

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Título del trabajo

Diseño de sistema de tratamiento de aguas residuales del procesamiento de paja
toquilla en Barcelona

INGE-2882

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Ingeniería Química

Presentado por:

Nombres y Apellidos

Kevin Andrés Guananga Burgos

Diego Andrés Proaño Suarez

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

A mi familia, por el respeto reciproco que me han dado día tras día, por considerar mis avances y caídas como una oportunidad más para ser mejor. A la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), por brindarme la oportunidad de formarme académicamente y por ser el espacio donde crecí no solo como estudiante, sino como persona. A todos ustedes, gracias por ser parte de este logro. Esta tesis también les pertenece.

Diego Proaño

Declaración Expresa

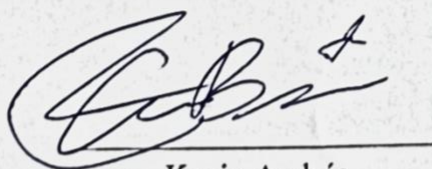
Nosotros Kevin Andrés Guananga Burgos y Diego Andrés Proaño Suarez acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

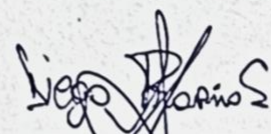
La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 29 de mayo del 2025.



Kevin Andrés
Guananga Burgos



Diego Andrés
Proaño Suarez

Evaluadores

M.Sc. María Verónica Ordoñez

Profesor de Materia

Ph.D. Carlos Javier Bucaram

Tutor de proyecto

Resumen

El trabajo presenta el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales generadas en el procesamiento artesanal de paja toquilla en la Comuna Barcelona (Santa Elena, Ecuador). Esta actividad, esencial para la economía local, produce efluentes con altas cargas de contaminantes (sólidos, DQO, DBO5, TDS y temperaturas elevadas) que actualmente se descargan sin tratamiento adecuado, generando riesgos ambientales y sanitarios.

El proyecto propone un sistema de tratamiento de bajo costo, adaptable y sostenible, compuesto por tres etapas principales: Primero, un tanque enfriador, que reduce la temperatura del agua residual ($\sim 80^{\circ}\text{C}$) hasta condiciones seguras para evitar daños en procesos posteriores; Segundo, una clarificación y sedimentación mediante coagulación-floculación (PAC + floculante aniónico), cuya prueba de jarras identificó como óptima la dosis de 40 ppm PAC y 1 ppm floculante, logrando hasta un 41 % de remoción de turbidez; Tercero, la filtración granular con antracita y arena sílica, que actúa como etapa de pulido, reteniendo flóculos finos y sólidos residuales, mejorando la calidad del efluente. El análisis económico demostró que el sistema es viable y accesible, con una inversión aproximada de \$490,26 para su implementación a escala real (tratamiento de 551,7 L/día). El sistema diseñado mejora significativamente la calidad del efluente, acercándolo a los parámetros normativos ecuatorianos (TULSMA) y es técnicamente factible, económico y de fácil operación para contextos rurales.

Palabras Clave: Paja toquilla, tratamiento de agua, pretratamiento y filtración

Abstract

This paper presents the design of a wastewater treatment system for the artisanal processing of toquilla straw in the Barcelona district (Santa Elena, Ecuador). This activity, essential to the local economy, produces effluents with high pollutant loads (solids, COD, BOD5, TDS, and high temperatures) that are currently discharged without adequate treatment, generating environmental and health risks.

The project proposes a low-cost, adaptable, and sustainable treatment system composed of three main stages: First, a cooling tank, which reduces the wastewater temperature ($\sim 80^{\circ}\text{C}$) to safe conditions to prevent damage in subsequent processes; second, clarification and sedimentation by coagulation-flocculation (PAC + anionic flocculant), whose jar test identified a dose of 40 ppm PAC and 1 ppm flocculant as optimal, achieving up to 41% turbidity removal; Third, granular filtration with anthracite and silica sand acts as a polishing stage, retaining fine flocs and residual solids, improving effluent quality. The economic analysis showed the system to be viable and affordable, with an approximate investment of \$490,26 for full-scale implementation (treatment of 551.7 L/day). The designed system significantly improves effluent quality, bringing it closer to Ecuadorian regulatory parameters (TULSMA) and is technically feasible, economical, and easy to operate in rural settings.

Keywords: Toquilla straw, water treatment, pretreatment and filtration

Índice general

Evaluadores.....	4
Resumen	5
<i>Abstract</i>	6
Siglas y abreviaturas	10
Simbología.....	11
Índice de figuras	12
Índice de tablas.....	12
Capítulo 1	13
1.1 Introducción	14
1.2 Descripción del Problema.....	15
1.3 Justificación del Problema	15
1.4 Objetivos.....	17
<i>1.4.1 Objetivo general</i>	17
<i>1.4.2 Objetivos específicos</i>	17
1.5 Marco teórico	18
<i>1.5.1 Paja toquilla</i>	18
<i>1.5.2 Parámetros fisicoquímicos</i>	19
<i>1.5.3 Tratamiento de agua.</i>	20
<i>1.5.4 Tratamiento primario.</i>	20
<i>1.5.5 Tratamiento primario especializado</i>	22
<i>1.5.6 Criterios para el uso del agua</i>	22
Capítulo 2.....	1
2.1 Descripción del proceso	2
<i>2.1.1 Tratamiento Centro de Procesamiento de la paja toquilla</i>	2
2.2 Diagnostico preliminar	4
<i>2.2.1 Producción de la paja toquilla</i>	4

2.2.2	<i>Producción del agua residual</i>	5
2.2.3	<i>Parámetros del agua residual de la paja toquilla</i>	9
2.2.4	<i>Análisis fisicoquímicos del agua según los criterios para riego</i>	10
2.2.5	<i>Análisis fisicoquímicos del agua según los criterios para agua potable</i>	11
2.3	Formulación de posibles metodologías	12
2.3.1	<i>Sistemas de tratamiento aerobio de tipo lodos activados.</i>	12
2.3.2	<i>Humedales de flujo subsuperficial. (HFS o SFS)</i>	12
2.3.3	<i>Filtros de arena intermitentes.</i>	13
2.3.4	<i>Sistema combinado de tipo séptico-filtrante con tratamiento terciario.</i>	13
2.4	Diseño a del tratamiento de agua	14
2.4.1	<i>Tanque enfriador</i>	14
2.4.2	<i>Clarificación y sedimentación</i>	15
2.4.3	<i>Solución madre.</i>	16
2.4.4	<i>Filtración por Antracita + arena sílica.</i>	17
2.4.5	<i>Operación del filtro</i>	17
2.5	Análisis económico de la escala.	20
3.	Capítulo 3	21
3.1	Resultados y análisis	22
3.1.1	<i>Análisis del tanque enfriador.</i>	22
3.1.2	<i>Análisis de prueba de Jarras.</i>	22
3.1.3	<i>Análisis de filtro de antracita + arena sílica.</i>	27
3.2	Análisis económico.	28
3.3	Protocolos	29
3.3.1	<i>Protocolo para la realización de la solución madre del PAC sólido.</i>	29
3.3.2	<i>Protocolo para la realización de la solución madre del floculante aniónico.</i>	29
3.3.3	<i>Protocolo para la realización del proceso.</i>	30
3.3.4	<i>Protocolo para retiro de sedimentos del tanque de agitación</i>	30

4.	Capítulo 4.....	31
4.1	Conclusiones y recomendaciones.	32
4.1.1	<i>Conclusiones</i>	32
4.1.2	<i>Recomendaciones</i>	32
5.	Referencias	33
6.	APENDICES.....	35

Siglas y abreviaturas

Siglas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
OMS	Organización Mundial de la Salud

Abreviaturas

Par.	Parámetros
T. ^a	Temperatura
Uds.	Unidades
mL	Mililitros
mg	Miligramos

Simbología

pH	Potencial de Hidrógeno
PPM	Partes Por Millón
NTU	Unidad Nefelométrica de Turbidez
CE	Conductividad eléctrica
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno

Índice de figuras

Figura 1. *Diagrama de proceso de la paja toquilla del Centro de procesamiento de la Paja Toquilla de Barcelona, Santa Elena.*

Figura 2. *Diagrama de flujo de la paja toquilla del Centro de procesamiento de la Paja Toquilla de Barcelona, Santa Elena.*

Figura 3. *Representación de la olla de cocción de la paja toquilla.*

Figura 4. *Representación de la olla de cocción de la paja toquilla y operación.*

Figura 6. *Esquema del tanque del enfriamiento.*

Figura 7. *Esquema del sistema de filtración.*

Figura 8. *Porcentaje de remoción de sólidos.*

Índice de tablas

Tabla 1. *Parámetros para el cumplimiento de las normativas según el criterio.*

Tabla 2. *Tabla de unidades artesana y relación con las industriales.*

Tabla 3. *Dimensionamiento de la olla de cocción.*

Tabla 4. *parámetros fisicoquímicos del agua residual a partir de los criterios para riego.*

Tabla 5. *Análisis fisicoquímicos del agua residual a partir de los criterios para agua potable.*

Tabla 6. *Análisis fisicoquímicos del agua residual a partir de los criterios para descargas.*

Tabla 7. *Condiciones de cada caso de la prueba de jarra – concentración y Revoluciones del agitador.*

Tabla 8. *Inversión económica de tanque de enfriamiento.*

Tabla 9. *Inversión económica de la prueba de jarra.*

Tabla 10. *Inversión económica de filtro antracita + arena.*

Tabla 11. *Parámetros del agua residual proveniente del tanque enfriador.*

Tabla 12. *Datos de Prueba de Jarras realizado.*

Tabla 13. *Resultados de remoción.*

Tabla 14. *Parámetros obtenidos del agua residual filtrada.*

Tabla 15. *Parámetros obtenidos del agua residual filtrada.*

Capítulo 1

1.1 Introducción

La Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), en su compromiso con el desarrollo sostenible y el fortalecimiento de las comunidades rurales del Ecuador, promueve proyectos que integran conocimientos científicos y técnicos para resolver problemáticas reales en el entorno. En este marco, el presente trabajo de titulación se enfoca en la Comuna Barcelona, una localidad ubicada en la provincia de Santa Elena, cuyo tejido económico y cultural se encuentra estrechamente vinculado con la producción artesanal de sombreros elaborados con paja toquilla (*Carludovica palmata*).

La paja toquilla es una fibra vegetal de gran valor etnobotánico y socioeconómico, reconocida por su calidad y por ser materia prima del tradicional sombrero de paja toquilla, declarado Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad por la UNESCO. A pesar de su importancia, el proceso artesanal de tratamiento de la paja implica actividades como el cocido, lavado, desinfección y secado de la fibra, que generan aguas residuales con carga orgánica y presencia de contaminantes como sólidos en suspensión entre otros. La falta de tratamiento adecuado de estos efluentes constituye una fuente potencial de contaminación ambiental, afectando cuerpos de agua cercanos y generando impactos negativos sobre la salud pública y la biodiversidad local.

Actualmente, en la Comuna Barcelona no existen sistemas formales de tratamiento para este tipo de aguas residuales. Las descargas se realizan de forma directa al alcantarillado y ambiente, sin un análisis previo de sus características ni del riesgo ambiental que representan. Esta situación refleja la necesidad urgente de implementar soluciones tecnológicas apropiadas, que sean eficientes, de bajo costo, fáciles de operar y mantener, y que se adapten al contexto rural de la comunidad.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales generadas durante el procesamiento artesanal de paja toquilla, considerando criterios técnicos, ambientales y socioeconómicos. La metodología se basa en la caracterización preliminar del

proceso, el análisis de alternativas tecnológicas apropiadas y la aplicación de principios de ingeniería química, con el fin de proponer una solución sostenible y replicable en otras comunidades con actividades similares.

El objetivo del proyecto no solo es un estudio y mejora en la calidad del efluente del Centro de Procesamiento de Paja Toquilla ambiental de la comuna, sino también el fortalecer el vínculo entre la academia y las comunidades, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), como parte de la misión institucional de ESPOL.

1.2 Descripción del Problema

La producción del centro de procesamiento de paja toquilla en la comuna Barcelona, provincia de Santa Elena, genera aproximadamente 201381.45 L/año, provenientes principalmente de la cocción de la fibra vegetal. Actualmente, este efluente solo recibe un tratamiento primario mediante una cisterna que funciona como sedimentador, cuya eficiencia se ha visto comprometida debido a la falta de mantenimiento, lo que ha ocasionado la descarga de aguas insuficientemente tratadas directamente al alcantarillado y al río. Esta situación representa un riesgo ambiental y sanitario para la comunidad, evidenciando la necesidad urgente de implementar una alternativa de tratamiento que garantice el cumplimiento de la normativa ambiental vigente en Ecuador.

1.3 Justificación del Problema

La elaboración de sombreros de paja toquilla en la comuna Barcelona es una actividad artesanal que ha sostenido económica y culturalmente a muchas familias de la zona durante generaciones. No obstante, este proceso genera aguas residuales con alta carga de materia orgánica, sólidos y residuos químicos que, al no recibir un tratamiento adecuado, son descargadas directamente a áreas

directamente al alcantarillado, a los ríos y para riego. Esta situación plantea un problema ambiental relevante y un riesgo sanitario para la comunidad.

Actualmente, el tratamiento se limita a una cisterna que funciona como sedimentador, pero no recibe mantenimiento ni seguimiento técnico. Esta deficiencia operativa compromete su función y permite que contaminantes lleguen al entorno natural. La falta de protocolos técnicos, de monitoreo de calidad del agua y de conocimiento sobre la magnitud de la contaminación evidencia la necesidad de una intervención integral que proponga soluciones sostenibles, replicables y de bajo costo.

Este proyecto se justifica en no solo identificar y reducir el impacto ambiental del proceso artesanal, sino también en empoderar a la comunidad con herramientas prácticas para operar y mantener un sistema de tratamiento funcional. A nivel académico, la propuesta permite aplicar conocimientos de ingeniería química y ambiental en un contexto real y de escasos recursos, promoviendo el desarrollo de soluciones socialmente pertinentes y ambientalmente responsables. Desde una proyección social, se espera que la implementación de un sistema de tratamiento a escala contribuya a la mejora de la calidad del agua descargada, a la protección de la salud de la población y al cumplimiento normativo, lo que podría abrir nuevas oportunidades de comercialización del producto artesanal bajo estándares de sostenibilidad ambiental.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un programa de tratamiento y mantenimiento de la cisterna utilizada como sedimentador en el centro de procesamiento de paja toquilla de la comuna Barcelona, provincia de Santa Elena, para mejorar la eficiencia en la remoción de contaminantes del efluente generado y asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente en Ecuador, mediante la implementación de protocolos técnicos de limpieza y seguimiento periódico del sistema.

1.4.2 Objetivos específicos

Medir los parámetros fisicoquímicos y orgánicos del agua residual generada del proceso de la paja toquilla, mediante un análisis de laboratorio, para la identificación del incumplimiento de las Normativas TULSMA para riego y para deposición de alcantarillado.

Realizar pruebas experimentales a nivel laboratorio con distintas alternativas de tratamiento, para identificar el método más efectivo en la reducción de contaminantes presentes en el agua residual.

Diseñar una propuesta de sistema de tratamiento a escala, basada en los resultados experimentales, para la regulación del impacto ambiental generado por la actividad artesanal en la Comuna Barcelona.

1.5 Marco teórico

1.5.1 *Paja toquilla*

La paja toquilla es la fibra extraída de una planta herbácea del género *Carludovica palmata*, conocida como palma de toquilla, jipijapa, palmiche, entre otros nombres. Esta fibra vegetal es sumamente flexible, ligera y resistente, ideal para el tejido artesanal de sombreros de alta calidad, así como bolsos, cinturones y otros accesorios. Tradicionalmente, la paja toquilla se cultiva en la costa ecuatoriana, especialmente en Manabí (localidades como Pile, Montecristi, Jipijapa y San Lorenzo), y también en las provincias de Guayas, Esmeraldas y en áreas de Santa Elena (Institut National du Patrimoine Culturel, 2010). La planta *Carludovica palmata* estas zonas poseen suelos húmedos adecuados para el crecimiento de la palma. La palma no posee un tallo leñoso, por el contrario, desarrolla rizomas subterráneos con raíces fasciculadas que permiten sostener los brotes de la planta; normalmente los brotes (tallos) vienen a ser entre 40 a 300 por planta. Por otro lado, las hojas son palmadas (estilo abanico), con láminas de aproximadamente 1,5-4m de largo y hasta 1m de ancho, con bordes aserrados y nervaduras paralelas típicas de monocotiledóneas. La inflorescencia, por su lado, crece en la base, cerca de la unión de pecíolo y rizoma, contiene estructuras floreares unisexuales compuesta por flores femeninas centrales (1 de cada 5) y numerosas masculinas alrededor; al madurar las flores femeninas se fusionan en un fruto tipo bayas múltiples formando un sin carpo cilíndrico carnosos de unos 15 cm de largo (Expo-Ambiente De Biotemas y Otros Retos, 2016). Y la parte más importante, la cual se extrae la paja toquilla para la construcción de los sombreros de paja toquilla son el cogollo y la yema apical; cada brote contiene el cogollo con hojas enrolladas (la fibra/la paja toquilla) (González, 2022).

Ha sido usada en tiempos prehispánicos; se ha registrado citas referentes a los sombreros de paja toquilla a partir del siglo XVI donde las comunidades como la Chorrera, Mantas,

Caras, Jama Coaque, Bahía, Guangala, Milagro, Quevedo y Manteña utilizaban estas fibras para tejer diferentes prendas y objetos protectores contra el sol. Un ejemplo notable es la Cultura Valdivia (c. 3500 a.C.–500 a.C.), donde es probable que ya se tejieran sombreros con esta fibra (Travelec, 2023).

1.5.2 Parámetros fisicoquímicos

- PH: El pH es una medida logarítmica de la concentración de iones de hidrógeno (H^+) en una solución. La escala va de 0 a 14 y se calcula como $pH = -\log_{10}[H^+]$ (Metcalf & Eddy, 2014).
- Conductividad eléctrica (CE): Es la capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica. Esta capacidad depende directamente de la presencia, concentración, movilidad y carga de los iones disueltos (como Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , etc.) (Metcalf & Eddy, 2014).
- TDS: Es el peso total de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas disueltas en un volumen dado de agua. Incluye sales, minerales, metales, cationes y aniones (Metcalf & Eddy, 2014).
- Temperatura: Mide la energía cinética promedio de las partículas, en este caso, para el análisis, las del agua (Metcalf & Eddy, 2014).
- DQO: Es la cantidad de oxígeno equivalente consumido para oxidar químicamente la materia orgánica e inorgánica susceptible de ser oxidada en una muestra de agua (Metcalf & Eddy, 2014).
- DBO₅: Es la cantidad de oxígeno consumida por microorganismos (bacterias heterótrofas) para estabilizar biológicamente la materia orgánica biodegradable bajo condiciones aerobias en un periodo de 5 días a 20°C (Metcalf & Eddy, 2014).

- **Turbidez:** La turbidez es una medida óptica que indica el grado en que el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas sólidas suspendidas (como arcilla, limo, materia orgánica, plancton o microorganismos). Cuantas más partículas hay, más "turbia" o "sucia" se ve el agua. (Metcalf & Eddy, 2014)

1.5.3 Tratamiento de agua.

El tratamiento de agua es el conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos diseñados para eliminar o reducir contaminantes presentes en el agua cruda, con el fin de producir agua segura para el consumo humano, uso industrial o retorno al medio ambiente. Estos procesos incluyen, entre otros, la coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección y remoción de constituyentes específicos como metales, sólidos disueltos y agentes patógenos. (Metcalf & Eddy, 2014)

1.5.4 Tratamiento primario.

El tratamiento primario es una etapa del proceso de tratamiento de aguas residuales que se enfoca principalmente en la remoción de sólidos suspendidos y materiales sedimentables mediante procesos físicos, especialmente la sedimentación. Su objetivo es reducir la carga contaminante del agua antes de que pase al tratamiento secundario, el cual se encarga de la degradación biológica de la materia orgánica restante. (Metcalf & Eddy, 2014)

Los principales procesos usados para el tratamiento primario son:

- **Sedimentación:** Proceso físico mediante el cual las partículas más densas se asientan por gravedad en tanques de sedimentación. Es un tipo de separación gravitacional de partículas suspendidas más densas que el agua.
- **Tanques clarificadores primarios:** Son estructuras donde se retiene el agua durante un tiempo suficiente para permitir la decantación de sólidos. El proceso es fisicoquímico mediante el cual se remueven sólidos suspendidos y coloides del agua mediante

coagulación y floculación, seguidos de la sedimentación de los flóculos formados. La finalidad de estos equipos es en producir un agua con menor turbidez y sólidos antes del tratamiento secundario. (Davis, 2020)

- El policloruro de aluminio (PAC) es un coagulante pre hidrolizado que neutraliza cargas de las partículas suspendidas formando flóculos grandes. El PAC remueve eficientemente turbidez y sólidos suspendidos incluso con dosis bajas (CONTYQUIM, 2024). La eficiencia del químico se debe a su grado de basicidad y dependiendo del pH (entre 5 a 9) puede tener resultados viales en un sistema de producción. Al ser básica no genera acidez, sino que busca neutralizar la solución, esto permite no adicionar otros materiales como neutralizadores de pH, lo que resulta ser más económico utilizarlo. Pero, para favorecer la agregación es importante adicionar el floculante aniónico (polímero).
- El floculante aniónico es un polímero sintético orgánico de alto peso molecular con una cadena principal negativa, y desestabiliza partículas que ya han interactuado con coagulante, en especial los que interactúan con el policloruro de aluminio (PAC).
- Remoción de sólidos flotantes y espumas: en la superficie, se retiran materiales como grasas y aceites.

La finalidad objetiva del proceso es remover la demanda bioquímica del oxígeno (DQO) entre un 25 a 40% y Eliminar entre 50 a 70% de los sólidos suspendidos totales (SST). (Metcalf & Eddy, 2014)

1.5.5 Tratamiento primario especializado

Los tratamientos primarios especializados se plantean operaciones fisicoquímicas avanzadas que pueden incorporarse como parte del primario para mejorar la calidad del agua antes del tratamiento secundario. Estas incluyen procesos de filtración granular, adsorción o precipitación química cuando el agua contiene contaminantes específicos. (Mackenzie, 2020)

- Filtración por Antracita + arena sílica: La antracita es un carbón mineral duro y con un alto contenido de carbono. En procesos de filtración, se utiliza como medio granular debido a su baja densidad. Son partículas angulares e irregulares, lo que proporciona una alta porosidad y una mayor superficie para la adhesión de partículas. Por otro lado, La arena sílica es el medio filtrante granular tradicional y más común y se caracteriza por su alta densidad y partículas más finas en comparación con la antracita (Mackenzie, 2020).

El filtro con estos medios filtrantes puede retener los sólidos suspendidos y retener contaminantes orgánicos. Aparte, en un sistema de tratamiento con clarificación, permite retener flóculos de PAC + floculante.

Esta parte del tratamiento busca eliminar gran parte de la turbidez y de los sólidos suspendidos.

1.5.6 Criterios para el uso del agua

La recomendación de las normativas es esencial para identificar qué aguas son adecuadas para los siguientes criterios: Para agua potable, Para riego y Para descarga de efluentes (rio/alcantarillado). De no cumplirse, se procede a no utilizar esa agua o invertir en ella para tratarla y así usar esa agua para dicho criterio.

- TULSMA – Libro VI; Anexo I: TULSMA es el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente en Ecuador. El Libro VI regula específicamente la calidad ambiental del agua y la descarga de efluentes. El Anexo 1 contiene los límites máximos permisibles para verter efluentes a cuerpos de agua (dulce y marino) y al alcantarillado, así como criterios para uso agrícola (riego). (Ministerio del Ambiente, 2021)
- NTE INEN 1108 (Ecuador): Es la Norma Técnica Ecuatoriana que regula la calidad del agua potable. Establece los límites máximos permisibles para bacterias, químicos, metales y otros contaminantes. Permite garantizar la potabilidad del agua que se distribuya a los sistemas públicos como privados (INEN, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016).
- Ram, A., Tiwari, S., & Pandey, H. (2021): Este no es una normativa en si pero es una referencia que normalmente centro de instigación de las aguas, como CIPAT (Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra) utilizan para evaluar el agua y verificar que cumpla con el uso que se le dio. Este estudio propone evaluar la calidad del agua subterránea usando el Water Quality Index (WQI), un indicador compuesto que resume varios parámetros en un único valor de calidad, integrando químicos, microbiológicos y físicos, y usa GIS para mapear espacialmente la calidad (Ram, y otros, 2021).
- WHO (2017) Directrices para la calidad del agua potable, 4ª edición: Son las directrices de la Organización Mundial de la Salud que establecen límites de contaminantes en el agua destinada al consumo humano. Normalmente es usado como referencia internacional para regulaciones nacionales (World Health Organization, 2017).

Tabla 1. *Parámetros para el cumplimiento de las normativas según el criterio*

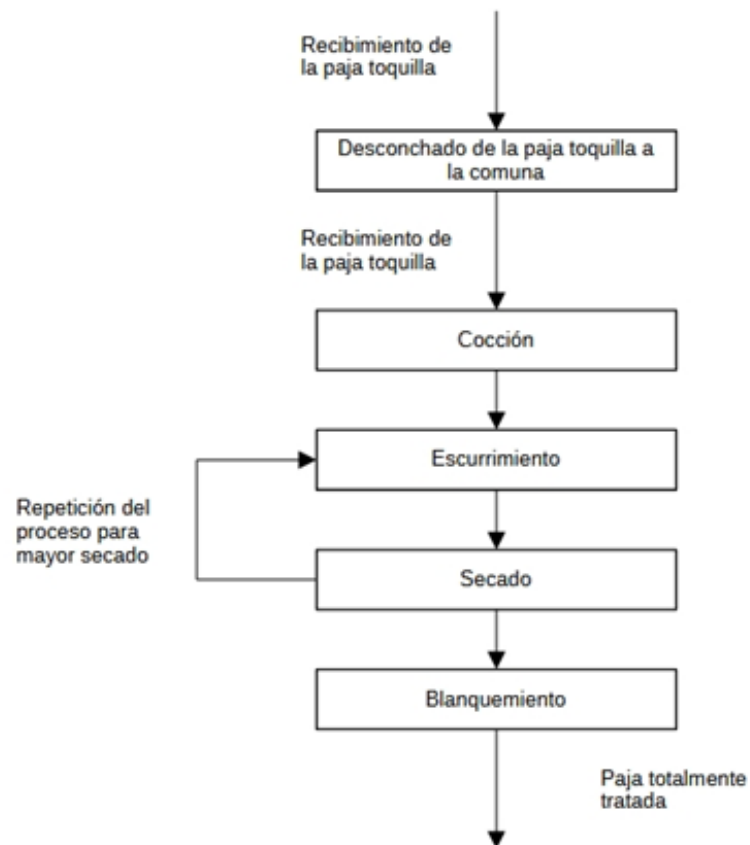
Parámetros	Unidades	Criterios para riego			Criterio para agua potable	Criterio para descargas
		Ram et al.	WHO	TULSMA Libro VI	NTE INEN 1108	TULSMA Libro VI
pH	-	6.5-8.5	7.0-8.0	6.0-9.0	6-9	6.0-9.0
Conductividad	us/cm	750-3000	-	-	700-3000	<4688
TDS	mg/L	500-2000	600-2000	<2000	< 1000	<3000
Temperatura	°C	-	-	27±3	27±3	27±5
DQO	mg/L	-	-	-	-	<250
DBO5	mg/L	-	-	-	-	<30

Capítulo 2

2.1 Descripción del proceso

2.1.1 Tratamiento Centro de Procesamiento de la paja toquilla

Figura 1. Diagrama de proceso de la paja toquilla del Centro de procesamiento de la Paja Toquilla de Barcelona, Santa Elena.

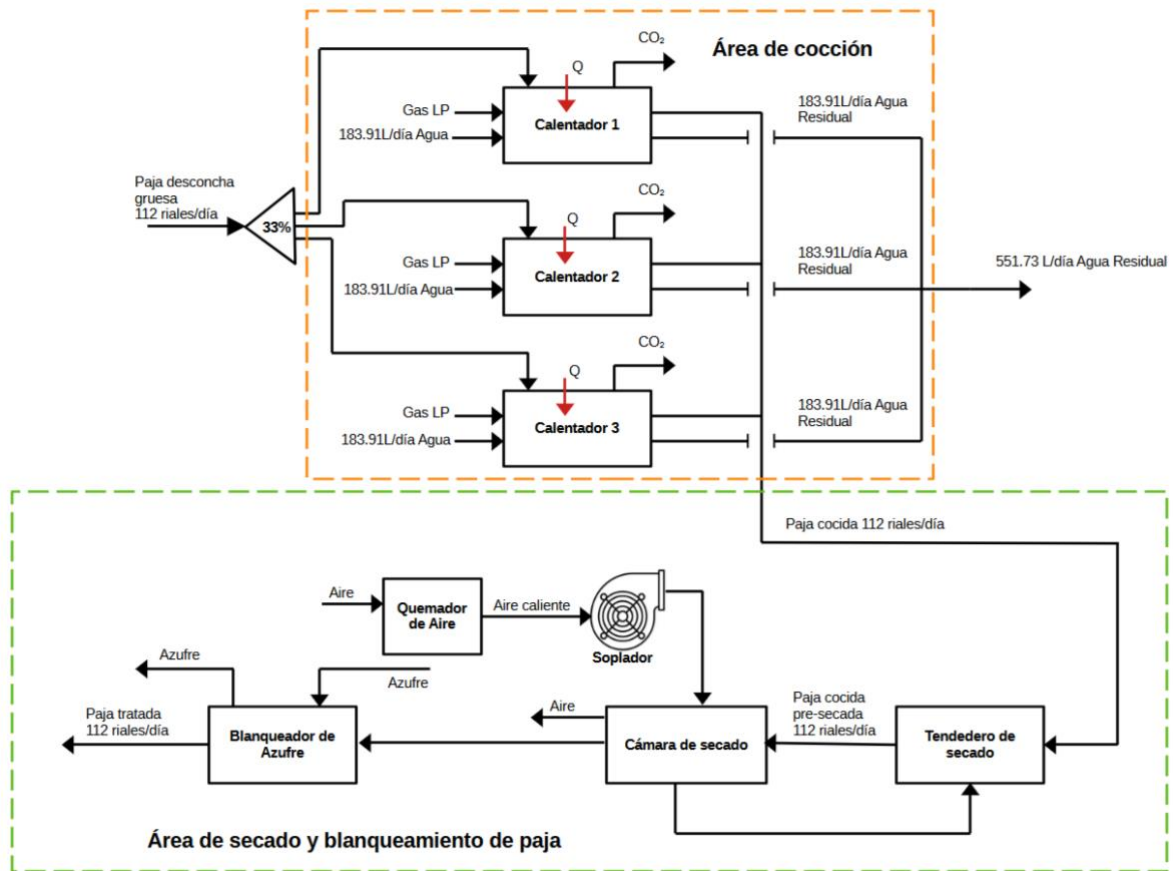


El proceso de tratamiento de la paja toquilla del Centro de procesamiento de la Paja Toquilla se realiza de la siguiente manera:

- Desconchado del cogollo: Separar de la parte final de la parte gruesa de la parte delgada para ser usada en distintas finalidades: Para la realización de los sombreros y para la realización de utensilios para el hogar.
- Cocción de la Paja: Son agrupados en Rial (14 cogollo tratados) para ser llevados a la cocción. La cocción suele durar entre 45 min a una hora (Perero, 2024).

- **Escurrimiento de la paja cocida:** Una vez cocinado, el producto pasa a ser escurrido en una mesa de forja rejilla. El agua escurrida caer en un conducto donde es llevado a una cisterna.
- **Secado de la paja:** La paja es llevada al secado durante unas 2 a 4 horas. Y luego llevada al área de tendadero; se verifica que tan seca está la paja, y si no se lo lleva otra vez a secar (Perero, 2024). El sol contribuye a aclarar ligeramente la fibra, pero se evita el calor excesivo para no sobre secarla y perder flexibilidad. En Barcelona, con mejoras cooperativas, se instalaron secadores industriales que permiten secar la paja aún en ausencia de sol [researchgate.net](https://www.researchgate.net). En todo caso, el secado busca dejar las fibras completamente libres de humedad; sólo entonces la paja adquiere un color beige uniforme, listo para el siguiente paso (Borbor, 2015).
- **Blanqueamiento de la paja:** La paja es llevada al área de blanqueamiento. Primero son atados y se colocan en un horno o cámara cerrada con azufre quemado. Los vapores sulfúricos penetran la fibra durante varias horas (3–4 horas típicamente), pero normalmente realizan el proceso desde la noche hasta en la madrugada, retirando el producto y llevándolo al área de tendido para secarlo completamente. El blanqueado y suavizado la paja tiene un tono beige final característico del material (DaschaStyle, 2020).

Figura 2. Diagrama de flujo de la paja toquilla del Centro de procesamiento de la Paja Toquilla de Barcelona, Santa Elena.



2.2 Diagnostico preliminar

Antes de entender las alternativas para la selección efectiva del tratamiento de agua residual hay que reconocer algunos parámetros y valores claves que permitan entender la condición del sistema. Entre estas están la producción de agua residual y paja toquilla, y la proporción de contaminantes en el sistema de tratamiento de agua.

2.2.1 Producción de la paja toquilla

El centro de procesamiento de paja toquilla normalmente trata al día 476 cogollos de palma por cada calentador (olla artesanal). La unidad cogollo no es una unidad comúnmente conocida, pero existen relaciones con la masa en kg. En la siguiente tabla se podrán ver las relaciones de estos términos con las unidades en kilogramos.

Tabla 2. *Tabla de unidades artesana y relación con las industriales*

Medidas artesanales	
Unidades	Relación
Ocho	1.5 – 2.5 Kg $\approx$ 2 kg
Ocho	28 manos
Ocho	8 riales
8 riales	112 cogollos
1 peseta	24 cogollos
1 tongo	1 rial
1 peseta	2 – 3 \$

$$2 \frac{Kg}{ocho} \times \frac{ocho}{112 cogollo} \times 476 cogollos = 8.5 Kg \text{ por calentador}$$

$$Paja_{total} = 8.5 Kg \times 3 = 25.5 Kg \text{ paja cocinada total por día}$$

$$9307,5 \frac{Kg}{año} \text{ se cocina de paja toquilla}$$

Los 476 cogollos que son cocinados durante el día por cada olla vendrían ser, aproximadamente, 8.5 kg que una olla cocina durante el día.

Normalmente la planta usa tres de sus cuatros cocinas artesanales, esto se debe a la demanda constante que tienen y que suelen tener pocos bajones de producción. Entonces se puede decir que en promedio se suele producir 25.5 kg de paja cocinada; al año un aproximado de 9307.5 Kg.

2.2.2 Producción del agua residual

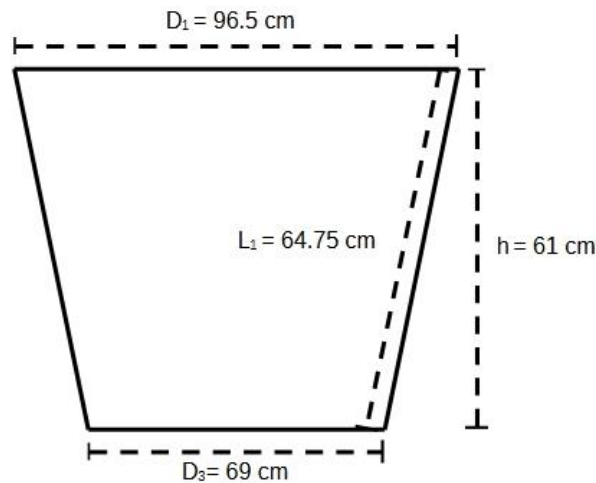
Para el proyecto el dimensionamiento de los equipos de cocción en especial la olla artesanal es importante para el análisis para entender la demanda de agua que se va a tratar. En la

Tabla N°3 se observa los datos importantes de la olla de cocción obtenidos durante la operación asumiendo que la olla es un cono truncado.

Tabla N°3. Dimensionamiento de la olla de cocción

Parte	Valor
Diámetro superior D_1 [cm]	96.5
Diámetro inferior D_3 [cm]	69
Altura h_1 [cm]	61
Generatriz h_1 [cm]	64.75
Altura operativa h_3 [cm]	27.5
Generatriz operativa h_3 [cm]	28.5

Figura 3. Representación de la olla de cocción de la paja toquilla



- Determinación del volumen interno de la olla de la paja toquilla

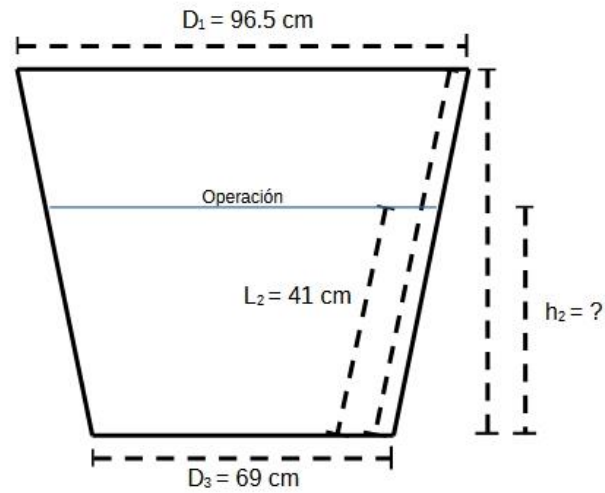
$$V_{total} = \frac{h\pi}{3} \times (R_1^2 + R_3^2 + R_1 R_3) \text{ cm}^3 \quad (2.1)$$

$$V_{total} = \frac{61\pi}{3} \times [48.25^2 + 34.5^2 + (48.25 \times 34.5)] \text{ cm}^3$$

$$V_{total} = 331081.1269 \text{ cm}^3 = 331.08 \text{ L}$$

- Determinación del volumen de operación de la olla de la paja toquilla

Figura 4. Representación de la olla de cocción de la paja toquilla y operación



$$\cos(\alpha) = \frac{\text{cateto adyacente}}{\text{hipotenusa}} = \frac{L_1}{L_1} \quad (2.2)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{61 \text{ cm}}{64.75 \text{ cm}} \rightarrow \alpha = 19.5953^\circ$$

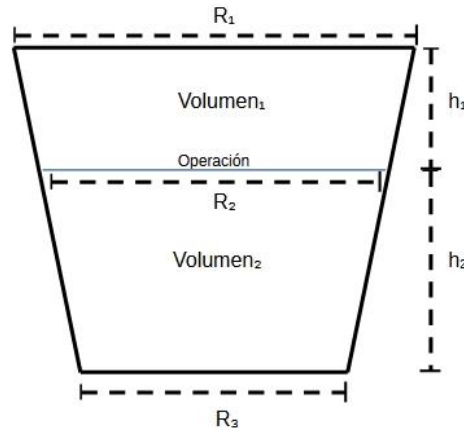
$$\cos(\alpha) = \frac{h_2}{L_2}$$

$$h_2 = L_2 \cos(\alpha)$$

$$h_2 = 41 \cos(19.5953)$$

$$h_2 = 38.62 \text{ cm}$$

Figura 5. Representación para determinación de volumen de operación



$$V_{total} = V_1 + V_2 \quad (2.3)$$

$$V_1 = \frac{h_1 \pi}{3} \times (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2) \text{ cm}^3 \quad (2.4)$$

$$V_2 = \frac{h_2 \pi}{3} \times (R_2^2 + R_3^2 + R_2 R_3) \text{ cm}^3$$

$$V_1 = \frac{22.38\pi}{3} = 48.25^2 + R_2^2 + (48.25 R_2)] \text{ cm}^3$$

$$V_2 = \frac{38.62\pi}{3} = R_2^2 + 34.5^2 + (34.5 R_2)] \text{ cm}^3$$

Al sumar las dos últimas ecuaciones tenemos una ecuación cuadrática

$$V_1 + V_2 = 40.443 R_2^2 + 1395.28 R_2 + 48137.28$$

$$V_1 + V_2 = 331081.1269 \text{ cm}^3$$

Entonces

$$R_2 = 43.2954 \text{ cm}$$

$$V_2 = \frac{38.62\pi}{3} = 43.2954^2 + 34.5^2 + (34.5 \times 43.2954)] \text{ cm}^3$$

$$V_2 = 183913.27 \text{ cm}^3 = 183.91 \text{ L}$$

Cada día tienen tres ciclos de este residual, por tanto, al día generan

$$V_{dia} = 551.73L/día$$

Al año vendrían a producir aproximadamente

$$V_{año} = 201381.45L/año$$

$$V_{año} = 201381.45L/año$$

Es importante considerar que el centro de procesamiento está activo los 7 días de la semana.

2.2.3 *Parámetros del agua residual de la paja toquilla*

La temperatura, pH, Conductividad eléctrica, Sólidos totales disueltos y Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno son imprescindibles para determinar qué tan contaminada están cada muestra.

- Muestra de Agua de entrada: Indica las condiciones del agua antes de recibir alguna interacción con la paja toquilla
- Agua de 1° tanda: Al tener el agua caliente en la olla de bronce a unos 80°C se añade una tanda de 476 cogollos. La muestra es obtenida unos 45 minutos después de la adición de los cogollos.
- Agua de 2° tanda: Se retira la primera tanda de 476 cogollos y luego son añadidos otros 476 cogollos en la olla. La muestra es obtenida unos 45 minutos después de la adición de los cogollos.
- Agua de 3° tanda: Se retira la segunda tanda de 476 cogollos y luego son añadidos otros 476 cogollos en la olla. La muestra es obtenida unos 45 minutos después de la adición de los cogollos.

2.2.4 Análisis fisicoquímicos del agua según los criterios para riego

Tabla 4. *parámetros fisicoquímicos del agua residual a partir de los criterios para riego*

Par.	Unds.	Criterios para riego			RESULTADOS			
		Ram et al.	OMS	TULSM A Libro VI	Agua de entrada	Agua de 1° tanda	Agua de 2° tanda	Agua de 3° tanda
pH	-	6.5-8.5	7.0-8.0	6.0-9.0	6.92	6.53	6.08	6.53
CE	μS/cm	750-3000	-	-	2110	3420	4620	5980
TDS	mg/L	500-2000	600-1000	<2000	1050	1710	2320	3000
T. ^a	°C	-	-	27±3	25.9	80	79.1	81.5
DQO	mg/L	-	-	-	21.1	351	>1500	> 1500
DBO5	mg/L	-	-	-	5.84	245.7	>1050	> 1050

El agua residual en su tercera tanda ha generado unos resultados que están fuera de los límites permitidos por las normativas para el riego. Intentar de dejar de usar el agua en la segunda tanda podría ser una opción, pero sería una pérdida excesiva de agua al día. Por tanto, según los criterios de riego el agua residual de la paja toquilla no estaría siendo viable en su uso para riego. Algo importante que añadir, y es que, según las normativas, el DBO5 y DQO no serían relevante para este análisis (Ministerio del Ambiente, 2021). El riego es de los criterios que no es tan exigente en comparación a las siguientes.

2.2.5 Análisis fisicoquímicos del agua según los criterios para agua potable

Tabla 5. Análisis fisicoquímicos del agua residual a partir de los criterios para agua potable

Parámetros	Unidades	Criterio para agua potable	RESULTADOS			
		NTE INEN 1108	Agua de entrada	Agua de primera tanda	Agua de segunda tanda	Agua de tercera tanda
pH	-	6-9	6.92	6.53	6.08	6.53
Conductividad	µS/cm	700-3000	2110	3420	4620	5980
TDS	mg/L	< 1000	1050	1710	2320	3000
Temperatura	°C	27±3	25.9	80	79.1	81.5
DQO	mg/L	-	21.1	351	> 1500	> 1500
DBO5	mg/L	-	5.84	245.7	> 1050	> 1050

Por su lado, el agua tampoco cumple con los criterios para agua potable, es más al tener criterios muy exigentes, los más exigente de los tres, es la que menos argumento se podría tener para su uso.

Tabla 6. Análisis fisicoquímicos del agua residual a partir de los criterios para descargas

Parámetros	Unidades	Criterio para descargas	RESULTADOS			
		TULSMA Libro VI	Agua de entrada	Agua de primera tanda	Agua de segunda tanda	Agua de tercera tanda
pH	-	6.0 – 9.0	6.92	6.53	6.08	6.53
Conductividad	µS/cm	< 4688	2110	3420	4620	5980
TDS	mg/L	< 3000	1050	1710	2320	3000
Temperatura	°C	27 ± 5	25.9	80	79.1	81.5
DQO	mg/L	< 250	21.1	351	> 1500	> 1500
DBO5	mg/L	< 30	5.84	245.7	> 1050	> 1050

El agua residual, en la planta de paja toquilla, normalmente es enviado al alcantarillado, pero estos análisis indican que el agua no estaría cumpliendo con los criterios establecidos para las descargas al alcantarillado.

2.3 Formulación de posibles metodologías

Se consideraron diversas alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales generadas en el proceso artesanal de cocción de la paja toquilla, debido a que presentaron elevados valores en los parámetros fisicoquímicos del agua: Conductividad, 5980 $\mu\text{S}/\text{cm}$; TDS, 3000 mg/L; Temperatura, 81.5 °C; DQO, >1500 mg/L; DBO, >1050 mg/L.

Dentro de las alternativas evaluadas incluyeron a las siguientes: (1) Sistemas de tratamiento aerobio del tipo lodos activados, (2) humedales de flujo subsuperficial, (3) filtros de arena intermitentes, y (4) sistemas combinados de tipo séptico-filtrante con tratamiento terciario. Se priorizó el uso de tecnologías pasivas, de bajo costo de mantenimiento, adaptables a condiciones rurales y sin necesidad de equipamiento eléctrico continuo, siguiendo así criterios de sostenibilidad y eficiencia técnica. (Tchobanoglous, 2003)

2.3.1 *Sistemas de tratamiento aerobio de tipo lodos activados.*

Este sistema es altamente eficiente para la remoción de DBO y nutrientes. Los procesos aerobios operan mediante la aireación controlada del agua residual para favorecer la actividad bacteriana. Sin embargo, requieren un control estricto de oxígeno disuelto, equipos electromecánicos (sopladores, aireadores) y supervisión técnica continua, lo cual representa una limitación significativa en zonas rurales sin acceso permanente a energía eléctrica. (Metcalf & Eddy, 2014)

2.3.2 *Humedales de flujo subsuperficial. (HFS o SFS)*

Estos sistemas reproducen el funcionamiento natural de zonas húmedas para el tratamiento del agua. Se caracterizan por ser de bajo costo operativo, sostenibles y con buen desempeño en la remoción de materia orgánica, nutrientes y coliformes. Los HFS requieren superficies

amplias y presentan una eficiencia variable frente a cargas orgánicas muy elevadas, como las presentes en las tandas residuales de cocción. se diseñan con objeto de proporcionar tratamiento secundario y avanzado. Consisten en canales o zanjas con fondos relativamente impermeables rellenos de un medio de piedras o arenoso para el crecimiento de vegetación emergente. (Metcalf & Eddy, 2014)

2.3.3 *Filtros de arena intermitentes.*

Esta tecnología consiste en el paso periódico del agua sobre un lecho filtrante de arena, que permite la remoción de DBO, sólidos suspendidos y patógenos a través de filtración física y procesos biológicos en la biopelícula superficial. Los recomiendan para aplicaciones descentralizadas debido a su operación simple, alta eficiencia y bajo requerimiento energético. (Metcalf & Eddy, 2014)

2.3.4 *Sistema combinado de tipo séptico-filtrante con tratamiento terciario.*

Esta alternativa integra una fosa séptica (tratamiento primario anaerobio), un filtro de arena intermitente (tratamiento secundario) y una etapa de pulido con materiales adsorbentes como carbón activado o zeolita (tratamiento terciario). De acuerdo con Metcalf & Eddy (2013), la combinación de procesos permite alcanzar una remoción global de hasta el 90% de la carga orgánica, con mínima intervención técnica y alta adaptabilidad en zonas rurales. La clinoptilolita es doblemente útil en el tratamiento de las aguas residuales es altamente selectiva para iones de amonio, y se ha sugerido podría ser útil en extracción del amonio de las aguas residuales y de los efluentes agrícolas. (Mercer, 1970)

2.4 Diseño a del tratamiento de agua

Para demostrar que el proceso funcione y cumpla con las demandas del cliente, el tratamiento tiene que ser capaz de tratar el agua llevándola a las condiciones indicadas por las normativas. Por eso se ha optado en realizar un diseño a escala para demostrar la efectividad del sistema y para el proceso de clarificación, un análisis de laboratorio; la prueba de jarra.

Para un diseño de la escala del proceso no puede ser diseñado usando la relación lineal al tamaño original propuesto puesto que, en estos casos, dependen más de condiciones para amortiguamiento de alta producción o por el tiempo de retención hidráulica (TRH). (Metcalf & Eddy, 2014)

2.4.1 Tanque enfriador

El tanque enfriador o de ecualización debe estar capacitado para enfriar la solución mediante la liberación de calor por convección y radiación. La finalidad de la eliminación del calor es para eliminar los impactos térmicos y físico químicos que podrían recibir en los siguientes procesos:

- El pozo séptico no funcionaría a temperaturas aproximadas a 80 °C porque las bacterias anaeróbicas fallarían y, en el peor de los casos morirían.
- El filtro anaerobio, de la misma que con las bacterias, los medios filtrantes no se dañarían a 80 °C
- Por otro lado, el humedal al tener plantas, las raíces no operarían y morirían.
- Y según las normativas, en especial para descargas, no es legal depositar agua a esa temperatura.

Para el amortiguamiento de picos y enfriamiento del agua residual, el equipo debe poseer un tamaño 1.5 veces a la producción de agua residual por cada día. (Metcalf & Eddy, 2014)

Debe ser de un material de polietileno de alta densidad; normalmente son los de tipo tanque

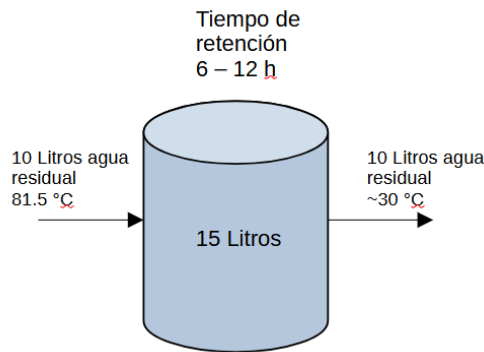
azul o negro. Este último puede disipar mejor el calor por radiación y el tanque debería estar abierto para el enfriamiento natural.

$$V_{\text{tanque}} = 1.5 \times V_{\text{Agua residual por día}} \quad (2.5)$$

$$V_{\text{tanque negro}} = 1.5 \times 10 \text{ litros}$$

$$V_{\text{tanque negro}} = 15 \text{ litros}$$

Figura 6. Esquema del tanque del enfriamiento



2.4.2 Clarificación y sedimentación

El agua enfriada es llevada al campo experimental de la prueba de jarra. La muestra de 750 mL. Pero primero la determinación de las soluciones madre de PAC y el floculante aniónico, considerando las concentraciones recomendadas; 10000 mg/L de PAC solido en una solución de 250mL y 1000 mg/L de Floculante aniónico en una solución de 250 mL (Davis, 2020).

$$10000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ PAC} \times 0.25 \text{ L solución} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 2.5 \text{ g de PAC requeridos}$$

$$1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{ Floculante} \times 0.25 \text{ L solución} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} = 0.25 \text{ g de floculante req.}$$

Para ellos se va a considera las siguientes pruebas.

Tabla 7. Condiciones de cada caso de la prueba de jarra – concentración y Revoluciones del agitador.

	Wclar1	Wclar2	Wclar3	Wclar4	Wclar5	Wclar6	Wclar7
PAC	40 ppm	100 ppm	400 ppm	600 ppm	40 ppm	80 ppm	40 ppm
	40 RPM	40 RPM	40 RPM	40 RPM	20 RPM	40 RPM	100 RPM
	5 min.	5 min.	5 min.	5 min.	8 min.	5 min.	5 min.
Floculante aniónico	1 ppm	1 ppm	4 ppm	1.5 ppm	1.5 ppm	1.5 ppm	1.5 ppm
	40 RPM	40 RPM	40 RPM	40 RPM	40 RPM	40 RPM	40 RPM
	8 min.	8 min.	8 min.	8 min.	8 min.	8 min.	8 min.

Algo que aclarar y es que en cada caso se estarían reposando 8 minutos para una sedimentación eficaz de los flóculos. Y una vez sedimentados se estarían pasando al filtro. Importante: Para este proceso se consideró dejar sedimentar por una hora para que se pudieran sedimentar correctamente (Davis, 2020).

2.4.3 Solución madre.

La solución madre es construida normalmente para facilitar la adición del coagulante y floculante en las pruebas porque ya no sería de añadir diminutos miligramos de material sino de mL medibles (usando una jeringa sin aguja) de solución. Esto puede útil al final del proceso diseñado, especialmente para la capacitación.

- Solución madre del PAC solido: Considerando como solución inicial de 250 mL (volumen aceptable para hacer pruebas) con 10000 ppm (concentración estándar de referencias) de PAC sólido (Metcalf & Eddy, 2014). Entonces la masa de este sería.

$$10000 \frac{mg}{L} \times 0.25L \times \frac{1g}{1000 mg} = 2.5 g \text{ de PAC}$$

- Solución madre del floculante aniónico: Considerando como solución inicial de 250 mL (volumen aceptable para hacer pruebas) con 1000 ppm (concentración estándar de referencias) de floculante aniónico (Metcalf & Eddy, 2014). Entonces la masa de este sería

$$1000 \frac{mg}{L} \times 0.25L \times \frac{1g}{1000 mg} = 0.25 g \text{ de floculante aniónico}$$

2.4.4 Filtración por Antracita + arena sílica.

En esta etapa se incorporó un proceso de tratamiento primario especializado para reforzar la calidad del agua clarificada. El sistema de filtración se diseñó con un lecho granular constituido por una capa superior de antracita y una capa inferior de arena sílica. De acuerdo con recomendaciones técnicas (Mackenzie, 2020), se establecieron las siguientes características de diseño:

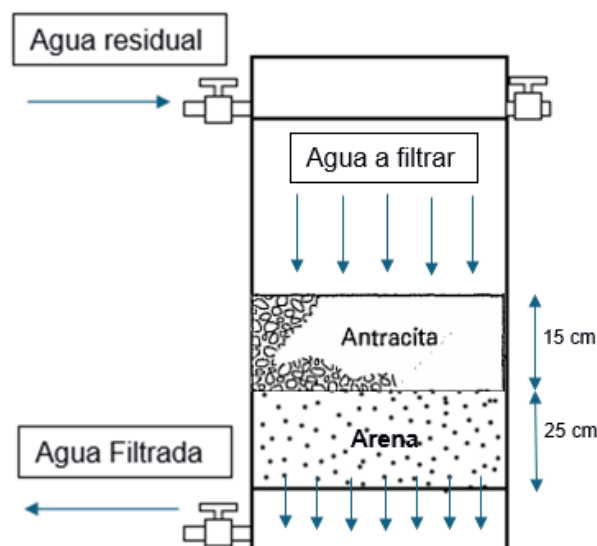
- Espesor de lecho de antracita: 0.20 m
- Espesor de lecho de arena sílica: 0.20 m
- Tamaño efectivo de partícula (Te):
 - Antracita: 1.6 mm
 - Arena sílica: 0.5 mm

2.4.5 Operación del filtro

- Entrada del agua residual se hace usando el efluente proveniente de la unidad de sedimentación se distribuye de manera uniforme sobre el lecho.
- Retención progresiva de sólidos:
 - La antracita retiene partículas grandes y contribuye a la adsorción de materia orgánica.
 - La arena sílica elimina partículas finas y flóculos residuales.
- Salida del agua filtrada se recoge en un sistema de drenaje inferior.
- Limpieza del medio filtrante: cuando la pérdida de carga alcanza el límite máximo, se realiza un lavado a contracorriente con agua, para remover los sólidos acumulados y restaurar la capacidad filtrante.

El final de la capacidad de filtrar del lecho granular se alcanza cuando empieza a aumentar el contenido de sólidos en suspensión en el efluente hasta alcanzar un nivel máximo aceptable se termina la fase de filtración, y se debe lavar el filtro a contracorriente para eliminar la materia (sólidos en suspensión) que se ha acumulado en el seno del lecho granular filtrante. Para ello, se aplica un caudal de agua de lavado suficiente para fluidificar (expandir) el medio filtrante granular y arrastrar el material acumulado en el lecho. Para mejorar y favorecer. La operación de lavado del filtro suele emplearse una combinación de agua y aire. (Metcalf & Eddy, 2014)

Figura 7. Esquema del sistema de filtración.



Considerando que se van a tratar 20 litros de agua residual provenientes del clarificador, el tiempo de filtración que se considero fue de 10 minutos. Entonces se procede a calcular la pérdida de carga que ocurre cuando se corre solo agua limpia y no residual.

Caudal

$$Q = \frac{0.02 \text{ m}^3}{10 * 60 \text{ s}} = 3.333 * \frac{10^{-5} \text{ m}^3}{\text{s}}$$

Velocidad superficial

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{3.33 * 10^{-5}}{0.19635} = 1.6976 * 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Carga hidráulica superficial

$$Carga\ hidráulica\ superficial = \frac{Q}{A} = 10.19 \frac{L}{m^2\ min}$$

Numero de Reynolds

$$N_R = \frac{\varphi * d * V}{\nu}$$

$$N_{R,antracita} = 0.198$$

$$N_{R,arena} = 0.0694$$

Coefficientes de arrastre C_D

$$C_D = \frac{24}{N_R} + \frac{3}{\sqrt{N_R}} + 0.34$$

$$C_{D,antracita} = 128.49$$

$$C_{D,arena} = 357.57$$

Pérdida de carga capa usando la forma de Rose (con porosidad $\varepsilon = 0.40$)

$$h_i = 1.067 C_D \frac{L_i V^2}{\varphi * d * g} * \frac{1}{\varepsilon^4}$$

- Antracita

$$h_{antracita} = 0.00202\ m$$

- Arena

$$h_{arena} = 0.0267\ m$$

Por lo tanto, la pérdida de carga es la suma de cada pérdida.

$$H = h_{antracita} + h_{arena} = 0.02872\ m = 2.87\ cm$$

2.5 Análisis económico de la escala.

Cada paso del proceso ha tenido tamaño nivel escala o experimental por lo que el cálculo de ella es una adaptación de estas situaciones a una escala real, en este caso trata por día los 551.73 L de agua residual.

La tabla 8, 9, 10 explican los gastos que has tenido que realizar para la construcción de cada proceso.

Tabla 8. *Inversión económica de tanque de enfriamiento.*

Producto	Proveedor	Cantidad	Precio por Unidad	Precio
Tubo de unión $\frac{3}{4}$	Kywi	1	\$ 3,70	\$ 3,7
Llave de paso esférica de $\frac{3}{4}$	Kywi	1	\$ 4,80	\$ 4,80
Codo $\frac{3}{4}$	Kywi	1	\$ 0,51	\$ 0,51
Balde grande industrial 22 litros	Kywi	1	\$ 5,91	\$ 5,91
Total				\$ 14,92

Tabla 9. *Inversión económica de la prueba de jarra.*

Producto	Proveedor	Cantidad	Precio por Unidad	Precio
PAC solido	Acquetech	1 kg	\$ 1	\$ 1
Floculante aniónico	Acquetech	1 kg	\$ 25	\$ 25
Total				\$ 26

Tabla 10. *Inversión económica de filtro antracita + arena.*

Producto	Proveedor	Cantidad	Precio por Unidad	Precio
Filtro de arena	Acquetech	1	Cedido	-
Arena lavada	Acquetech	1 saco	\$15	\$ 15
Antracita	FiltrShop	25 kg	\$ 1.35	\$ 33.75
Total				\$ 48.75

CAPÍTULO 3

3.1 Resultados y análisis

3.1.1 Análisis del tanque enfriador.

El tanque enfriador fue dimensionado para tratar 10 litros de agua residual del proceso de paja toquilla construido en polietileno de alta densidad y operado abierto para favorecer la disipación por convección y radiación. Con ese volumen la retención hidráulica resultó en aproximadamente 1 día, lo que permitió que el agua saliente disminuyera desde los ~80 °C de las tandas calientes hasta temperaturas que nos dieron 22,6 °C. El tanque atenuó los picos térmicos y actuó como ecualizador, homogenizando la calidad del efluente antes de la prueba de jarra y la filtración. Se obtuvo una turbidez de la muestra (Mackenzie, 2020)

Tabla 11. *Parámetros del agua residual proveniente del tanque enfriador.*

PARÁMETROS	UNIDADES	VALORES
PH	-	5,78
TURBIDEZ	NTU	126
CONDUCTIVIDAD (CE)	uS/cm	4790
TDS	PPM	2390
Temperatura	°C	22,6

3.1.2 Análisis de prueba de Jarras.

La prueba de jarra realizado sobre el agua residual de paja toquilla tuvo como objetivo determinar la dosis óptima de coagulante (PAC) y floculante (polielectrolito aniónico) para reducir la turbidez y mejorar la clarificación del agua. Las condiciones iniciales de la muestra mostraron un pH ligeramente ácido (5.78), una turbidez inicial de 126 NTU, una conductividad elevada (4790 μ S/cm) y una concentración significativa de sólidos disueltos totales (2390 ppm), indicando la presencia de materia orgánica y sales disueltas. La temperatura se mantuvo en 22.6 °C, favorable para las reacciones de coagulación-floculación.

El coagulante utilizado fue PAC (Policloruro de aluminio) con una concentración del 10% y densidad de 1.27, mientras que el floculante fue un polielectrolito aniónico al 0.1% con densidad de 0.89. El protocolo experimental consistió en una etapa de homogenización (1 min a 100 RPM), mezcla rápida (2 min a 100 RPM), mezcla lenta (5 min a 40 RPM) y sedimentación (8 min). Las dosis de coagulante variaron entre 40 y 600 ppm, y las de floculante entre 1 y 4 ppm.

Los resultados revelaron que la dosis de 40 ppm de PAC combinada con 1 ppm de floculante (Muestra 1) obtuvo la mayor eficiencia, con una reducción de turbidez a 74.1 NTU (41.3% de remoción). Aunque la clarificación no fue completa, se observaron partículas sedimentables y una respuesta prometedora. En contraste, dosis más altas de coagulante (100 ppm en Muestra 2 y 400-600 ppm en Muestras 3-4) resultaron en una menor remoción de turbidez (37.2% a 3.2%), indicando una sobredosis de coagulante que estabilizó los coloides y aumentó la turbidez.

Tabla 12. *Datos de Prueba de Jarras realizado.*

CODIGO MUESTRA	PH INICIAL	COAGULANTE		FLOCULANTE		SEDIMENTACIÓN	
		ADICIÓN (ML)	PPM	ADICIÓN (ML)	PPM	NTU	%REMOSIÓN
1	5,78	3,00	40	0,75	1	74,1	41%
2	5,78	7,50	100	0,75	1	79,1	37%
3	5,78	30,00	400	3	4	119	6%
4	5,78	45,00	600	1,125	1,5	122	3%
5	5,78	5,25	70	1,125	1,5	197	14%
6	5,78	3,00	40	1,125	1,5	199	13%
7	5,78	6,00	80	1,125	1,5	170	25%

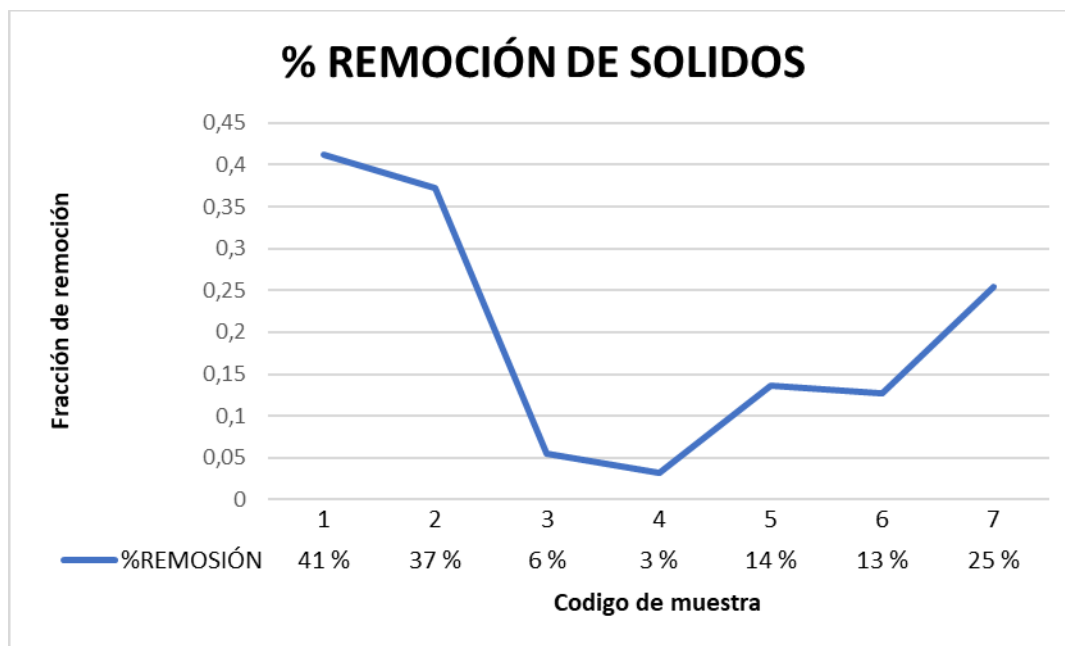
Tabla 12. *Parámetros obtenidos en la prueba de jarras.*

	COAG	40	100	400	600	70	40	80
	FLOC	1	1	4	1,5	1,5	1,5	1,5
Análisis paramétrico		Wcla1	Wclar2	Wclar3	Wclar4	Wclar5	Wclar6	Wclar7
pH	-	6	6,16	5,88	5,82	5,92	5,96	5,87
Cond	um/cm	4650	4700	4770	4740	4710	4630	4620
TDS	Ppm	2350	2350	2380	2400	2370	2320	2330
Salt	Ppm	2340	2340	2390	2400	2370	2330	2330
Salt	%	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23	0,23
Turbidez	NTU	74,1	79,1	119	122	196	199	170

Tabla 13. *Resultados de remoción.*

Muestra	pH inicial	Coagulante		Floculante		Sedimentación	
		Adición (ml)	PPM	Adición (ml)	PPM	NTU	% remoción
1	5,78	3,00	40	0,75	1	74,1	41 %
2	5,78	7,50	100	0,75	1	79,1	37 %
3	5,78	30,00	400	3	4	119	6 %
4	5,78	45,00	600	1,125	1,5	122	3 %
5	5,78	5,25	70	1,125	1,5	197	14 %
6	5,78	3,00	40	1,125	1,5	199	13 %
7	5,78	6,00	80	1,125	1,5	170	25 %

Figura 8. *Porcentaje de remoción de sólidos.*



Los resultados han demostrado que la muestra 1 ha generado mayor clarificación y remoción de TDS. Este vendría a ser el caso que se va a usar para adaptar en el proceso. En la teoría, la remoción de TDS rondaría en los 30 a 60% del contenido de NTU. Para este caso, el sistema reacción en los esperado en con 41% de remoción (Davis, 2020). La remoción indica una perdida significativa de sólidos, por tales hay que tener en cuenta que tanto de solidos se ha eliminado.

Se tiene en cuenta los parámetros.

$$Turbidez_{entrada} = 126 \text{ NTU}$$

$$Turbidez_{salida} = 74.1 \text{ NTU}$$

$$\Delta Turbidez = 51.9 \text{ NTU}$$

$$TDS_{entrada} = 2390 \frac{mg}{L}$$

$$TDS_{salida} = 2350 \frac{mg}{L}$$

$$\Delta TDS = 40 \frac{mg}{L} \text{ solidos disueltos removidos}$$

Teniendo en cuenta que el volumen de la muestra fue de 750 mL, el PAC solido usado (40 mg/L – 3 mL) y el floculante aniónico (1 mg/L – 0.75 mL), la masa del PAC y del floculante aniónico sería.

$$40 \frac{mg}{L} PAC \times \frac{3 \text{ mL}}{1000} = 0.12 \text{ mg PAC}$$

$$40 \frac{mg}{L} \text{ Floculante aniónico} \times \frac{1 \text{ mL}}{1000} = 0.00075 \text{ mg Floculante aniónico}$$

Ahora con esto podemos tener una estimación de los sólidos suspendidos removidos, consideran un factor de correlación (k) entre el TSS con los NTU, normalmente se puede asumir ente 0.5 a 1.5.

$$m_{SS} \approx factor_{correlación} \times \Delta Turbidez \times V_{solución}$$

$$m_{SS} \approx \frac{0.5 \frac{mg}{L}}{NTU} \times 51.9 NTU \times 0.75 L = 19.4 mg$$

$$m_{SS} \approx \frac{1.5 \frac{mg}{L}}{NTU} \times 51.9 NTU \times 0.75 L = 58.4 mg$$

Por otro lado, considerando la masa removida por cambio de TDS.

$$m_{diss} \approx 40 \frac{mg}{L} \times 0.75 L = 30 mg$$

Entonces la suma total sería.

$$m_{Total} \approx m_{PAC} + m_{Floc} + m_{SS} + m_{diss}$$

$$m_{Total\ 0.5} \approx 0.12 mg + 0.00075 mg + 19.4 mg + 30 mg$$

$$m_{Total\ 0.5} \approx 49.5 mg$$

$$m_{Total\ 1.5} \approx 0.12 mg + 0.00075 mg + 58.4 mg + 30 mg$$

$$m_{Total\ 1.5} \approx 88.5 mg$$

Entonces nosotros tenemos una posible cantidad aproximada entre.

$$49.5 mg - 88.5 mg \text{ de sedimentos}$$

Esto no vendría ser tanto en la salida del producto, pero al adaptarlo al caso de la planta, tendríamos, considerando el factor de escala de 0.75L de las pruebas a 551L de producción por día.

$$\frac{551 L}{0.75 L} = 734.66$$

Entonces para el caso de la producción tendríamos.

$$m_{Total\ 0.5} \approx 49.5 mg \times 734.66 = 36381 mg = 36.381 g$$

$$m_{Total\ 1.5} \approx 88.5 mg \times 734.66 = 64973.92 mg = 64.973 g$$

Está cantidad puede ser removida considerando el protocolo posterior.

3.1.3 *Análisis de filtro de antracita + arena sílica.*

La operación del filtro de antracita y arenita se dio de manera semicontinua es decir dividida por fases el filtrado y el lavado, en un lecho poco profundo con una configuración estratificada de doble capa colocando primero la antracita y por debajo la arena sílica de manera que se distribuyó de menor a mayor tamaño de grano. La primera fase se eliminó la materia particulada, esto se realizó haciendo que el agua residual proveniente de la clarificación circule a través del lecho de 15 cm de antracita y 25 cm de arena sílica de manera descendente. La eliminación de sólidos se dio por complejos procesos donde interviene mecanismo como el tamizado, interceptación, impacto, sedimentación y adsorción. Una vez llegada a la parte final de la primera fase de filtración se empezó a notar un aumento del contenido de sólidos en suspensión a la salida del filtro. En este caso se debió lavar el filtro invirtiendo el sentido de la circulación en el mismo.

Tabla 14. *Parámetros obtenidos del agua residual filtrada.*

Análisis paramétrico		Wcla1	Wclar2	Wclar3	Wclar4	Wclar5	Wclar6	Wclar7
pH	-	6,98	6,76	7,04	6,69	6,63	6,66	7,09
Cond	um/cm	2060	3070	2940	3990	4300	4500	2970
TDS	ppm	1030	1530	1470	1990	2150	2250	1480
Salt	ppm	1030	1560	1490	1980	2140	2250	1500
Salt	%	0,1	0,16	0,14	0,19	0,23	0,22	0,15

Observamos que la muestra 1 es aquella muestra que más logro removerse materia particulada o sólidos en suspensión producto de la floculación en la anterior etapa. Por otro lado, la velocidad resultante y la carga hidráulica superficial están dentro de los rangos razonables de filtración de efluentes tratados, además la pérdida de carga inicial es muy baja la mayor parte de la pérdida de carga viene de la capa de arena esto es debido a el diámetro menor de grano. La antracita contribuye muy poco en la pérdida de carga y además logro atrapar las partículas más grandes.

3.2 Análisis económico.

La adaptación de lo construido experimentalmente a una escala unitaria requiere ciertos cálculos a adaptar.

- Tanque enfriador: Primero sería el tanque enfriador, si aspiramos a enfriar por 12 horas el agua residual para que no afecte en el proceso de clarificación, el tanque deberá tener el tamaño ideal con las recomendaciones usadas en la escala.

$$551L \times 1.5 = 661.2 \rightarrow 1000L$$

No existen tanque de 661.2 L que no sea diseñada personalizada, pero se puede conseguir uno de 1000L para reducir gastos y para afrontar posibles picos de producción.

- Tanque de clarificación: Por otro lado, el tanque para la clarificación deberá tener un agitador capaz de tratar aproximadamente 600L. Pero podemos separarlos por tandas y conseguir un equipo de 300L (250 L como área de operación) puesto que el proceso de clarificación no demoraría tanto. Por otro lado, la cantidad de PAC sólido y Flocculante aniónico se deberá adaptar para el tamaño de 551 L aplicando la solución madre de 10000 ppm de PAC y la solución de 1000 ppm de Flocculante aniónico.

- Primero la del PAC solido

$$40 \frac{mg \text{ PAC}}{L} \times 551L \times \frac{L_{\text{solución}}}{10000 \text{ mg PAC}} = 2.204L$$

- Segundo para el flocculante aniónico

$$0.1 \frac{mg \text{ flocculante}}{L} \times 551L \times \frac{L_{\text{solución}}}{1000 \text{ mg flocculante}} = 0.0551L (5.5mL)$$

- Filtración: Ahora bien, el tanque de filtración y sus medios filtrante, se debe tener el cuanta sus propiedades y capacidades. El filtro ha sido cedido, por lo que se basar con ese tanque para la demanda de agua residual a tratar. Primero tener en cuenta las dimensiones.

Entonces con todo esto y con indicaciones de proveedores, tenemos el siguiente costo del sistema.

Tabla 15. *Parámetros obtenidos del agua residual filtrada.*

Producto	Proveedor	Cantidad	Precio por Unidad	Precio
Tanque de reserva de agua 1000L	Plastigama	2	\$ 135,00	\$270,00
Balde industrial (22 Litros)	Kywi	3	\$ 5,91	\$17,73
Balde De 10 Litros N2	Kywi	2	\$ 2,06	\$4,12
Colador de tela	Megamaxi	1	\$ 2,06	\$1,39
Guantes de nitrilo	Estuardo Sánchez	1	\$ 5,78	\$5,78
Jeringa de 5 mL (100 unidades)	Biomed	1	\$ 11,01	\$11.01
Vaso precipitado (500 mL)	Biomed	1	\$ 2,03	\$2,03
Varilla de PE alta densidad (50 cm)	ZBJH	1	\$ 8,20	\$8,20
PAC solido (saco de 25 kg)	Acquetech	1	\$ 25,00	\$25,00
Floculante aniónico (por kilo)	Acquetech	1	\$ 25,00	\$25
Filtro Arena	-	0	Cedido	\$0,00
Arena lavada (saco de 25 Kg)	Acquetech	1	\$ 15,00	\$15,00
Antracita (por kilo)	FiltrShop	80	\$ 1,35	\$108,00
Total				\$490,26

3.3 Protocolos

3.3.1 Protocolo para la realización de la solución madre del PAC sólido.

$$10000 \frac{mg}{L} \times 5L \times \frac{1g}{1000 mg} = 50 g \text{ de PAC}$$

1. Del saco de 25 Kg, recoger y añadir 10 cucharadas (5g cada una) de PAC al balde de 10 Litros.
2. Añadir en el valde 5 Litros de agua.
3. Con la misma cuchara mezclar el PAC con el agua hasta ver que esté totalmente disuelta.

Importante: Con la solución se hacer hasta dos coagulaciones con la cantidad realizada.

3.3.2 Protocolo para la realización de la solución madre del floculante aniónico.

$$1000 \frac{mg}{L} \times 5L \times \frac{1g}{1000 mg} = 5 g \text{ de floculante}$$

1. Del Kg del floculante, recoger y añadir 1 cucharada (5g cada una) de floculante al balde de 10 Litros.
2. Añadir el 5 Litros de agua.
3. Con la misma cuchara mezclar el floculante con el agua hasta ver que esté totalmente disuelta.
4. Importante: Con la solución se hacer hasta cien floculaciones con la cantidad realizada; tratar de conservarla en un lugar fresco y cerrado.

3.3.3 Protocolo para la realización del proceso.

1. Depositar el agua residual, mediante del balde industrial, en el tanque de enfriamiento. Una vez depositado todo, dejar la tapa abierta.
2. Esperar 12 horas.
3. Con el balde previamente limpiado, ingresar el agua enfriada en el tanque de agitación. Importante: Limpiar el tanque de enfriamiento
4. Adicionar 2.2L de solución madre PAC.
5. Inmediatamente, agitar con la varilla PE durante 5 minutos
6. Luego, con una jeringa, recoger 5.5 mL de solución madre del floculante.
7. Añadir los 5.5 mL de solución al tanque con el agua residual.
8. Agitar durante 8 minutos.
9. Espera 1 hora.
10. Una vez sedimentado, con otro balde industrial, depositar el agua clarificada en el filtro de medio granular. Importante: Tener listo otro balde en la salida del filtro
11. Con el balde de salida recolectar el agua y depositarlo en el tanque de enfriamiento; que actuara como almacenamiento.
12. Agua lista para riego en la comuna.

3.3.4 Protocolo para retiro de sedimentos del tanque de agitación

1. Una vez retirado toda el agua clarificada posible, con el colador de tela, recoger los sedimentos del tanque.
2. Dejar lo recogido a escurrir durante 36 horas.
3. Con una funda, recoger y botar el solido
IMPORTANTE: El material al estar libre de componente tóxicos y los químicos usados no son dañinos y tóxicos, se puede retirar el solido en botes de basura.

CAPÍTULO 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones.

4.1.1 Conclusiones.

- El tanque enfriador demostró ser una unidad clave para garantizar condiciones térmicas seguras y homogéneas, para cumplir con los límites normativos.
- La prueba de jarras permitió determinar una dosis óptima de coagulante y floculante (40 ppm PAC + 1 ppm floculante), asegurando una clarificación eficiente con bajo consumo químico.
- El filtro antracita-arena proporcionó un pulido robusto, reteniendo partículas gruesas y flocos finos, y mejorando significativamente la calidad del efluente, lo que valida su incorporación como etapa indispensable en el diseño.
- La operación integrada de las unidades confirmó que el sistema propuesto es técnicamente viable, siendo esta de bajo costo comparadas con otras operaciones y de fácil adaptabilidad a condiciones rurales, favoreciendo su implementación en la comuna Barcelona y su réplica en los diferentes centros de procesamiento que existen.

4.1.2 Recomendaciones.

- El escalamiento del sistema consta en dimensionar el tanque enfriador, clarificador y filtro según el caudal diario real de 551,74 L/día, manteniendo el factor de 1,5 para amortiguamiento.
- Optimización química consta de implementar un control operativo para mantener las dosis de PAC y floculante en su rango óptimo, evitando sobredosificación que genere costos adicionales y menor eficiencia.
- Al realizar mantenimiento preventivo se debe establecer protocolos periódicos de limpieza del tanque enfriador y lavador a contracorriente del filtro para mantener su eficiencia y prolongar la vida útil del sistema.

- Se debe realizar análisis físicoquímicos rutinarios para evaluar parámetros como turbidez, DQO, DBO y TDS, asegurando el cumplimiento de la normativa TULSMA para reúso de riego o infiltración.
- Se debe realizar capacitaciones a los operadores locales en el manejo de protocolos de seguridad, del manejo básico de las unidades y protocolos de mantenimiento, así como de equipos de protección, para garantizar así la sostenibilidad técnica y social del sistema, así como la seguridad de las personas que trabajan ahí que por lo general se trata de personas mayores de edad

REFERENCIAS

- Borbor, J. L. (2015). Mejoras productivas en el tratamiento de Paja Toquilla en el Centro de Tratamiento de Paja Toquilla de la comuna Barcelona, parroquia Manglaralto, provincia de Santa Elena, Ecuador. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 2.
- CONTYQUIM. (24 de Julio de 2024). *CONTYQUIM*. Obtenido de CONTYQUIM: <https://contyquim.com/blog/policloruro-de-aluminio-pac-en-tratamiento-de-agua#:~:text=Uno%20de%20los%20principales%20beneficios,los%20procesos%20subsecuentes%20de%20tratamiento>
- DaschaStyle. (2020). *DASCHA*. Obtenido de DASCHA: <https://daschastyle.com/proceso-de-recoleccion-de-la-paja-toquilla/#:~:text=Una%20vez%20seca%20la%20paja%2C,sombrero%20fino%20de%20paja%20toquilla>
- Davis, M. (2020). *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice*. McGraw-Hill.
- EPA. (2002). *Onsite Wastewater Treatment Systems Manual*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency. Obtenido de https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/2004_07_07_septics_septic_2002_osdm_all.pdf
- Expo-Ambiente De Biotemas y Otros Retos. (13 de mayo de 2016). *Colegio Mayor de Antioquia*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.colmayor.edu.co/wp-content/uploads/2019/10/120biologa_floral_de_la_carlud.pdf
- GIZ, & WSP-LAC. (2010). *Manual de diseño y operación de filtros anaerobios*. La Paz: GIZ / Programas de Agua y Saneamiento de Areas Rurales.
- González, A. L. (2022). *Caracterización socio-productiva del cultivo de paja toquilla (Carludovica palmata)*. Los Ríos.

INEN, Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2016). *NTE INEN 1108: Productos de pesca. Pescado congelado. Requisitos*. Quito: INEN.

Institut National du Patrimoine Culturel. (2010). *UNESCO*. Obtenido de UNESCO:
<https://ich.unesco.org/es/RL/tejido-tradicional-del-sombrero-ecuatoriano-de-paja-toquilla-00729>

MAATEE. (2015). *Acuerdo Ministerial No. 028: Sustitúyese el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*. Quito: Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador Registro Oficial, Edición Especial No. 270.

Mackenzie, L. (2020). *WATER AND WASTEWATER ENGINEERING*. New York: Mc Graw Hill.

Mercer, B. W. (1970). Ammonia removal by natural zeolites. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 362–373.

Metcalf, & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. New York: Mc Graw Hill Education.

Ministerio del Ambiente. (2021). *Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente (TULSMA). Libro VI: De la Calidad Ambiental. Anexo 1: Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes*. Quito: Registro Oficial del Ecuador.

OMS. (2019). *Guías para el saneamiento y la salud*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud. Obtenido de <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/330097/9789243514703-spa.pdf>

Perero, C. (2024). *Repotenciación del centro Artesanal de Procesamiento de Paja Toquilla*. Comuna Barcelona.

Ram, A., Tiwari, S., Pandey, H., Chaurasia, A., Singh, S., & Singh, Y. (2021). Groundwater quality assessment using water quality index (WQI) under GIS framework. *Applied Water Science*, 46.

Tchobanoglous, G. B. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. New York: McGraw-Hill.

Travelec. (5 de 9 de 2023). *Ecuador Travel*. Obtenido de Ecuador Travel:
<https://ecuador.travel/sombrero-de-paja-toquilla-una-prenda-patrimonial-de-sello-ecuadoriano/>

World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. Geneva: World Health Organization.

APENDICES

Apéndice A. *Determinación del CQO y DBO5*



Apéndice B. *Resultados de la filtración de la muestra 1*



Apéndice C. *Resultados de la clarificación de la muestra 1*



Apéndice D. *Recolección de materiales para la escala del tanque enfriador*



