESULTADOS DE ANÁLISIS

Parámetro	Unidad	Resultado	Método de ensayo
Fisicoquímicos			
Arsénico*	mg/kg	<0,5	ME-LB-245, Horno grafito
Cromo*	mg/kg	7,69	ME-LB-249, Absorción atómica - Llama
Mercurio**	mg/kg	1,8891	EPA Method 6010 D EPA 3050 B
Microbiológicos			
Coliformes fecales*	NMP/g	460,0	ME-LB-251, BAM Capítulo 4; 2020



Informe Analítico: IA-24-LB-000643-01
 Lab-ID: GYE-24/0453 1 al 2

IBAÑEZ ESQUIVEL GABRIELA MARITZA
 atn.lbañez Esquivel Gabriela Maritza
 gabymaryie@hotmail.com
 El Oriente N 2 SN y SN
 La Maná - Ecuador

Lugar de ejecución del ensayo:
 AGRORUM S.A. (Asesoría Agroindustrial Ambiental)
 info@agrorum.net
 Cdla. Kennedy, Av. San Jorge # 205 y calle 2da. Oeste
 Guayaquil - Ecuador

DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE

Matriz de la muestra:	Lodos y residuos orgánicos
Descripción de la muestra:	Lodos de PTAR - Sitio Punto 5 - Muestra 9 y 10
Lote N°:	---
Fecha/Hora/ de toma de muestra:	2024-02-06 / 10:21
Lugar de toma de muestra:	Piscina de tratamiento / Planta de tratamiento de aguas residuales del cantón La Maná
Muestra tomada por:	Ibañez Gabriela (Cliente)

DATOS DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA EN LABORATORIO

Fecha de Recepción:	2024-02-07
Cantidad de muestra:	~ 750 g
Tipo de envase:	Funda plástica
Temperatura de Recepción:	Refrigerada

Fecha inicio:	2024-02-08
Fecha fin análisis:	2024-02-27

RESULTADOS DE ANÁLISIS

Parámetro	Unidad	Resultado	Método de ensayo
Fisicoquímicos			
Arsénico*	mg/kg	<0,5	ME-LB-245, Homo grafito
Cromo*	mg/kg	11,31	ME-LB-249, Absorción atómica - Llama
Mercurio**	mg/kg	1,4359	EPA Method 6010 D EPA 3050 B
Microbiológicos			
Coliformes fecales*	NMP/g	290,0	ME-LB-251, BAM Capítulo 4; 2020

Anexo 2. Pruebas DQO, pH, ST



