



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIOFILTRO A ESCALA CON MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI-SALACHE”

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título
Ingenieras Ambientales

Autoras:

Carrera Lasluisa Emilia Adriana
Sanguña Mullo Karen Nicol

Tutor:

Agreda Oña José Luis

LATACUNGA – ECUADOR

Agosto 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Carrera Lasluisa Emilia Adriana, con cédula de ciudadanía No. 1728732726 y Sanguña Mullo Karen Nicol, con cédula de ciudadanía No. 05550569917, declaramos ser autoras del presente Proyecto de Investigación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIOFILTRO A ESCALA CON MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI- SALACHE”**., siendo el Ingeniero Mg. José Luis Ágreda Oña, Tutor del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 06 de agosto del 2026

Carrera Lasluisa Emilia Adriana
C.C: 1728732726
ESTUDIANTE

Sanguña Mullo Karen Nicol
C.C: 05550569917
ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTORA

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **CARRERA LASLUIA EMILIA ADRIANA** identificada con cédula de ciudadanía **1728732726** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIOFILTRO A ESCALA CON MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI- SALACHE”**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: octubre 2022-marzo 2023

Finalización de la carrera: abril 2026 – agosto 2026

Tutor: Ing. José Luis Ágreda Oña Mg.

Tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIOFILTRO A ESCALA CON MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI- SALACHE”**.

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 6 días del mes de agosto del 2026.

Emilia Adriana Carrera Lasluisa.

LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CESIONARIA

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTORA

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **SANGUÑA MULLO KAREN NICOL**, identificada con cédula de ciudadanía **0550559917** de estado civil soltera a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIOFILTRO A ESCALA CON MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI- SALACHE”**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: octubre 2022-marzo 2023

Finalización de la carrera: abril 2026 – agosto 2026

Tutor: Ing. José Luis Ágreda Oña Mg.

Tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIOFILTRO A ESCALA CON MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI- SALACHE”**,

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 6 días del mes de agosto del 2026.

Karen Nicol Sanguña Mullo.

LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CESIONARIA

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación con el título:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIOFILTRO A ESCALA CON MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI-SALACHE”, de Carrera Lasluisa Emilia Adriana y Sanguña Mullo Karen Nicol, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del Aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también han incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la Pre defensa.

Latacunga, 06 de agosto del 2026

Ing. José Luis Ágreda Oña Mg.
C.C: 0401332101
DOCENTE TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, los postulantes: Carrera Lasluisa Emilia Adriana y Sanguña Mullo Karen Nicol , con el título de Proyecto de Investigación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIOFILTRO A ESCALA CON MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI- SALACHE”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 6 de agosto del 2026

Ing. Vladimir Marconi Ortiz Bustamante, PhD.

C.C: 0502188451

LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg.

C.C: 0503220063

LECTOR 2 (MIEMBRO)

Ing. Vincent Benjamín Velastegui Tapia, Mg.

C.C: 0502547649

LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para superar cada dificultad durante esta importante etapa de mi vida.

A mi amiga Karen Sanguña, por su amistad sincera y por permanecer a mi lado a lo largo de este camino, incluso cuando las circunstancias no fueron fáciles.

A Josue Campos, por confiar en mis capacidades y recordarme, especialmente en los momentos de incertidumbre, todo lo que era capaz de lograr; gracias por estar conmigo en esta etapa y hacerlo significativo.

De manera muy especial, expreso mi sincero agradecimiento al Ing. José Luis Ágreda, tutor de mi proyecto de investigación, por haberme guiado con su paciencia y dedicación como docente.

Emilia Adriana Carrera Lasluisa

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mi familia por su apoyo, confianza y motivación, los cuales fueron fundamentales para culminar esta investigación y alcanzar esta meta.

A mis padres Edison Sanguña y Verónica Mullo, mi inspiración y mi fuerza para seguir adelante, por ser un pilar esencial en mi formación personal y profesional. Gracias por creer en mí, confiar en mis capacidades y brindarme siempre su apoyo y ejemplo de esfuerzo y dedicación, los cuales me impulsaron a seguir adelante hasta concluir con éxito esta etapa.

A mis hermanos Andy Sanguña y Karol Sanguña, mis compañeros de vida y de innumerables aventuras, por su compañía, apoyo y por motivarme constantemente a creer en mí y en mis capacidades.

A mi amiga y compañera de tesis, Emilia Carrera, por compartir este camino conmigo, por el trabajo en equipo, el apoyo y los buenos momentos que hicieron de esta experiencia una etapa inolvidable.

Y, finalmente, a mí, por la constancia, el esfuerzo y la perseverancia que me permitieron superar cada desafío y alcanzar esta importante meta.

Sanguña Mullo Karen Nicol

DEDICATORIA

Este locro lo dedico con todo mi amor y gratitud a mis padres, Victor Carrera y María Lasluisa, quienes han sido mi apoyo incondicional y mi mayor fortaleza a lo largo de este camino. Gracias por cada esfuerzo y sacrificio, por sus consejos, por creer en mí y por acompañarme en cada etapa hasta alcanzar esta meta.

A mi querido hermano, Santiago Carrera, por su cariño, sus palabras de aliento y compañía durante este proceso, y por estar presente en los momentos importantes de mi vida.

A mi familia, que ha sido mi motivación para seguir adelante, dedico con todo mi corazón este logro que representa el esfuerzo y la constancia de todos estos años.

Emilia Adriana Carrera Lasluisa

DEDICATORIA

Este logro está dedicado a las personas que han sido parte fundamental de mi vida y que, con su presencia y apoyo, hicieron posible alcanzar esta meta.

A mis padres, Edison Sanguña y Verónica Mullo, por enseñarme el valor del esfuerzo, la responsabilidad y la perseverancia. Gracias por confiar en mí y acompañarme siempre en cada paso de mi formación.

A mis hermanos, Andy y Karol, por compartir conmigo los mejores momentos, por su compañía, sus consejos y por ser un apoyo constante en cada etapa de mi vida.

A mi abuelita Luz Maria, con todo mi cariño, por su ternura, sus enseñanzas y el amor con el que siempre ha estado presente. Su ejemplo y sus palabras ocuparán siempre un lugar especial en mi corazón.

Karen Nicol Sanguña Mullo

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIOFILTRO A ESCALA CON MATERIAL LIGNOCELULÓSICO PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI- SALACHE”

Autoras:

Carrera Lasluisa Emilia Adriana
Sanguña Mullo Karen Nicol

RESUMEN

Los biofiltros constituyen una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales, ya que emplean materiales naturales capaces de retener contaminantes y mejorar la calidad del agua. La presente investigación tuvo como objetivo diseñar y construir un biofiltro a escala utilizando bagazo de caña de azúcar y aserrín como materiales lignocelulósicos, caracterizar el efluente secundario mediante la determinación de pH, temperatura, turbidez, sólidos disueltos totales (TDS) y demanda química de oxígeno (DQO), evaluar la eficiencia de remoción y comparar el desempeño de ambos materiales filtrantes. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada y con un diseño experimental comparativo. El diseño de los biofiltros se fundamentó en los criterios técnicos establecidos en la Norma ANSI/AWWA B100-25 para la disposición de las capas filtrantes de arena y grava, adaptando dichos criterios al emplear materiales lignocelulósicos en un sistema de biofiltración a escala. Se construyeron dos biofiltros de flujo descendente con capas de grava, arena y bagazo de caña de azúcar y aserrín como medios filtrantes. La evaluación se realizó mediante el análisis de pH, temperatura, turbidez, TDS y DQO antes y después del tratamiento. Los resultados mostraron que ambos biofiltros alcanzaron una remoción del 100 % de la turbidez. El biofiltro con aserrín presentó el mejor desempeño al reducir los TDS de 2,78 mg/L a 2,40 mg/L y la DQO de 47 mg/L a 7 mg/L. En contraste, el biofiltro con bagazo de caña de azúcar incrementó los TDS hasta 3,51 mg/L y la DQO hasta 77 mg/L, debido a la liberación de compuestos solubles y materia orgánica. Se concluyó que el aserrín fue el material más eficiente para el tratamiento complementario de aguas residuales domésticas, mientras que el bagazo de caña requiere acondicionamiento previo para optimizar su desempeño como medio filtrante.

Palabras Clave: biofiltración, efluente secundario, lignocelulosa, remoción, aguas residuales.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES

THEME: “DESIGN AND CONSTRUCTION OF A FULL-SCALE BIOFILTER USING LIGNOCELLULOSIC MATERIAL FOR THE REMOVAL OF CONTAMINANTS FROM DOMESTIC WASTEWATER AT THE TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI-SALACHE”

Authors:

Carrera Lasluisa Emilia Adriana
Sanguña Mullo Karen Nicol

ABSTRACT

Biofilters are a sustainable alternative for wastewater treatment, as they use natural materials capable of retaining pollutants and improving water quality. The objective of this research was to design and construct a full-scale biofilter using sugarcane bagasse and sawdust as lignocellulosic materials, characterize the secondary effluent by determining pH, temperature, turbidity, total dissolved solids (TDS), and chemical oxygen demand (COD), evaluate removal efficiency, and compare the performance of both filter materials. The research was conducted using a quantitative, applied approach with a comparative experimental design. The design of the biofilters was based on the technical criteria established in the ANSI/AWWA B100-25 Standard for the arrangement of sand and gravel filter layers, adapting these criteria to the use of lignocellulosic materials in a full-scale biofiltration system. Two downflow biofilters were constructed with layers of gravel, sand, sugarcane bagasse, and sawdust as filter media. The evaluation was conducted by analyzing pH, temperature, turbidity, TDS, and COD before and after treatment. The results showed that both biofilters achieved 100% turbidity removal. The sawdust biofilter performed best, reducing TDS from 2.78 mg/L to 2.40 mg/L and COD from 47 mg/L to 7 mg/L. In contrast, the biofilter using sugarcane bagasse increased TDS to 3.51 mg/L and COD to 77 mg/L, due to the release of soluble compounds and organic matter. It was concluded that sawdust was the most efficient material for the supplementary treatment of domestic wastewater, while sugarcane bagasse requires pretreatment to optimize its performance as a filter medium.

KEYWORDS: Biofiltration, Secondary effluent, Lignocellulose, Removal, Wastewater.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	vii
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	viii
AGRADECIMIENTO	ix
DEDICATORIA.....	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
ÍNDICE GENERAL	xv
ÍNDICE DE TABLA	xix
ÍNDICE DE ILUSTRACIÓN.....	xx
ÍNDICE DE ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2 INTRODUCCIÓN.....	2
3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	3
3.1 Beneficiarios directos	4
3.2 Beneficiarios indirectos	4
4 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	4
4.1 Planteamiento del problema	4
5 OBJETIVOS.....	6
5.1 Objetivo General.....	6
5.2 Objetivos Específicos	6
6 ACTIVIDADES Y SISTEMAS DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS.....	6
7 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA.....	7
7.1 Fundamentación Teórica	7

7.1.1	Problemática ambiental de las aguas residuales domésticas	7
7.1.2	Definición de aguas residuales domésticas	8
7.1.3	Características de las aguas residuales domésticas	8
7.1.4	Parámetros de calidad del agua residual.....	9
7.1.5	Tratamiento de aguas residuales.....	10
7.1.6	Procesos de tratamiento de aguas residuales	10
7.1.7	Biofiltración.....	13
8	HIPÓTESIS	18
9	ÁREA DE ESTUDIO	18
10	METODOLOGÍA.....	19
10.1	Enfoque de la investigación.....	19
10.2	Tipo y Diseño de Investigación	19
10.3	Métodos de la Investigación	20
10.3.1	Método Inductivo	20
10.3.2	Método Deductivo	20
10.4	Técnicas	20
10.5	Instrumentos	20
10.6	Materiales y Equipos	21
10.6.1	Tratamiento previo del efluente.....	21
10.6.2	Construcción y operación del biofiltro	21
10.7	Diseño Experimental	21
10.7.1	Cálculo de la dosis de coagulante.....	22
10.7.2	Cálculo de la dosis de floculante	22
10.8	Desarrollo experimental	23
10.8.1	Recolección y acondicionamiento del efluente	23
10.8.2	Caracterización inicial del agua residual	24
10.8.3	Tratamiento previo del efluente.....	25

10.8.4	Preparación de los medios materiales filtrantes	27
10.8.5	Construcción del biofiltro con bagazo de caña.....	32
10.8.6	Construcción del biofiltro con aserrín.	34
10.8.7	Operación de los biofiltros	35
10.8.8	Caracterización final del agua tratada	36
10.9	Análisis de datos.....	36
10.10	Cálculo y diseño del biofiltro	37
10.10.1	Diseño del biofiltro.....	37
10.10.2	Cálculo del área interna de la base	39
10.10.3	Cálculo del volumen total del biofiltro.....	39
10.10.4	Cálculo del volumen total del lecho filtrante.....	40
10.10.5	Cálculo de la eficiencia de remoción.....	40
10.10.6	Cálculo de la remoción de Turbidez (Biofiltro con Bagazo de Caña).....	41
10.10.7	Cálculo de la remoción de TDS (Biofiltro con Bagazo de Caña)	41
10.10.8	Cálculo de la remoción de DQO (Biofiltro con Bagazo de Caña)	41
10.10.9	Cálculo de la remoción de Turbidez (Biofiltro con Aserrín).....	41
10.10.10	Cálculo de la remoción de TDS (Biofiltro con Aserrín)	42
10.10.11	Cálculo de la remoción de DQO (Biofiltro con Aserrín)	42
10.11	Comparación del desempeño de los biofiltros.....	42
10.11.1	Resultado de Desempeño de los Biofiltros de bagazo de caña y Aserrín (Turbidez).....	43
10.11.2	Resultado de Desempeño de los Biofiltros de bagazo de caña y Aserrín (TDS)	43
10.11.3	Resultado de Desempeño de los Biofiltros de bagazo de caña y Aserrín (DQO)	43
11	COMPARACIÓN DE HIPÓTESIS	43
12	ACEPTACIÓN DE HIPÓTESIS	44
13	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	44

13.1	Caracterización inicial del agua residual doméstica.....	44
13.2	Análisis del potencial de hidrógeno (pH)	45
13.2.1	Discusión de resultados de la turbidez	46
13.2.2	Resultados del pH antes y después del tratamiento	46
13.2.3	Interpretación.....	46
13.2.4	Discusión de resultados del pH	47
13.3	Resultados del agua residual antes y después del tratamiento.....	47
13.3.1	Interpretación.....	48
13.3.2	Interpretación de la tabla	49
13.4	Resultados obtenidos de temperatura	49
13.4.1	Interpretación de resultados.....	49
13.5	Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (TDS) mediante el biofiltro de bagazo de caña y aserrín.....	50
13.5.1	Interpretación.....	50
13.5.2	Análisis y discusión de los resultados de TDS	51
13.6	Remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	51
13.6.1	Interpretación.....	51
13.6.2	Análisis y discusión de los resultados de DQO	52
14	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	52
15	CONCLUSIONES.....	54
16	RECOMENDACIONES	55
17	BIBLIOGRAFÍAS.....	55

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1 Actividades Desarrollar durante el proyecto	6
Tabla 2 Caracterización inicial del agua residual doméstica.....	44
Tabla 3 Tabla de resultados turbidez	45
Tabla 4 Resultados del pH antes y después del tratamiento	46
Tabla 5 Resultados del agua residual antes y después del tratamiento	47
Tabla 6 Comparación entre tratamientos	48
Tabla 7 Variación de temperatura antes y después del tratamiento	49
Tabla 8 Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (TDS) mediante el biofiltro de bagazo de caña y aserrín	50
Tabla 9 Remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) mediante el biofiltro de bagazo de caña y aserrín	51

ÍNDICE DE ILUSTRACIÓN

Ilustración 1. Recolección del agua residual en la PTAR de la Universidad Técnica de Cotopaxi.	23
Ilustración 2. Aireación del efluente en el primer tanque mediante bombas de oxigenación.	23
Ilustración 3. Medición de pH y temperatura	24
Ilustración 4. Medición de TDS.....	24
Ilustración 5. Determinación de turbidez.....	25
Ilustración 6. Determinación DQO	25
Ilustración 7. Aplicación del coagulante.....	26
Ilustración 8. Aplicación de Floculante	26
Ilustración 9. Proceso de Coagulación y Floculación	26
Ilustración 10. Lavado del bagazo de caña utilizando agua potable.....	27
Ilustración 11. Lavado del bagazo de caña de azúcar utilizando agua destilada	27
Ilustración 12. Pesado del bagazo de caña de azúcar.....	28
Ilustración 13. Proceso de trituración del bagazo de caña de azúcar	28
Ilustración 14. Tamizado inicial del aserrín.....	29
Ilustración 15. Lavado del aserrín utilizando agua potable	29
Ilustración 16. Lavado del aserrín utilizando agua destilada.....	30
Ilustración 17. Peso de aserrín	30
Ilustración 18. Secado	31
Ilustración 19. Tamizado final del aserrín	31
Ilustración 20. Proceso de lavado	32
Ilustración 21. Capa de grava gruesa 10cm	32
Ilustración 22. Capa de grava fina 5cm	33
Ilustración 23. Capa de arena 10cm.....	33
Ilustración 24. Capa de bagazo de caña de azúcar 15cm.....	33
Ilustración 25. Capa de grava gruesa 10cm	34
Ilustración 26. Capa de grava fina 5cm	34
Ilustración 27. Capa de arena 10cm.....	35
Ilustración 28. Capa de aserrín 15cm.....	35
Ilustración 29. Biofiltro.....	36
Ilustración 30. Esquema.....	37

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto: “Diseño y construcción de un biofiltro a escala con material lignocelulósico para la remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas de la universidad técnica de Cotopaxi- Salache”

Fecha de inicio: Abril del 2026

Fecha de finalización: Agosto del 2026

Lugar de ejecución: Universidad Técnica de Cotopaxi

Barrio: Salache

Parroquia: Eloy Alfaro

Cantón: Latacunga

Provincia: Cotopaxi

Zona: 3

Institución: Universidad Técnica de Cotopaxi

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales

Carrera que auspicia: Carrera de Ingeniería Ambiental

Proyecto de investigación vinculado: Gestión de recurso naturales, biodiversidad, biotecnología y genética para el desarrollo humano

Equipo de Trabajo

- **Tutor de Titulación:** Ing. José Luis Ágredda Oña
- **Investigador 1:** Carrera Lasluisa Emilia Adriana
- **Investigador 2:** Sanguña Mullo Karen Nicol

Área de Conocimiento: Tratamiento de Aguas Residuales mediante Biofiltración

Línea de investigación: Análisis, conservación y aprovechamiento de la Biodiversidad Local

Sub líneas de investigación de la Carrera: Manejo y Conservación de Recurso Hídrico

2 INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional, la urbanización acelerada y las actividades productivas han incrementado significativamente la generación de aguas residuales domésticas, representando uno de los principales desafíos ambientales a nivel global y, particularmente, en países en desarrollo como Ecuador. Estas aguas contienen altas concentraciones de materia orgánica (expresada como demanda química de oxígeno - DQO y demanda bioquímica de oxígeno - DBO), nutrientes (nitrógeno y fósforo), sólidos suspendidos y microorganismos patógenos que, de no tratarse adecuadamente, provocan eutrofización de cuerpos de agua, contaminación de fuentes subterráneas y riesgos para la salud pública (Montenegro-Rosero et al., 2022; Performance of wood chips..., 2020). En el contexto de instituciones educativas como la Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC) – Sede Salache, la gestión de estos efluentes se convierte en una prioridad, ya que las descargas sin tratamiento pueden afectar ecosistemas locales y contradecir los objetivos de sostenibilidad institucional y nacional.

Ante esta realidad, las tecnologías convencionales de tratamiento (como plantas de lodos activados o lagunas) resultan costosas en inversión inicial, operación y mantenimiento, limitando su aplicabilidad en contextos de recursos moderados. Por ello, los sistemas biológicos descentralizados, especialmente los biofiltros a escala basados en materiales lignocelulósicos, emergen como una alternativa sostenible, económica y de fácil implementación. Estos biofiltros utilizan residuos agrícolas o forestales (astillas de madera, cáscaras de maní, cornucobs, fibras de coco, bagazo, entre otros) como medio de soporte, los cuales ofrecen alta porosidad, gran superficie específica y capacidad para albergar biofilms microbianos activos (ACS ES&T Water, 2025).

Los materiales lignocelulósicos son particularmente ventajosos porque, además de actuar como filtro físico, liberan lentamente fuentes de carbono orgánico que sirven como sustrato para procesos denitrificantes, favoreciendo la remoción simultánea de nitrógeno y materia orgánica. Su alta resistencia a la biodegradación (debido al contenido de lignina) prolonga la vida útil del medio y reduce la frecuencia de reemplazo, mientras que su bajo costo y disponibilidad local promueven la economía circular y reducen la huella de carbono asociada al tratamiento (Agricultural lignocellulose biochar..., 2025; Domestic wastewater treatment using oakwood biochar, 2025).

Estudios recientes han demostrado la efectividad de estos sistemas. Por ejemplo, biofiltros contruidos con mezclas de astillas de madera y cáscaras de maní han alcanzado remociones cercanas al 80% de DQO en aguas residuales domésticas, con mejoras notables en la conductividad hidráulica y menor tendencia al colmatado cuando se integran organismos como lombrices (*Eisenia foetida*) o plantas (Performance of wood chips..., 2020). De manera similar, conllustraciónciones que combinan corncobs y sawdust acopladas a celdas de combustible microbiano han reportado eficiencias superiores al 86% en remoción de DQO, 91% en DBO y altas tasas de recuperación de energía, superando a sistemas convencionales en contextos descentralizados (Montenegro-Rosero et al., 2022).

Otro avance relevante es el empleo de fibras de coco como medio biofiltrante. Gracias a su elevada porosidad (>82%), gran superficie específica (aprox. 3,23 m²/g) y alto contenido de lignina (44,6%), estos materiales permiten un arranque acelerado del biofiltro (alrededor de 30 días) y remociones eficientes de amonio, nitratos, nitritos y materia orgánica a través de procesos de nitrificación-desnitrificación simultánea (ACS ES&T Water, 2025).

La presente tesis aborda esta problemática mediante el diseño y construcción de un biofiltro a escala con material lignocelulósico para la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales domésticas generadas en la Universidad Técnica de Cotopaxi – Sede Salache. El estudio incluye la caracterización de los efluentes, la selección y acondicionamiento del material lignocelulósico disponible en la zona, la evaluación de la eficiencia de remoción de parámetros fisicoquímicos y el análisis de aspectos técnicos, económicos y ambientales. De esta forma, se busca no solo proponer una solución técnica viable, sino también contribuir al conocimiento aplicado en tecnologías verdes y al cumplimiento de normativas ambientales ecuatorianas.

3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El diseño y construcción de un biofiltro a escala utilizando bagazo de caña de azúcar y aserrín constituye una alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, campus Salache. El aprovechamiento de estos materiales lignocelulósicos permite incorporar residuos de bajo costo y amplia disponibilidad en una propuesta orientada al tratamiento del agua, favoreciendo el uso eficiente de los recursos naturales y el desarrollo de tecnologías sostenibles (Mahmud & Anannya, 2021; Kamboj et al., 2024).

Desde la perspectiva económica, el empleo de bagazo de caña de azúcar y aserrín representa una opción viable debido a que ambos materiales son de fácil obtención y bajo costo, lo que favorece el desarrollo de sistemas de tratamiento accesibles y con potencial de aplicación en instituciones educativas y proyectos ambientales (Hiranobe et al., 2024).

Finalmente, desde el enfoque de la sostenibilidad, la investigación integra el aprovechamiento de residuos, la protección del recurso hídrico y el uso de tecnologías ambientalmente responsables. Asimismo, generará un aporte para la Universidad Técnica de Cotopaxi al proporcionar una propuesta basada en materiales naturales que podrá servir como referencia para futuras investigaciones en el área del tratamiento de aguas residuales (CEPAL, 2024; ONU-Agua, 2024).

3.1 Beneficiarios directos

Los beneficiarios directos de este proyecto serán la Universidad Técnica de Cotopaxi, extensión Salache, principalmente los estudiantes, docentes, investigadores y personal administrativo, quienes dispondrán de un biofiltro a escala como herramienta para fortalecer las actividades de investigación, docencia y prácticas académicas. Además, la institución contará con una alternativa sostenible para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, promoviendo una mejor gestión ambiental dentro del campus.

3.2 Beneficiarios indirectos

Los beneficiarios indirectos serán la población y los ecosistemas ubicados en el área de influencia de la Universidad Técnica de Cotopaxi, debido a que la implementación del biofiltro contribuirá a reducir la carga contaminante de las aguas residuales. Asimismo, los resultados obtenidos podrán servir como referencia para otras instituciones educativas, entidades públicas y privadas interesadas en aplicar tecnologías sostenibles y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales.

4 EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

4.1 Planteamiento del problema

La contaminación de los recursos hídricos ocasionada por la descarga de aguas residuales domésticas constituye uno de los principales desafíos ambientales a nivel mundial, debido a que estos efluentes contienen materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes y

microorganismos que, cuando no reciben un tratamiento adecuado, deterioran la calidad del agua y afectan los ecosistemas acuáticos (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2024).

En América Latina, a pesar de los avances alcanzados en materia de saneamiento, aún persisten limitaciones relacionadas con la eficiencia de los sistemas de tratamiento, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías sostenibles que permitan optimizar la calidad del efluente tratado (CEPAL, 2024).

En Ecuador, la protección del recurso hídrico constituye un eje fundamental de la gestión ambiental. En este sentido, el Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (RCOA) establece las disposiciones técnicas y administrativas para la prevención y control de la contaminación ambiental, incluyendo el cumplimiento de los límites máximos permisibles para la descarga de efluentes, promoviendo la implementación de procesos de tratamiento que reduzcan la carga contaminante y prevengan impactos negativos sobre los cuerpos de agua y los ecosistemas acuáticos (República del Ecuador, 2019).

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la Universidad Técnica de Cotopaxi, campus Salache, genera un efluente secundario producto de su sistema de tratamiento. Considerando la importancia de mejorar la calidad del agua tratada y promover tecnologías sostenibles, resulta pertinente desarrollar alternativas complementarias que contribuyan a la remoción de contaminantes presentes en dicho efluente, favoreciendo la optimización del proceso de tratamiento y el cumplimiento de los criterios establecidos en la normativa ambiental ecuatoriana.

Entre las alternativas de tratamiento, los biofiltros constituyen una tecnología de bajo costo y fácil implementación que aprovecha materiales con capacidad de adsorción y filtración para mejorar la calidad del agua. Dentro de los materiales lignocelulósicos, el bagazo de caña de azúcar y el aserrín han despertado un creciente interés debido a su abundancia, disponibilidad y estructura porosa, características que favorecen la retención de sólidos, materia orgánica y otros contaminantes presentes en las aguas residuales. Asimismo, el aprovechamiento de estos residuos agroindustriales y forestales contribuye a la economía circular y al desarrollo de tecnologías sostenibles para el tratamiento del agua (Montenegro-Rosero et al., 2022; Thorat et al., 2025).

A pesar de las investigaciones desarrolladas sobre biofiltración, aún es limitada la información referente al diseño y construcción de biofiltros a escala elaborados específicamente

con bagazo de caña de azúcar y aserrín para el tratamiento de aguas residuales domésticas en instituciones de educación superior del Ecuador. En particular, no se dispone de estudios aplicados a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Técnica de Cotopaxi, campus Salache, que permitan establecer una propuesta de biofiltración utilizando estos materiales lignocelulósicos. En consecuencia, surge la necesidad de diseñar y construir un biofiltro a escala con bagazo de caña de azúcar y aserrín para el tratamiento de las aguas residuales domésticas generadas en esta institución, aportando información técnica que contribuya al desarrollo de alternativas sostenibles para la gestión del recurso hídrico.

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Diseño y construcción de un biofiltro a escala con material lignocelulósico para la remoción de contaminantes de aguas residuales domésticas.

5.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el efluente secundario en pH, temperatura, turbidez, TDS y DQO.
- Diseñar columnas de biofiltración en flujo descendente con material lignocelulósico.
- Evaluar el desempeño de los biofiltros elaborados con material lignocelulósico mediante el análisis de la eficiencia de remoción de turbidez, TDS y DQO.

6 ACTIVIDADES Y SISTEMAS DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Tabla 1

Actividades Desarrollar durante el proyecto

OBJETIVO	METODOLOGIA	ACTIVIDAD	RESULTADOS
• Caracterizar el efluente secundario en pH, temperatura, turbidez, TDS y DQO.	Standard Models	Mediante métodos normalizados, pH, temperatura se analizaron en laboratorio la turbidez, los TDS y DQO	Se determinaron los valores iniciales de pH, temperatura, turbidez, TDS y DQO del efluente secundario.
• Diseñar columnas de biofiltración en flujo descendente con material lignocelulósico.	Standard Models Metodología por de cálculo eficiencia	Se realizaron muestreos del afluente de cada columna. Se analizarán en laboratorio la	Se construyeron y operaron dos biofiltros a escala con bagazo de caña de azúcar y aserrín.

		turbidez, los TDS y la DQO, y se procesarán los datos para calcular los porcentajes de remoción.	
•	Evaluar el desempeño de los biofiltros elaborados con material lignocelulósico mediante el análisis de la eficiencia de remoción de turbidez, TDS y DQO.	Standard Models Observación directa Comparar la eficiencia de remoción de los parámetros fisicoquímicos obtenida de los biofiltros para evaluar su desempeño	El biofiltro con aserrín presentó el mejor desempeño, mientras que ambos biofiltros alcanzaron una remoción del 100 % de la turbidez.

Elaborado por: Carrera E. Sanguña K. (2026).

7 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

7.1 Fundamentación Teórica

7.1.1 Problemática ambiental de las aguas residuales domésticas

La generación de aguas residuales domésticas constituye uno de los principales desafíos ambientales a nivel mundial debido al incremento de la población, la urbanización acelerada y el aumento en el consumo de agua. Cuando estas aguas son descargadas sin un tratamiento adecuado, transportan una elevada carga de materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes, microorganismos patógenos y contaminantes emergentes que deterioran la calidad de los recursos hídricos y generan efectos negativos sobre los ecosistemas y la salud humana. Según UNESCO (2024), la contaminación del agua derivada de aguas residuales insuficientemente tratadas limita la disponibilidad de agua de calidad, afecta la biodiversidad y compromete el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6, relacionado con el acceso al agua limpia y al saneamiento.

La problemática ambiental asociada a las aguas residuales se ha intensificado debido a que una proporción importante de estos efluentes continúa siendo descargada a ríos, lagos y quebradas sin recibir un tratamiento eficiente. Koul et al. (2022) sostienen que esta situación favorece el deterioro progresivo de los cuerpos de agua, incrementando la concentración de

contaminantes orgánicos e inorgánicos y reduciendo la capacidad natural de autodepuración de los ecosistemas acuáticos. Como consecuencia, se altera el equilibrio ecológico, disminuye la disponibilidad de oxígeno disuelto y se afecta la supervivencia de numerosas especies acuáticas.

7.1.2 Definición de aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas corresponden al agua que ha sido utilizada en actividades cotidianas dentro de viviendas, instituciones educativas, hospitales, oficinas y establecimientos comerciales, adquiriendo características fisicoquímicas y microbiológicas diferentes a las del agua de abastecimiento debido a la incorporación de residuos orgánicos e inorgánicos durante su uso (Osorio-Rivera, 2021; Tamayo et al., 2024).

Estas aguas contienen una mezcla compleja de sustancias disueltas y suspendidas, compuesta principalmente por materia orgánica biodegradable, sólidos suspendidos, grasas, aceites, detergentes, nutrientes, microorganismos patógenos y contaminantes emergentes como residuos farmacéuticos y productos de higiene personal. La composición y concentración de estos contaminantes varían según el tipo de actividad desarrollada, el consumo de agua y las características socioeconómicas de la población (Osorio-Rivera, 2021; Tamayo et al., 2024).

Desde el punto de vista ambiental, las aguas residuales domésticas representan uno de los principales desafíos para la gestión sostenible de los recursos hídricos. Cuando son descargadas directamente a ríos, quebradas, lagos o suelos sin un tratamiento previo, provocan alteraciones significativas en la calidad del agua, incrementando la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO), las concentraciones de nitrógeno y fósforo, así como la presencia de microorganismos patógenos, generando procesos de eutrofización y afectando la biodiversidad acuática (Tamayo et al., 2024; ONU-Agua, 2024).

7.1.3 Características de las aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas presentan características variables debido a la diversidad de actividades que las originan; sin embargo, poseen una composición relativamente estable cuando provienen de instalaciones con actividades predominantemente domésticas. Sus principales componentes corresponden a materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes, microorganismos y sustancias químicas provenientes del uso cotidiano del agua.

Según Sharma et al. (2023), la materia orgánica constituye uno de los contaminantes más representativos de las aguas residuales domésticas, debido a que su degradación consume

grandes cantidades de oxígeno disuelto, generando alteraciones en los ecosistemas acuáticos cuando el efluente es descargado sin tratamiento previo. Los procesos biológicos empleados en sistemas de tratamiento aprovechan esta materia orgánica como fuente de energía para microorganismos capaces de transformar compuestos complejos en sustancias más simples y menos contaminantes.

Entre los parámetros más utilizados para caracterizar las aguas residuales se encuentran la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos totales disueltos (TDS), el nitrógeno total, fósforo total, pH, turbidez y microorganismos indicadores como coliformes fecales y *Escherichia coli*. Estos parámetros permiten determinar la carga contaminante del agua y seleccionar la tecnología de tratamiento más adecuada.

De acuerdo con García-Ávila et al. (2023), los tratamientos biológicos presentan una elevada eficiencia para remover materia orgánica medida DQO; sin embargo, la eliminación de nutrientes como nitrógeno y fósforo puede requerir condiciones específicas de operación o tratamientos complementarios. Por esta razón, los sistemas actuales buscan integrar procesos físicos y biológicos que permitan mejorar la calidad del efluente tratado.

7.1.4 Parámetros de calidad del agua residual

La caracterización de las aguas residuales constituye una etapa fundamental dentro del diseño, selección y evaluación de sistemas de tratamiento, debido a que permite conocer las propiedades físicas, químicas y biológicas del efluente antes y después del proceso de depuración. La determinación de estos parámetros facilita la identificación de la carga contaminante presente en el agua y permite establecer las condiciones necesarias para seleccionar tecnologías de tratamiento adecuadas y evaluar su desempeño durante la operación (Bashar et al., 2021).

Los parámetros de calidad del agua residual como pH, temperatura, sólidos suspendidos totales (SST), conductividad eléctrica, demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y nutrientes son indicadores esenciales para determinar el nivel de contaminación y las condiciones del agua residual doméstica. Estos parámetros permiten analizar la disponibilidad de materia orgánica y las características necesarias para el desarrollo de microorganismos en sistemas biológicos como biofiltros y reactores con crecimiento adherido (Samer, 2022).

Asimismo, la eficiencia de los tratamientos biológicos depende en gran medida de las características iniciales del agua residual, debido a que parámetros como el pH, la concentración de materia orgánica, los sólidos suspendidos y otros indicadores fisicoquímicos influyen directamente en el funcionamiento del sistema y en la actividad de los microorganismos responsables de la degradación de contaminantes. Por esta razón, la caracterización del efluente permite establecer las condiciones de operación, identificar la carga contaminante y evaluar la eficiencia de las tecnologías empleadas para el tratamiento de aguas residuales (Cabrera et al., 2022).

7.1.5 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales comprende el conjunto de operaciones físicas, químicas y biológicas destinadas a eliminar o reducir los contaminantes presentes en el agua residual antes de su descarga al ambiente o su reutilización. Su principal objetivo es proteger la salud pública, preservar los ecosistemas acuáticos y garantizar el cumplimiento de las normas ambientales vigentes. En las últimas décadas, el desarrollo de tecnologías más eficientes ha permitido incrementar la remoción de materia orgánica, nutrientes, microorganismos patógenos y contaminantes emergentes, promoviendo sistemas con menor consumo energético y mayor sostenibilidad ambiental.

Según Mutegoa (2024), el incremento de la población, la urbanización y el crecimiento industrial han provocado un aumento considerable en la generación de aguas residuales, haciendo indispensable la implementación de tecnologías capaces de garantizar un tratamiento eficiente y sostenible. El autor señala que actualmente la tendencia mundial se orienta hacia procesos que integran tratamientos convencionales con tecnologías biológicas y métodos de adsorción, con el fin de mejorar la calidad del efluente y facilitar su reutilización.

7.1.6 Procesos de tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales se desarrolla mediante una secuencia de procesos unitarios diseñados para remover contaminantes de diferente naturaleza. Generalmente, estos procesos se agrupan en tratamiento preliminar, primario, secundario y terciario, cada uno con funciones específicas dentro del sistema de depuración.

7.1.6.1 *Tratamiento preliminar*

El tratamiento preliminar corresponde a la primera etapa dentro de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y tiene como finalidad acondicionar el agua antes de ingresar a las unidades biológicas, como los biofiltros. Esta etapa se basa principalmente en procesos físicos destinados a eliminar materiales de mayor tamaño, sólidos gruesos, arenas, grasas y otros elementos que pueden interferir con el funcionamiento del sistema posterior. Su aplicación permite proteger el medio filtrante, evitar obstrucciones y mejorar la eficiencia global del tratamiento (Sylwan & Thorin, 2021).

En los sistemas de biofiltración, el pretratamiento es fundamental debido a que el material filtrante proporciona la superficie donde se desarrolla la biopelícula microbiana. La presencia excesiva de sólidos suspendidos o partículas grandes puede disminuir la capacidad hidráulica del biofiltro, reducir el contacto entre el agua residual y los microorganismos, y afectar los procesos de degradación biológica. Por ello, operaciones como el cribado, sedimentación primaria o eliminación de sólidos contribuyen a mantener condiciones adecuadas para la actividad microbiana (Guarin & Pagilla, 2021).

7.1.6.2 *Tratamiento primario*

El tratamiento primario tiene como finalidad remover sólidos suspendidos, materiales sedimentables y parte de la materia orgánica presente en las aguas residuales mediante procesos físicos de separación. Durante esta etapa predominan mecanismos como la sedimentación, donde las partículas de mayor densidad se depositan por acción de la gravedad formando lodos primarios, y la separación de materiales flotantes presentes en el efluente. Esta fase permite disminuir la carga contaminante antes del tratamiento biológico, favoreciendo el desempeño de las etapas posteriores de depuración (Ortega Ramírez & Sánchez Rodríguez, 2021).

7.1.6.3 *Tratamiento secundario*

El tratamiento secundario corresponde a la etapa biológica del tratamiento de aguas residuales y tiene como objetivo principal remover la materia orgánica biodegradable mediante la acción de microorganismos. Durante este proceso, las comunidades microbianas utilizan los compuestos orgánicos presentes en el agua residual como fuente de carbono y energía, transformándolos en dióxido de carbono, agua y nueva biomasa. La eficiencia de esta etapa permite disminuir parámetros como demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos (Mousavi et al., 2022).

Entre las principales tecnologías empleadas en esta fase se encuentran los lodos activados, reactores biológicos, humedales construidos y sistemas de crecimiento adherido como los biofiltros. El desempeño de estos tratamientos depende de factores como temperatura, pH, oxígeno disuelto, carga orgánica y características del medio soporte, debido a que estas condiciones influyen en el desarrollo y actividad de la biopelícula microbiana (Gikas et al., 2023).

Asimismo, la eficiencia de los tratamientos biológicos depende en gran medida de las características iniciales del agua residual, debido a que parámetros como el pH, la concentración de materia orgánica, los sólidos suspendidos y otros indicadores fisicoquímicos influyen directamente en el funcionamiento del sistema y en la actividad de los microorganismos responsables de la degradación de contaminantes. Por esta razón, la caracterización del efluente permite establecer las condiciones de operación, identificar la carga contaminante y evaluar la eficiencia de las tecnologías empleadas para el tratamiento de aguas residuales (Cabrera et al., 2022)

7.1.6.4 Tratamiento terciario o avanzado

El tratamiento terciario corresponde a los procesos complementarios aplicados cuando se requiere obtener un efluente de mayor calidad para su reutilización o descarga en cuerpos de agua sensibles.

De acuerdo con Ajaz et al. (2024), esta etapa incorpora tecnologías como filtración avanzada, adsorción, desinfección, membranas, ozonización y carbón activado biológico para eliminar nutrientes, microorganismos y contaminantes emergentes, incluidos residuos farmacéuticos y productos de cuidado personal. Los autores destacan que la combinación de biofiltración con carbón activado granular constituye una de las alternativas más prometedoras para la eliminación de micro contaminantes orgánicos.

Materiales lignocelulósicos como medios filtrantes en el tratamiento de aguas residuales

Los materiales lignocelulósicos representan una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales debido a su disponibilidad, bajo costo y capacidad para retener contaminantes mediante procesos físicos y químicos. Estos materiales están constituidos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que proporcionan una

estructura porosa capaz de favorecer la adsorción de materia orgánica y otros compuestos presentes en el agua residual (Del Angel et al., 2022).

El uso de residuos agrícolas como el bagazo de caña de azúcar permite aprovechar subproductos agroindustriales dentro de un enfoque de economía circular. Debido a sus características fibrosas y grupos funcionales presentes en la lignina y celulosa, el bagazo puede actuar como material adsorbente para la remoción de contaminantes, aunque requiere procesos de acondicionamiento para mejorar su estabilidad y evitar la liberación de compuestos solubles al agua tratada (Bahrodin et al., 2022).

Por otra parte, el aserrín ha sido empleado como medio filtrante debido a su estructura porosa y capacidad de interacción con contaminantes mediante mecanismos de adsorción. Su aplicación en sistemas de biofiltración favorece además el desarrollo de comunidades microbianas sobre la superficie del material, contribuyendo a la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales (Meez et al., 2021).

Los biofiltros elaborados con materiales orgánicos pueden mejorar la calidad del agua mediante la combinación de procesos de filtración física, retención de sólidos, adsorción y actividad biológica. Por ello, los materiales lignocelulósicos constituyen una opción ambientalmente viable frente a medios filtrantes convencionales, especialmente en tratamientos descentralizados de aguas residuales domésticas (Masi et al., 2021).

7.1.7 Biofiltración

La biofiltración es una tecnología de tratamiento biológico que emplea microorganismos adheridos a un medio de soporte para la eliminación de contaminantes presentes en el agua mediante procesos combinados de filtración, adsorción y biodegradación. Durante este proceso, los microorganismos forman una biopelícula sobre la superficie del material filtrante, donde degradan la materia orgánica y otros compuestos contaminantes, transformándolos en productos más estables y de menor impacto ambiental (García-Rodríguez et al., 2022).

En comparación con tratamientos convencionales, los sistemas de biofiltración presentan ventajas relacionadas con su bajo requerimiento energético, menor generación de lodos y capacidad de adaptación a diferentes condiciones de operación. Estas características permiten su aplicación como una alternativa sostenible para el tratamiento descentralizado de

aguas residuales, especialmente en zonas donde se requieren tecnologías eficientes y de fácil mantenimiento (Pérez-López et al., 2023).

El desempeño de un biofiltro depende de la interacción entre las características del agua residual, el material filtrante y la actividad microbiana desarrollada en su superficie. La selección adecuada del medio de soporte influye directamente en parámetros como la formación de biopelícula, la retención de contaminantes, la transferencia de oxígeno y el tiempo de contacto del agua con el material filtrante (Mendoza-Espinosa et al., 2021).

Actualmente, el uso de materiales lignocelulósicos como medios filtrantes ha adquirido relevancia debido a su disponibilidad, bajo costo y composición rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, características que favorecen la retención de contaminantes y el desarrollo de microorganismos sobre su superficie. Materiales como el bagazo de caña de azúcar y el aserrín han demostrado potencial como medios filtrantes sostenibles para el tratamiento de aguas residuales, debido a su capacidad para mejorar parámetros fisicoquímicos del agua mediante procesos de filtración y adsorción (Lázaro Ramos, 2024).

7.1.7.1 Factores que influyen en la eficiencia de la biofiltración

Diversos factores determinan el desempeño de los biofiltros durante el tratamiento de aguas residuales.

7.1.7.1.1 *Tipo de material filtrante*

El medio filtrante constituye uno de los factores más importantes debido a que proporciona el soporte necesario para el desarrollo de la biopelícula.

El medio filtrante constituye uno de los factores más importantes en un sistema de biofiltración, debido a que proporciona el soporte necesario para el desarrollo de la biopelícula y favorece los procesos de retención y degradación de contaminantes. Según Iturralde Jácome y Hernández Escobar (2022), los materiales de origen vegetal utilizados como medios filtrantes presentan características favorables como porosidad, disponibilidad local y bajo costo, permitiendo su aplicación como alternativas sostenibles en el tratamiento de aguas residuales. Estas propiedades hacen que los materiales lignocelulósicos, como el bagazo de caña y el aserrín, sean opciones viables para mejorar la eficiencia de los sistemas de filtración.

Los materiales lignocelulósicos cumplen ampliamente estas características, razón por la cual su utilización ha incrementado en aplicaciones ambientales.

7.1.7.1.2 Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto constituye un parámetro fundamental en los sistemas de biofiltración, debido a que permite el desarrollo de microorganismos aerobios responsables de la degradación de la materia orgánica y la transformación de compuestos nitrogenados. Según González-Tineo et al. (2022), una adecuada disponibilidad de oxígeno favorece los procesos biológicos dentro de los sistemas con biopelícula, incrementando la eficiencia de remoción de contaminantes mediante mecanismos de oxidación y nitrificación.

7.1.7.1.3 Temperatura

La temperatura controla la velocidad de las reacciones biológicas.

De acuerdo con Mutegoa (2024), temperaturas comprendidas entre 20 y 35 °C favorecen el crecimiento bacteriano y mejoran la eficiencia de degradación de contaminantes en sistemas de biofiltración.

7.1.7.2 Propiedades de los materiales lignocelulósicos

Las propiedades físicas y químicas de los materiales lignocelulósicos influyen directamente en su comportamiento como medios filtrantes dentro de los sistemas de biofiltración. Debido a su composición basada principalmente en celulosa, hemicelulosa y lignina, estos materiales presentan estructuras porosas, estabilidad y grupos funcionales capaces de interactuar con diferentes contaminantes presentes en el agua residual (Alcívar-Bravo et al., 2022).

Entre las características que favorecen su aplicación ambiental destacan la porosidad, permeabilidad, disponibilidad, bajo costo y capacidad de proporcionar una superficie adecuada para la retención de contaminantes y la colonización microbiana. Estas propiedades permiten mejorar el contacto entre el agua residual y el material filtrante, favoreciendo procesos de adsorción y biodegradación (Sampaolesi et al., 2023).

Además, la estructura superficial de los residuos lignocelulósicos facilita la formación de biopelículas, debido a que los microorganismos pueden adherirse a las irregularidades del

material y desarrollar comunidades capaces de degradar materia orgánica presente en el agua tratada.

7.1.7.3 Aplicaciones de los materiales lignocelulósicos en biofiltros

El uso de materiales vegetales como medios filtrantes permite aprovechar residuos agroindustriales mediante un enfoque de economía circular.

En estudios realizados en Ecuador, Morales-Fiallos et al. (2022) evaluaron un filtro elaborado con bagazo de caña de azúcar para el tratamiento de aguas residuales, evidenciando mejoras en parámetros como turbidez, sólidos suspendidos, DQO, demostrando el potencial de este residuo agrícola como material filtrante de bajo costo.

Por lo tanto, materiales como el bagazo de caña y el aserrín representan alternativas sostenibles para la construcción de biofiltros, especialmente en zonas donde existe disponibilidad de residuos agrícolas y forestales, permitiendo desarrollar tecnologías accesibles para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Entre los más utilizados se encuentran:

- bagazo de caña de azúcar;
- fibra de coco;
- cascarilla de arroz;
- aserrín;
- corteza y astillas de madera;
- cáscara de maní;
- tusa de maíz;
- bambú triturado.

En Ecuador, la disponibilidad de residuos agrícolas provenientes de la producción de caña de azúcar, arroz, maíz y madera convierte a estos materiales en una alternativa técnicamente viable y económicamente accesible para el desarrollo de biofiltros destinados al tratamiento de aguas residuales domésticas.

7.1.7.4 Bagazo de caña de azúcar como material lignocelulósico

El bagazo de caña de azúcar es el residuo fibroso obtenido después de la extracción del jugo de la caña (*Saccharum officinarum* L.). Debido a su elevada disponibilidad en países productores como Ecuador, Brasil y Colombia, este subproducto agroindustrial ha adquirido gran importancia como materia prima para aplicaciones ambientales, especialmente en el tratamiento de aguas residuales mediante procesos de adsorción y biofiltración (Juela et al., 2021).

El bagazo está constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que le confieren una estructura porosa, alta área superficial y abundantes grupos funcionales capaces de interactuar con diversos contaminantes presentes en el agua. Estas características favorecen su utilización como material adsorbente y como soporte para el crecimiento de microorganismos en sistemas de tratamiento biológico (Trujillo-del Bosque et al., 2021).

Las propiedades físicas del bagazo, como su baja densidad, elevada porosidad y capacidad de retención de humedad, permiten incrementar el tiempo de contacto entre el agua residual y el material filtrante, favoreciendo la formación de biopelículas y la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos. Además, sus grupos hidroxilo, carboxilo y fenólico participan en mecanismos de adsorción e intercambio iónico, aumentando la eficiencia del tratamiento (Juela et al., 2021).

En Ecuador, investigaciones recientes han demostrado que los filtros elaborados con bagazo de caña contribuyen a mejorar parámetros como turbidez, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos, lo que evidencia su potencial como una alternativa sostenible y de bajo costo para el tratamiento descentralizado de aguas residuales domésticas (Morales-Fiallos et al., 2022).

7.1.7.5 Aserrín como material lignocelulósico

El aserrín es un residuo lignocelulósico generado durante las actividades de transformación de la madera, como corte, cepillado y procesamiento industrial. Debido a su alta disponibilidad, bajo costo y composición química, actualmente es considerado un material con potencial para aplicaciones ambientales, especialmente en procesos de tratamiento de aguas

residuales. Su aprovechamiento permite transformar un residuo forestal en un recurso útil dentro de estrategias de economía circular y tecnologías sostenibles (Tony, 2022).

La estructura del aserrín está conformada principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que proporcionan resistencia, porosidad y grupos funcionales activos capaces de interactuar con diferentes contaminantes presentes en el agua. Estas características favorecen su comportamiento como material adsorbente, permitiendo la retención de compuestos orgánicos mediante mecanismos físicos y químicos, como interacciones electrostáticas, enlaces de hidrógeno y procesos de adsorción superficial (Pimentel et al., 2023).

Además, las características físicas del aserrín, como su superficie rugosa, capacidad de retención de humedad y estructura porosa, favorecen la adherencia de microorganismos y el desarrollo de biopelículas cuando es empleado como medio filtrante. La presencia de estas comunidades microbianas permite complementar los procesos de filtración y adsorción con mecanismos biológicos de degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales.

Diversas investigaciones han demostrado que el aserrín puede emplearse como material adsorbente y medio filtrante para la remoción de diferentes contaminantes presentes en el agua. Su estructura porosa, el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, así como la presencia de grupos funcionales activos, favorecen la adsorción de compuestos orgánicos y otros contaminantes, además de proporcionar un soporte adecuado para el desarrollo de biopelículas microbianas. Estas características convierten al aserrín en una alternativa sostenible, de bajo costo y con gran potencial para la construcción de biofiltros destinados al tratamiento de aguas residuales (Pimentel et al., 2023).

8 HIPÓTESIS

Los biofiltros a escala elaborados con bagazo de caña de azúcar y aserrín permiten la remoción de contaminantes presentes en el agua residual doméstica, evidenciada mediante la eficiencia de remoción obtenida de los parámetros fisicoquímicos evaluados y la eficiencia de remoción alcanzada durante el tratamiento.

9 ÁREA DE ESTUDIO

Las muestras de agua residual utilizadas en la investigación fueron recolectadas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la Universidad Técnica de Cotopaxi,

ubicada en la ciudad de Latacunga, Ecuador. El agua residual corresponde al efluente posterior al tratamiento primario, el cual ingresa a la etapa secundaria.

La selección de esta PTAR se justifica por su representatividad de aguas residuales domésticas y por la facilidad de acceso para el control del muestreo. Estudios similares han utilizado efluentes universitarios como fuentes confiables para investigaciones experimentales en tratamiento de aguas residuales (Paredes & Sandoval, 2023).

10 METODOLOGÍA.

10.1 Enfoque de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se basa en la medición objetiva de variables fisicoquímicas del agua residual tratada, permitiendo evaluar la eficiencia del sistema mediante datos numéricos y análisis estadísticos. Este enfoque es ampliamente utilizado en estudios de tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad para evaluar el desempeño de sistemas experimentales de manera objetiva (Hernández Sampieri et al., 2023)

Asimismo, la investigación tiene un carácter experimental, ya que se construyó y operó un sistema de biofiltración en columnas acrílicas bajo condiciones controladas, manipulando variables como el tiempo de operación y el contacto del efluente con el medio filtrante. Según Metcalf y Eddy (2014), los estudios experimentales permiten evaluar el comportamiento real de procesos biológicos en el tratamiento secundario de aguas residuales.

10.2 Tipo y Diseño de Investigación

Pozo-Puértolas (2024) menciona que la investigación aplicada va más allá de la teoría sus verdades valor está en usar el conocimiento científico para resolver problemas prácticos del entorno. Para el desarrollo del proyecto se diseñó y se construyó un biofiltro a escala aprovechando subproductos como el bagazo de caña y el aserrín, con el fin de evaluar que tan efectivo es este sistema para la desinfección de las aguas residuales domésticas.

Chenet Zuta et al. (2022) señalan que el diseño experimental consiste en manipular variables bajo condiciones controladas para analizar su impacto en una variable de respuesta. En este estudio, este enfoque se aplicó al evaluar la eficiencia del biofiltro, comparando los parámetros fisicoquímicos del agua antes y después del tratamiento.

10.3 Métodos de la Investigación

Aplicamos los métodos inductivo y deductivo para recopilar y analizar artículos, tesis y libros científicos. Así, filtramos únicamente la información más confiable y relevante para respaldar la investigación.

10.3.1 Método Inductivo

Rodríguez Jiménez (2017), el método inductivo consiste en partir de observaciones específicas para construir conclusiones generales. En nuestro caso, aplicamos esta lógica al analizar el comportamiento del biofiltro; así, examinando los datos particulares sobre cómo el material lignocelulósico atrapaba los contaminantes, pudimos determinar su verdadera eficiencia para limpiar el agua residual doméstica.

10.3.2 Método Deductivo

Prieto Castellanos (2018) menciona que el método deductivo parte de principios generales para analizar casos específicos. En esta investigación, se utilizó para diseñar el biofiltro con base en conocimientos previos sobre materiales lignocelulósicos y, posteriormente comprobar su funcionamiento mediante la construcción del sistema y los análisis de laboratorio.

10.4 Técnicas

La técnica empleada consistió en la construcción de un biofiltro a escala mediante columnas de acrílico transparente de 3 mm de espesor, con un diámetro interno de 15 cm y una altura de 1 m distribuida en capas de grava gruesa, grava fina, arena, bagazo de caña de azúcar y aserrín. Los materiales se colocaron de forma estratificada para favorecer el flujo descendente del agua residual, optimizar la retención de sólidos y promover la remoción de contaminantes. Posteriormente, el sistema se operó bajo un caudal controlado y se evaluó su eficiencia mediante el análisis de los parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento.

10.5 Instrumentos

Los instrumentos de investigación son las herramientas empleadas para recopilar, registrar y medir las variables de un estudio (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018). En este trabajo se utilizó una ficha de observación para documentar las características del biofiltro durante su diseño, construcción y operación. Asimismo, se empleó una hoja de registro de datos para consignar los valores de turbidez, sólidos suspendidos totales (TDS) y demanda química de oxígeno (DQO) medidos en las aguas residuales antes y después del tratamiento.

10.6 Materiales y Equipos

10.6.1 Tratamiento previo del efluente

Para el tratamiento previo del efluente se utilizaron dos tanques de plástico con capacidad de 250 L, destinados al almacenamiento y homogenización del agua residual. Asimismo, se emplearon tres bombas de aeración para mantener el efluente con oxígeno y favorecer las condiciones previas al tratamiento. Uno de los tanques se equipó con una válvula de paso para regular el flujo de salida hacia el biofiltro. Como parte de esta etapa, se aplicaron agentes coagulantes y floculantes para promover la formación y posterior sedimentación de las partículas suspendidas antes de la filtración.

10.6.2 Construcción y operación del biofiltro

Para el desarrollo experimental se construyeron dos biofiltros a escala, con columnas de acrílico transparente de 3mm de grosor, sección transversal cuadrada de $15 \times 15\text{cm}$ y 1m de altura, operadas bajo flujo descendente. Ambos sistemas compartieron un diseño base con capas de grava gruesa, grava fina y arena como material de soporte; no obstante, el medio filtrante activo difirió en cada tratamiento: la primera columna empleó bagazo de caña de azúcar, mientras que la segunda utilizó aserrín.

El montaje se complementó con tuberías y accesorios de PVC, reactivos analíticos para la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO), y material de vidrio como vasos de precipitados, pipetas y frascos para el lavado. Finalmente, para el monitoreo de la calidad del agua se empleó un Multiparámetro para registrar pH, temperatura y sólidos disueltos totales (TDS); un reactor de digestión junto con un espectrofotómetro UV-Visible para el análisis de DQO y turbidez; y una balanza analítica para el pesaje de precisión.

10.7 Diseño Experimental

El diseño experimental se estructuró para comparar la eficiencia de dos tratamientos de biofiltración aplicados al tratamiento de aguas residuales domésticas. Cada tratamiento fue evaluado mediante un biofiltro a escala con un material lignocelulósico diferente: bagazo de caña de azúcar y aserrín, manteniendo las mismas condiciones de operación en ambos sistemas. Previamente el efluente fue sometido a un proceso de coagulación y floculación con el fin de acondicionar el agua antes de su ingreso a los biofiltros. Finalmente, se realizaron los análisis de laboratorio para evaluar las variaciones de los parámetros de pH, temperatura, sólidos

disueltos totales (TDS), turbidez y demanda química de oxígeno (DQO) después del tratamiento (Chenet zuta et al.,2022)

10.7.1 Cálculo de la dosis de coagulante

Para determinar la cantidad de coagulante necesaria se utilizó la siguiente expresión

$$m = C \times V$$

Donde:

m= masa del coagulante (mg)

C= concentración del coagulante (mg/L)

V= volumen de agua a tratar

Sustituyendo los valores

$$m = 20 \frac{mg}{L} \times 200L = 4000 mg = 4g$$

Por lo tanto. Para tratar 200L de agua residual se utilizaron 4g de coagulante

10.7.2 Cálculo de la dosis de floculante

La cantidad de floculante se determinó mediante la misma ecuación

$$m = C \times V$$

Donde:

m= masa del floculante (mg)

C= concentración del coagulante (mg/L)

V= volumen de agua a tratar

Sustituyendo los valores

$$m = 5 \frac{mg}{L} \times 200L = 1000 mg = 1g$$

En consecuencia, para el tratamiento de 200L de agua residual se empleó 1g de floculante.

10.8 Desarrollo experimental

El desarrollo experimental se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad Técnica de Cotopaxi, donde se realizaron el acondicionamiento del efluente, la construcción de los biofiltros y la evaluación de la calidad del agua. El procedimiento se ejecutó de forma secuencial y estandarizada para garantizar la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados, siguiendo los métodos normalizados correspondientes (APHA, AWWA & WEF, 2023).

10.8.1 Recolección y acondicionamiento del efluente

El agua residual doméstica se recolecta de la Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la Universidad Técnica De Cotopaxi, campus Salache, y se almacenó inicialmente en un tanque de plástico con capacidad de 250L. Posteriormente, se instalaron tres bombas de oxigenación, manteniendo el efluente aireado durante un periodo de tres semanas, con el propósito de favorecer su acondicionamiento previo a las etapas experimentales.

Ilustración 1. *Recolección del agua residual en la PTAR de la Universidad Técnica de Cotopaxi.*



Ilustración 2. *Aireación del efluente en el primer tanque mediante bombas de oxigenación.*



10.8.2 Caracterización inicial del agua residual

Finalizado el periodo de aireación, se realizó la caracterización inicial del agua residual para determinar sus condiciones fisicoquímicas previas al tratamiento. Durante esta fase se midieron los parámetros de pH, temperatura, sólidos disueltos totales (TDS), turbidez y demanda química de oxígeno (DQO), aplicando los procedimientos estandarizados para el análisis de la calidad del agua (APHA, AWWA & WEF, 2023).

Ilustración 3. Medición de pH y temperatura



Ilustración 4. Medición de TDS



Ilustración 5. Determinación de turbidez



Ilustración 6. Determinación DQO



10.8.3 Tratamiento previo del efluente

Una vez obtenidos los valores iniciales de los parámetros fisicoquímicos, el efluente fue transferido a un segundo tanque plástico con capacidad de 250 L. Posteriormente, se aplicaron las dosis de coagulante y floculante, previamente calculadas, con el propósito de favorecer la coagulación y floculación de las partículas presentes en el agua residual, obteniendo un efluente acondicionado para su posterior tratamiento mediante los biofiltros (Metcalf & Eddy, 2021).

Ilustración 7. *Aplicación del coagulante*



Ilustración 8. *Aplicación de Floculante*



Ilustración 9. *Proceso de Coagulación y Floculación*



10.8.4 Preparación de los medios materiales filtrantes

10.8.4.1 Bagazo de caña de azúcar

- **Lavado**

El bagazo de caña de azúcar fue preparado antes de su utilización como medio filtrante. Primero se realizó un lavado por 4 veces las tres primeras fueron con agua potable y posteriormente la última con agua destilada, con el fin de retirar impurezas y residuos presentes en el material.

Ilustración 10. *Lavado del bagazo de caña utilizando agua potable*



Ilustración 11. *Lavado del bagazo de caña de azúcar utilizando agua destilada*

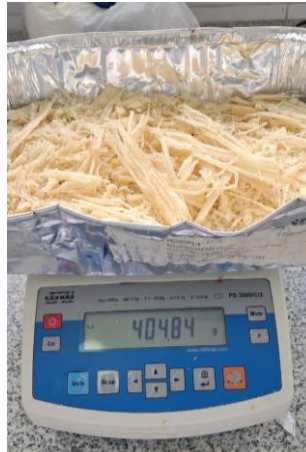


- **Pesado**

Una vez finalizado el lavado, el bagazo de caña de azúcar fue pesado para conocer la cantidad de material que se utilizara en la construcción del biofiltro.

Este procedimiento permitió preparar el medio filtrante antes de continuar con las tapas de secado y tamizado.

Ilustración 12. *Pesado del bagazo de caña de azúcar*



- **Secado**

Después del pesaje. El bagazo de caña de azúcar fue colocado en una estufa a 105 C durante 24 horas para eliminar la humedad presente en el material

- **Tamizado**

Una vez seco. El bagazo de caña de azúcar fue triturado y tamizado para obtener un tamaño de partículas más uniformes y retirar las partículas de mayor tamaño. Finalmente, el material quedó listo para la utilización para el medio filtrante en el biofiltro.

Ilustración 13. *Proceso de trituración del bagazo de caña de azúcar*



10.8.4.2 Aserrín

- **Tamizado Inicial**

Como primera etapa. El aserrín fue tamizado con el tamiz de 2mm para retirar partículas de mayor tamaño y obtener más uniforme antes de continuar con su preparación.

Ilustración 14. *Tamizado inicial del aserrín*



- **Lavado**

Después del tamizado, el aserrín fue lavado por 4 veces las tres primeras fueron con agua potable y posteriormente la última con agua destilada, con el fin de eliminar impurezas y residuos.

Ilustración 15. *Lavado del aserrín utilizando agua potable*



Ilustración 16. *Lavado del aserrín utilizando agua destilada*



- **Pesaje**

Una vez terminado el lavado, el aserrín fue pesado para conocer la cantidad de material que se utilizaría en la construcción del biofiltro.

Ilustración 17. *Peso de aserrín*



- **Secado**

Después del pesaje, el aserrín fue colocado en una estufa a 105 °C durante 24 horas para eliminar la humedad presente en el material y continuar con su preparación.

Ilustración 18. *Secado*



- **Tamizado final**

Una vez seco, el aserrín fue tamizado nuevamente para obtener un tamaño de partícula más uniforme y dejar el material listo para ser utilizado como medio filtrante en el biofiltro.

Ilustración 19. *Tamizado final del aserrín*



10.8.4.3 Preparación de la grava gruesa, grava fina y arena lavada.

Previo a la construcción de los biofiltros, la grava gruesa, la grava fina y la arena lavada fueron acondicionadas para su utilización como materiales filtrantes. Cada uno de estos materiales se lavó con abundante agua para eliminar restos de polvo, tierra y otras impurezas que pudieran afectar el funcionamiento del sistema de filtración. Una vez finalizado el lavado,

los materiales se dejaron escurrir para retirar el exceso de agua y posteriormente fueron utilizados en la conformación de las capas del biofiltro.

Ilustración 20.*Proceso de lavado*



10.8.5 Construcción del biofiltro con bagazo de caña

Para la construcción del primer biofiltro se utilizaron columnas acrílicas de 3 mm de grosor, con una sección transversal cuadrada de 15 cm × 15 cm y una altura de 1 m. Estas dimensiones se definieron tomando como referencia los criterios de diseño para filtros de lecho granular descritos en el Manual M37 de la American Water Works Association (AWWA, 2022), adaptándolos a una unidad de biofiltración a escala con bagazo de caña de azúcar como medio filtrante.

- **Colocación de la grava gruesa**

En la base de la columna se colocó una capa de 10 cm de grava gruesa, previamente lavada. Esta capa permitió sostener los materiales superiores y facilitó la salida uniforme del agua.

Ilustración 21.*Capa de grava gruesa 10cm*



- **Colocación de la grava gruesa**

Sobre la grava gruesa se añadió una capa de 5cm de grava fin, distribuyendo para evitar espacios vacíos y mejorar la estabilidad.

Ilustración 22. *Capa de grava fina 5cm*



- **Colocación de la arena lavada**

Se añadió una capa de 10cm de arena lavada, utilizada como material de prefiltración para la retención de partículas finas presentes en el efluente.

Ilustración 23. *Capa de arena 10cm*



- **Colocación del bagazo de caña de azúcar**

Sobre la capa de arena se colocó una capa de 15cm de bagazo de caña de azúcar

Ilustración 24. *Capa de bagazo de caña de azúcar 15cm*



Finalmente, se dejó un espacio libre en la parte superior de la columna para el ingreso del agua durante el tratamiento.

10.8.6 Construcción del biofiltro con aserrín.

Para la construcción del segundo biofiltro se utilizaron columnas acrílicas de 3 mm de grosor, con una sección transversal cuadrada de 15×15 cm y una altura de 1 m. Estas dimensiones fueron definidas para una unidad de biofiltración a escala de laboratorio, considerando criterios técnicos para filtros de lecho descritos por la American Water Works Association (AWWA, 2022), adaptados al empleo de material lignocelulósicos como aserrín.

- **Colocación de la grava gruesa**

En la base de la columna se colocó una capa de 10 cm de grava gruesa, previamente lavada. Esta capa permitió sostener los materiales superiores y facilitó la salida uniforme del agua.

Ilustración 25. *Capa de grava gruesa 10cm*



- **Colocación de la grava fina**

Sobre la grava gruesa se añadió una capa de 5cm de grava fin, distribuyendo para evitar espacios vacíos y mejor la estabilidad.

Ilustración 26. *Capa de grava fina 5cm*



- **Colocación de la arena lavada**

Se añadió una capa de 10cm de arena lavada, utilizada como material de prefiltración para la retención de partículas finas presentes en el efluente.

Ilustración 27. *Capa de arena 10cm*



- **Colocación del aserrín**

Sobre la capa de arena se colocó una capa de 15cm de aserrín

Ilustración 28. *Capa de aserrín 15cm*



Finalmente, se dejó un espacio libre en la parte superior de la columna para el ingreso del agua durante el tratamiento.

10.8.7 Operación de los biofiltros

Una vez terminada la construcción de los biofiltros se inició la etapa de operación utilizando el agua residual que previamente fue tratada. El agua se mantuvo en el tanque de 250L y mediante una llave de paso conectada a una manguera se reguló el ingreso del efluente hacia cada filtro, procurando que ambos tratamientos trabajaran bajo las mismas condiciones.

El agua ingresó por la parte superior de cada biofiltro y pasó de forma natural a través de las diferentes capas filtrantes, aprovechando únicamente la fuerza de gravedad. Para cada ensayo se utilizó un volumen previamente establecido de agua residual, el cual se dejó pasar completamente por el sistema antes de recolectar el agua tratada en un tanque limpio para su posterior análisis en laboratorio.

Ilustración 29. Biofiltro



10.8.8 Caracterización final del agua tratada

Una vez finalizado el proceso de biofiltración, se recolectó el agua tratada obtenida en cada uno de los biofiltros para realizar su caracterización final. En esta etapa se evaluaron los parámetros de pH, temperatura, sólidos disueltos totales (TDS), turbidez y demanda química de oxígeno (DQO), con el propósito de conocer los cambios producidos después del tratamiento y comparar la eficiencia del bagazo de caña de azúcar y del aserrín como medios filtrantes.

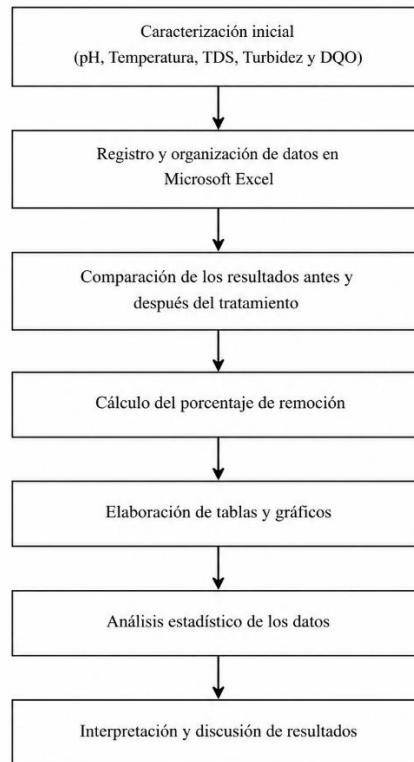
Para estos análisis se utilizaron los mismos equipos empleados durante la caracterización inicial, con el fin de mantener las mismas condiciones de medición y facilitar la comparación de los resultados obtenidos.

10.9 Análisis de datos

Los datos obtenidos durante la caracterización inicial y final del agua residual fueron registrados en tablas de Microsoft Excel con el fin de facilitar el procedimiento y análisis de datos. Posteriormente, se compararon los valores obtenidos antes y después del tratamiento aplicado en los biofiltros de bagazo de caña de azúcar y aserrín.

Con la información recopilada se elaboraron tablas y para representar de manera clara los resultados en cada biofiltro. Además, se calculó el porcentaje de remoción de los parámetros evaluados con el propósito de determinar la eficiencia de cada medio filtrante en el tratamiento. Finalmente, los resultados fueron analizados mediante estadísticas descriptivas se compararon los valores iniciales y finales las variaciones de pH, temperatura y los porcentajes de remoción, turbidez, TDS y DQO.

Ilustración 30. Esquema



10.10 Cálculo y diseño del biofiltro

10.10.1 Diseño del biofiltro

El diseño del biofiltro a escala se estableció considerando los criterios técnicos para filtros de lecho granular descritos en el Manual M37 de la American Water Works Association (AWWA, 2022), el cual proporciona lineamientos para el diseño y operación de unidades de filtración. Debido a que la investigación se desarrolló a escala de laboratorio, dichos criterios fueron adaptados para construir una unidad funcional que permitiera evaluar el desempeño de materiales lignocelulósicos. Con base en ello, se diseñó un sistema de biofiltración a escala mediante columnas de acrílico transparente de 3 mm de grosor, con una sección transversal cuadrada de 15 cm × 15 cm y una altura de 1 m. Ambas columnas fueron construidas con las mismas dimensiones y distribución interna de las capas filtrantes, diferenciándose únicamente por el material lignocelulósico empleado como medio filtrante: bagazo de caña de azúcar en la primera columna y aserrín en la segunda.

La utilización de columnas transparentes permitió observar el comportamiento del flujo, la distribución de los materiales filtrantes y el funcionamiento del sistema durante el desarrollo experimental (Sánchez Baque, 2020).

Cada biofiltro estuvo conformado por una capa inferior de 10 cm de grava gruesa, seguida de 5 cm de grava fina, 10 cm de arena lavada y 15 cm de material lignocelulósico. La selección y disposición de las capas de arena y grava se establecieron tomando como referencia los criterios técnicos para medios filtrantes granulares establecidos en la norma ANSI/AWWA B100-22 (AWWA, 2022), adaptándolos al diseño de un sistema de biofiltración a escala. Esta configuración favorece la distribución uniforme del flujo, proporciona soporte al medio filtrante y contribuye a la retención de sólidos suspendidos antes de que el agua entre en contacto con el material lignocelulósico, mejorando el proceso de tratamiento.

En el primer biofiltro se empleó bagazo de caña de azúcar como material filtrante principal, debido a su alto contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, compuestos que favorecen la adsorción y retención de contaminantes presentes en el agua. La selección del material filtrante se realizó considerando como referencia los criterios técnicos establecidos en la norma ANSI/AWWA B101-22 para materiales filtrantes, adaptándolos al empleo de un material lignocelulósico de origen agroindustrial. Asimismo, el bagazo de caña constituye un residuo de bajo costo y amplia disponibilidad, lo que favorece su aprovechamiento en sistemas de biofiltración a escala (AWWA, 2022).

En el segundo biofiltro se empleó aserrín como material filtrante principal, debido a su composición lignocelulósica y estructura porosa, características que favorecen la adsorción y retención de contaminantes presentes en el agua. La selección del material filtrante se realizó considerando como referencia los criterios técnicos establecidos en la norma ANSI/AWWA B101-22 para materiales filtrantes, adaptándolos al empleo de un material lignocelulósico de origen forestal (AWWA, 2022). Aunque las columnas presentaron una altura total de 1 m, únicamente 40 cm correspondieron al lecho filtrante. En la parte superior se dejó un espacio libre de 25 cm, destinado a facilitar la alimentación del efluente y prevenir desbordamientos durante la operación. El resto de la altura de la columna constituyó un margen de seguridad que permitió un funcionamiento adecuado del sistema y facilitó la observación del proceso de biofiltración durante la experimentación.

10.10.2 Cálculo del área interna de la base

Para determinar el área interna de la base de cada biofiltro se ocupó la ecuación correspondiente a una superficie cuadrada

Fórmula

$$A = L \times W$$

Donde:

A= área interna de la base, en m^2

L= longitud interna del biofiltro, en m

W= ancho interno del biofiltro, en m

Sustituyendo valores

$$A = 0,15m \times 0,15m^2$$

$$A = 0,0225m^2$$

Por lo tanto, el área interna de la base de cada biofiltro fue de $0,0225m^2$

10.10.3 Cálculo del volumen total del biofiltro

Para determinar el volumen interno total del biofiltro cuya estructura es un prisma de base cuadrada se calculó multiplicando el área de la base por la altura de la estructura.

Fórmula

$$V_T = A \times H$$

Donde:

V= volumen total del biofiltro, en m^3

A= área interna del biofiltro, en m^2

H= altura total del biofiltro, en m

Sustituyendo valores

$$V_T = 0,0225m^2 \times 1,00m$$

$$V_T = 0,0225m^3$$

10.10.4 Cálculo del volumen total del lecho filtrante

El volumen del lecho filtrante se determinó considerando únicamente la altura ocupada de los materiales filtrantes dentro del biofiltro

Fórmula

$$V_L = A \times H_L$$

Donde:

V_L = volumen del lecho filtrante, en m^3

A = área interna de la base, en m^2

H_L = altura del lecho filtrante, en m

Sustituyendo valores

$$V_L = 0,0225m^2 \times 0,40m$$

$$V_L = 0,0090m^3$$

10.10.5 Cálculo de la eficiencia de remoción

Para evaluar la eficiencia de remoción de cada biofiltro se compararon las concentraciones iniciales y finales (turbidez, sólidos disueltos totales y demanda química de oxígeno).

Fórmula

$$E = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Donde:

E = eficiencia de remoción %

C_i = concentración inicial del parámetro

C_f = concentración final del parámetro

10.10.6 Cálculo de la remoción de Turbidez (Biofiltro con Bagazo de Caña)

$$E = \frac{3 \text{ NTU} - 0 \text{ NTU}}{3 \text{ NTU}} \times 100$$

$$E = \frac{3 \text{ NTU}}{3 \text{ NTU}} \times 100$$

$$E = 100\% \text{ NTU}$$

10.10.7 Cálculo de la remoción de TDS (Biofiltro con Bagazo de Caña)

$$E = \frac{2.78 \text{ mg/L} - 3.51 \text{ mg/L}}{2.78 \text{ mg/L}} \times 100$$

$$E = \frac{-0.74 \text{ mg/L}}{2.78 \text{ mg/L}} \times 100$$

$$E = -26.26\% \text{ mg/L}$$

10.10.8 Cálculo de la remoción de DQO (Biofiltro con Bagazo de Caña)

$$E = \frac{47 \text{ mg/L} - 77 \text{ mg/L}}{47 \text{ mg/L}} \times 100$$

$$E = \frac{-0.74 \text{ mg/L}}{47 \text{ mg/L}} \times 100$$

$$E = -63.83\% \text{ mg/L}$$

10.10.9 Cálculo de la remoción de Turbidez (Biofiltro con Aserrín)

$$E = \frac{3 \text{ NTU} - 0 \text{ NTU}}{3 \text{ NTU}} \times 100$$

$$E = \frac{3 \text{ NTU}}{3 \text{ NTU}} \times 100$$

$$E = 100\% \text{ NTU}$$

10.10.10 Cálculo de la remoción de TDS (Biofiltro con Aserrín)

$$E = \frac{2.78 \text{ mg/L} - 2.40 \text{ mg/L}}{2.78 \text{ mg/L}} \times 100$$

$$E = \frac{0.39 \text{ mg/L}}{2.78 \text{ mg/L}} \times 100$$

$$E = 13.67 \% \text{ mg/L}$$

10.10.11 Cálculo de la remoción de DQO (Biofiltro con Aserrín)

$$E = \frac{47 \text{ mg/L} - 7 \text{ mg/L}}{47 \text{ mg/L}} \times 100$$

$$E = \frac{40 \text{ mg/L}}{47 \text{ mg/L}} \times 100$$

$$E = 85.11\% \text{ mg/L}$$

10.11 Comparación del desempeño de los biofiltros

Para la determinación de cuál de los dos materiales lignocelulósicos presentó un mejor desempeño durante el tratamiento del agua residual doméstica, se compararon las eficiencias de remoción obtenidas para cada tratamiento.

Fórmula

$$\Delta E = E_B - E_A$$

Donde:

ΔE = diferencia de eficiencia entre biofiltros

E_B = eficiencia de remoción del biofiltro con bagazo de caña de azúcar %

E_A = eficiencia de remoción del biofiltro con aserrín %

10.11.1 Resultado de Desempeño de los Biofiltros de bagazo de caña y Aserrín (Turbidez)

$$\begin{aligned}\Delta E &= E_A - E_B \\ \Delta E &= 100\% \text{ NTU} - 100\% \text{ NTU} \\ \Delta E &= 0 \text{ NTU}\end{aligned}$$

En la remoción de turbidez no existió diferencia entre los tratamientos, debido a que ambos biofiltros alcanzaron una eficiencia del 100 %.

10.11.2 Resultado de Desempeño de los Biofiltros de bagazo de caña y Aserrín (TDS)

$$\begin{aligned}\Delta E &= E_A - E_B \\ \Delta E &= 13.67\% \text{ mg/L} - (-26.26\% \text{ mg/L}) \\ \Delta E &= 39.93 \text{ mg/L}\end{aligned}$$

El biofiltro con aserrín presentó una eficiencia superior en 39,93 puntos porcentuales respecto al biofiltro con bagazo de caña. El resultado se explica porque el aserrín redujo los TDS, mientras que el bagazo produjo un aumento en este parámetro.

10.11.3 Resultado de Desempeño de los Biofiltros de bagazo de caña y Aserrín (DQO)

$$\begin{aligned}\Delta E &= E_A - E_B \\ \Delta E &= 85.11\% \text{ mg/L} - (-63.83\% \text{ mg/L}) \\ \Delta E &= 148.94 \% \text{ mg/L}\end{aligned}$$

El biofiltro con aserrín presentó una eficiencia superior en 148,94 puntos porcentuales respecto al biofiltro con bagazo de caña. Esta diferencia se debe a que el aserrín redujo la DQO, mientras que el bagazo incrementó la concentración de materia orgánica.

11 COMPARACIÓN DE HIPÓTESIS

Con el propósito de comprobar la hipótesis planteada se analizaron los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento mediante los biofiltros elaborados con bagazo de caña de azúcar y aserrín. Los resultados permitieron determinar la eficiencia de remoción de los contaminantes presentes en el agua residual doméstica y evaluar el comportamiento de la turbidez, sólidos disueltos totales (TDS), la demanda química de oxígeno (DQO), el pH y la temperatura.

12 ACEPTACIÓN DE HIPÓTESIS

La hipótesis de investigación se acepta, ya que los resultados demostraron que los biofiltros elaborados con bagazo de caña de azúcar y aserrín fueron efectivos para la remoción de contaminantes presentes en el agua residual doméstica. Ambos tratamientos mejoraron la calidad del efluente; sin embargo, el biofiltro con aserrín presentó la mayor eficiencia de remoción de los parámetros fisicoquímicos evaluados, constituyéndose como el tratamiento más eficiente bajo las condiciones experimentales de este estudio.

13 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se exponen de manera estructurada y rigurosa los principales resultados derivados de la implementación y evaluación de los biofiltros a escala construidos con materiales lignocelulósicos para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Se analizan comparativamente los valores de los parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, turbidez, TDS y DQO) registrados en el efluente inicial y en el efluente tratado por cada uno de los sistemas (bagazo de caña y aserrín), permitiendo determinar la eficiencia de remoción alcanzada.

13.1 Caracterización inicial del agua residual doméstica

La caracterización inicial del agua residual evidenció la presencia de concentraciones elevadas de materia orgánica y sólidos, características propias de un efluente doméstico. Después del tratamiento mediante biofiltración se observó una disminución de la mayoría de los parámetros evaluados, lo que demuestra la capacidad de los materiales lignocelulósicos para retener partículas suspendidas y favorecer la degradación biológica de la materia orgánica.

Tabla 2

Caracterización inicial del agua residual doméstica

Parámetro	Agua residual inicial
pH	8.83
Temperatura C°	17.66 C°
Turbidez (NTU)	3 NTU

Sólidos Totales	2.78 mg/L
Disueltos (TDS)	
Demanda Química de Oxígeno	47 mg/L

Elaborado por: Carrera E & Sanguña K. (2026).

13.2 Análisis del potencial de hidrógeno (pH)

El potencial de hidrógeno es uno de los parámetros más importantes para evaluar la eficiencia de un sistema de tratamiento biológico, debido a que influye directamente en la actividad metabólica de los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica. Valores de pH cercanos a la neutralidad favorecen el crecimiento microbiano y permiten un adecuado funcionamiento del biofiltro.

Tabla 3
Tabla de resultados turbidez

Tratamiento	Turbidez (NTU)	inicial Turbidez (NTU)	final Remoción (NTU)	Eficiencia (%)
Biofiltro con bagazo de caña	3,00	0,00	3,00	100 %
Biofiltro con aserrín	3,00	0,00	3,00	100 %

Elaborado por: Carrera E & Sanguña K. (2026).

Interpretación

Los resultados obtenidos muestran que ambos biofiltros fueron altamente eficientes en la remoción de la turbidez, reduciendo este parámetro de 3,00 NTU a 0,00 NTU, lo que representa una eficiencia de remoción del 100 % en ambos tratamientos. Esto indica que tanto el bagazo de caña como el aserrín presentaron una excelente capacidad para retener las partículas suspendidas presentes en el agua residual mediante los procesos de filtración y retención física.

13.2.1 Discusión de resultados de la turbidez

La turbidez disminuyó de 3,00 NTU a 0 NTU en ambos tratamientos, alcanzando una eficiencia de remoción del 100 %. Este resultado demuestra que tanto el bagazo de caña como el aserrín, en conjunto con las capas de grava y arena, fueron altamente eficaces para retener las partículas suspendidas presentes en el agua residual. La reducción obtenida evidencia que los biofiltros poseen una adecuada capacidad de filtración física y adsorción de sólidos, mejorando significativamente la claridad del efluente.

Estos resultados son comparables con los obtenidos por Esquivel Rafaele y Castañeda-Olivera (2022), quienes evaluaron biofiltros elaborados con aserrín para el tratamiento de aguas residuales y reportaron una importante reducción de la turbidez gracias a la capacidad del material para retener partículas y favorecer la filtración del agua. Aunque las eficiencias obtenidas fueron menores a las registradas en esta investigación, ambos estudios demuestran la efectividad de los materiales lignocelulósicos como medios filtrantes.

13.2.2 Resultados del pH antes y después del tratamiento

Tabla 4

Resultados del pH antes y después del tratamiento

Tratamiento	pH inicial	pH Final
Biofiltro Bagazo de caña	8.83	7.08
Biofiltro de aserrín	8.83	7.00

Elaborado por: Carrera E & Sanguña K. (2026).

13.2.3 Interpretación

Como se observa en la tabla, el pH disminuyó después del tratamiento con ambos biofiltros, pasando de un valor inicial de 8,83 a 7,08 en el biofiltro con bagazo de caña y a 7,00 en el biofiltro con aserrín. Esta reducción permitió que el agua residual alcanzara valores cercanos a la neutralidad, considerados adecuados para favorecer los procesos biológicos de tratamiento y el desarrollo de los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica.

Aunque ambos materiales lignocelulósicos contribuyeron a estabilizar el pH del agua residual, el biofiltro con aserrín presentó el mejor comportamiento, al alcanzar un pH de 7,00, correspondiente al valor neutro. Esto indica que el aserrín fue ligeramente más eficiente para

regular este parámetro, sin alterar negativamente las características químicas del agua tratada, favoreciendo así las condiciones necesarias para un tratamiento biológico eficiente.

13.2.4 *Discusión de resultados del pH*

Los resultados mostraron que el pH disminuyó de 8,88 a 7,08 en el biofiltro con bagazo de caña y a 7,22 en el biofiltro con aserrín, alcanzando valores cercanos a la neutralidad. Esto indica que ambos materiales contribuyeron a estabilizar las características químicas del agua, favoreciendo condiciones adecuadas para su tratamiento.

Estos resultados son similares a los obtenidos por Costa-Conceição et al. (2023), quienes evaluaron biofiltros con aserrín y cascarilla de arroz para el tratamiento de aguas grises y observaron que el efluente tratado mantuvo valores de pH cercanos a la neutralidad, lo que favoreció la eficiencia del sistema de biofiltración.

Asimismo, Iturralde Jácome y Hernández Escobar (2022) reportaron que el uso de materiales lignocelulósicos en biofiltros permitió estabilizar el pH del agua residual durante el proceso de tratamiento, evidenciando el potencial de estos residuos como medios filtrantes naturales.

13.3 Resultados del agua residual antes y después del tratamiento

Tabla 5

Resultados del agua residual antes y después del tratamiento

Parámetro	Agua residual inicial	Biofiltro con bagazo de caña (Final)	Biofiltro con aserrín (Final)	Remoción Biofiltro con bagazo de caña	Remoción Biofiltro con aserrín
pH	8,83	7.08	7.00	-	-
Temperatura (°C)	17.66	19.05	20.27	-	-
Turbidez (NTU)	3.00	0	0	100%	100%
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	2.78	3.51	2.40	-26.26%	13.67%
DQO (mg/L)	47,00	77	7.00	-63.83%	85.11%

Elaborado por: Carrera E & Sanguña K. (2026)

13.3.1 Interpretación

Los resultados obtenidos muestran que ambos biofiltros mejoraron la calidad del agua residual, aunque con diferencias en su desempeño. El pH disminuyó de 8,83 a 7,08 en el biofiltro con bagazo de caña y a 7,00 en el biofiltro con aserrín, acercándose a valores neutros favorables para los procesos biológicos. La temperatura presentó un ligero incremento en ambos tratamientos, pasando de 17,66 °C a 19,05 °C y 20,27 °C, respectivamente, sin representar una variación significativa para el funcionamiento del sistema.

En cuanto a la turbidez, ambos biofiltros lograron una remoción del 100 %, reduciendo el valor inicial de 3,00 NTU a 0 NTU, lo que demuestra una alta capacidad para retener partículas suspendidas. Por otro lado, los sólidos disueltos totales (TDS) disminuyeron de 2,78 a 2,40 en el biofiltro con aserrín, mientras que en el biofiltro con bagazo de caña aumentaron hasta 3,51, lo que sugiere la liberación de compuestos solubles del material filtrante. De manera similar, la DQO se redujo significativamente de 47 mg/L a 7 mg/L en el biofiltro con aserrín, evidenciando una alta remoción de materia orgánica, mientras que en el biofiltro con bagazo de caña aumentó hasta 77 mg/L, probablemente debido a la liberación de compuestos orgánicos propios del material. En conjunto, estos resultados indican que el biofiltro con aserrín presentó el mejor desempeño general, al lograr una mayor eficiencia en la remoción de los contaminantes evaluados y mejorar la calidad del agua residual.

Tabla 6
Comparación entre tratamientos

Parámetro	Mejor tratamiento	Observación
pH	Aserrín	Alcanzó un pH de 7,00, el valor más cercano a la neutralidad.
Temperatura (°C)	Ambos	Presentaron ligeras variaciones, manteniéndose dentro de un rango adecuado para el tratamiento biológico.
Turbidez (NTU)	Ambos	Lograron una remoción del 100 %, eliminando completamente la turbidez del agua residual.
Sólidos Disueltos Totales (TDS) (mg/L)	Aserrín	Redujo los TDS de 2,78 a 2,40, mientras que el bagazo de caña presentó un incremento.

DQO (mg/L)	Aserrín	Alcanzó una remoción del 85,11 %, reduciendo la DQO de 47 a 7 mg/L; el bagazo de caña presentó un aumento de este parámetro.
-------------------	---------	--

Elaborado por: Carrera E & Sanguña K. (2026)

13.3.2 Interpretación de la tabla

La comparación de los tratamientos evidencia que ambos biofiltros fueron eficaces para estabilizar el pH y eliminar la turbidez, manteniendo condiciones favorables para el tratamiento del agua residual. Sin embargo, el biofiltro con aserrín presentó un mejor desempeño en los parámetros de mayor importancia, al reducir los sólidos disueltos totales (TDS) y alcanzar una remoción del 85,11 % *mg/L* de la DQO, lo que demuestra una mayor capacidad para disminuir la carga orgánica del agua. En contraste, el biofiltro con bagazo de caña mostró un incremento en los TDS y la DQO, comportamiento que puede atribuirse a la liberación de compuestos solubles propios del material filtrante. En conjunto, los resultados permiten concluir que el biofiltro con aserrín fue el tratamiento más eficiente, ya que obtuvo mejores resultados en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos evaluados.

13.4 Resultados obtenidos de temperatura

Tabla 7

Variación de temperatura antes y después del tratamiento

Tratamiento	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Variación (°C)
Biofiltro con bagazo de caña	17.66	19.05	1.39
Biofiltro con aserrín	17.66	20.27	2.61

Elaborado por: Carrera E & Sanguña K. (2026)

13.4.1 Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos muestran que la temperatura presentó un ligero incremento después del tratamiento en ambos biofiltros. En el biofiltro con bagazo de caña, la temperatura aumentó de 17,66 °C a 19,05 °C, registrando una variación de 1,39 °C. Por su parte, el biofiltro con aserrín alcanzó una temperatura final de 20,27 °C, con una variación de 2,61 °C respecto al valor inicial.

Estas variaciones de temperatura no representan cambios significativos y se mantienen dentro de un rango adecuado para el desarrollo de los procesos biológicos que ocurren en los biofiltros. El ligero incremento puede atribuirse a la actividad metabólica de los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica, así como a las condiciones ambientales presentes durante el periodo de experimentación. Además, el material filtrante puede favorecer una mayor retención del calor al interior del sistema.

Por el contrario, las condiciones térmicas favorecieron el proceso de biofiltración, permitiendo el desarrollo de la actividad microbiana. En conjunto, los resultados indican que ambos biofiltros mantuvieron temperaturas adecuadas para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, siendo el aserrín el que registró una mayor variación térmica durante el proceso.

13.5 Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (TDS) mediante el biofiltro de bagazo de caña y aserrín

Tabla 8

Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (TDS) mediante el biofiltro de bagazo de caña y aserrín

Tratamiento	TDS inicial (mg/L)	TDS final (mg/L)	Eficiencia (%)
Bagazo de caña	2.78	3.51	-26.26%
Aserrín	2.78	2.40	13.67%

Elaborado por: Carrera E & Sanguña K. (2026)

13.5.1 Interpretación

El biofiltro con bagazo de caña presentó un aumento de los TDS, pasando de 2.78 mg/L a 3.51 mg/L, con una eficiencia negativa de -26.62 %, lo que indica una liberación de compuestos solubles del material filtrante que incrementó la concentración de sólidos disueltos.

En cambio, el aserrín logró reducir los TDS de 2.78 mg/L a 2.40 mg/L, alcanzando una eficiencia de 13.67 mg/L %, evidenciando una mayor capacidad de retención mediante procesos de adsorción. Por lo tanto, el aserrín presentó un mejor desempeño para la remoción de sólidos disueltos en comparación con el bagazo de caña.

13.5.2 Análisis y discusión de los resultados de TDS

El biofiltro con aserrín redujo la concentración de TDS de 2,78 mg/L a 2,40 mg/L, alcanzando una eficiencia del 14,03 %, mientras que el biofiltro con bagazo de caña presentó un incremento hasta 3,51 mg/L, obteniendo una eficiencia negativa. La reducción observada con el aserrín demuestra su capacidad para retener parte de los compuestos disueltos mediante procesos de adsorción, favorecidos por su estructura porosa y la presencia de lignina y celulosa.

Resultados semejantes fueron reportados por Manikkampatti Palanisamy (2022), quien evaluó materiales fibrosos naturales como medios filtrantes en sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales y observó reducciones significativas de TDS, atribuyéndolas a la elevada superficie específica de los materiales y al desarrollo de biopelículas que favorecen la remoción de contaminantes disueltos.

13.6 Remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Tabla 9

Remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) mediante el biofiltro de bagazo de caña y aserrín

Tratamiento	DQO inicial (mg/L)	DQO final (mg/L)	Eficiencia (%)
Bagazo de caña	47	77	-51.06%
Aserrín	47	7	85.11%

Elaborado por: Carrera E & Sanguña K. (2026).

13.6.1 Interpretación

Los resultados obtenidos para la demanda química de oxígeno (DQO) muestran un comportamiento diferente entre los materiales evaluados. El biofiltro elaborado con bagazo de caña presentó un incremento de la DQO, pasando de 47 mg/L a 77 mg/L, con una eficiencia negativa de -51,06 % mg/L. Este resultado indica que el material no logró remover la materia orgánica presente en el agua residual, sino que posiblemente liberó compuestos orgánicos solubles propios de su estructura, como residuos de azúcares y otros componentes biodegradables, aumentando la carga orgánica del agua tratada.

En cambio, el biofiltro con aserrín presentó una reducción significativa de la DQO, disminuyendo de 47 mg/L a 7 mg/L, alcanzando una eficiencia de remoción del 85,11 % mg/L. Esta disminución evidencia una alta capacidad del aserrín para retener y favorecer la degradación de la materia orgánica mediante procesos de adsorción y actividad microbiana desarrollada en el material filtrante.

13.6.2 *Análisis y discusión de los resultados de DQO*

La reducción de la DQO obtenida con el biofiltro de aserrín demuestra la eficiencia del material lignocelulósico para el tratamiento de aguas residuales domésticas, debido a la presencia de celulosa y lignina, componentes que proporcionan sitios activos para la adsorción de compuestos orgánicos

Por otro lado, el aumento de la DQO en el tratamiento con bagazo de caña puede estar relacionado con la liberación de materia orgánica soluble durante el contacto con el agua, comportamiento que ha sido observado en materiales lignocelulósicos sin un adecuado pretratamiento.

En comparación, el aserrín presentó el mejor desempeño en la remoción de DQO con una eficiencia del 85,11 %, mg/L demostrando mayor capacidad para disminuir la materia orgánica del agua residual, mientras que el bagazo de caña requiere procesos adicionales de lavado o estabilización antes de ser utilizado como material filtrante. Estos resultados evidencian que la selección y preparación del material lignocelulósico son factores determinantes en la eficiencia de los biofiltros.

14 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante la evaluación de los biofiltros elaborados con materiales lignocelulósicos demostraron que tanto el bagazo de caña como el aserrín poseen potencial para el tratamiento de aguas residuales domésticas, aunque con diferencias en su desempeño según el parámetro evaluado. El biofiltro con aserrín presentó los mejores resultados globales, al reducir la turbidez, los sólidos disueltos totales (TDS) y la demanda química de oxígeno (DQO), además de mantener el pH cercano a la neutralidad. Estos resultados evidencian la capacidad del aserrín como medio filtrante para mejorar la calidad del agua, coincidiendo con Montenegro-Rosero et al. (2022), quienes reportaron eficiencias

superiores al 80 % en la remoción de materia orgánica mediante biofiltros con residuos vegetales y aserrín.

El biofiltro con bagazo de caña también mostró resultados favorables, destacándose por alcanzar una remoción del 100 % de la turbidez y contribuir a la disminución del pH desde condiciones ligeramente alcalinas hasta valores cercanos a la neutralidad. Aunque se observó un incremento en los TDS y la DQO, este comportamiento puede atribuirse a la liberación inicial de compuestos orgánicos solubles propios del material vegetal, fenómeno descrito por Chen et al. (2022). Este resultado no limita el potencial del bagazo, sino que evidencia la importancia de aplicar un adecuado pretratamiento o una etapa de estabilización antes de su uso como medio filtrante.

La reducción del pH en ambos tratamientos demuestra que los biofiltros favorecieron la obtención de un agua con características más cercanas a la neutralidad, condición que resulta favorable para posteriores procesos de tratamiento o descarga. Asimismo, el ligero incremento de la temperatura se mantuvo dentro de un rango reducido, sin afectar el funcionamiento del sistema experimental.

Uno de los hallazgos más relevantes fue la eliminación de la turbidez hasta un valor no detectable por el equipo (0 NTU) en ambos tratamientos, equivalente a una eficiencia del 100 %. Este resultado confirma la capacidad de las capas filtrantes de grava, arena y materiales lignocelulósicos para retener partículas suspendidas, mejorando significativamente la claridad del agua. De acuerdo con Fitriani et al. (2023), los sistemas de filtración multicapa presentan una elevada eficiencia en la remoción de partículas mediante procesos de sedimentación, retención y adsorción.

En cuanto a los TDS, el aserrín logró una reducción del 13,67 %, reflejando su capacidad para retener compuestos disueltos gracias a su estructura porosa. Aunque el bagazo presentó un incremento en este parámetro, dicho comportamiento está asociado a la liberación temporal de sustancias solubles, característica propia de este tipo de biomasa durante las primeras etapas de utilización.

Respecto a la DQO, el aserrín alcanzó una eficiencia de remoción del 85,11 %, demostrando una alta capacidad para reducir la carga de materia orgánica presente en el agua residual. Este resultado es comparable con el reportado por Montenegro-Rosero et al. (2022),

quienes obtuvieron eficiencias cercanas al 86 % en biofiltros con residuos vegetales. Aunque el bagazo registró un incremento de la DQO, diversos estudios han demostrado que este material puede mejorar su capacidad de remoción cuando es sometido a procesos de lavado, activación o estabilización, lo que representa una alternativa prometedora para futuras investigaciones.

En términos generales, los resultados obtenidos confirman que el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos representa una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas. El empleo de estos materiales no solo contribuye a disminuir la carga contaminante del efluente, sino que también promueve la valorización de residuos agroindustriales y forestales, favoreciendo los principios de economía circular y sostenibilidad ambiental. No obstante, los resultados también evidencian la importancia de seleccionar adecuadamente el medio filtrante y realizar un pretratamiento apropiado, ya que estas condiciones influyen directamente en la eficiencia del proceso y en la calidad final del agua tratada.

15 CONCLUSIONES

La caracterización del efluente secundario de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Universidad Técnica de Cotopaxi evidenció que, previo a la biofiltración, el agua presentó un pH de 8,83, una temperatura de 17,66 °C, una turbidez de 47 NTU, 2,78 mg/L de sólidos disueltos totales (TDS) y una DQO de 47 mg/L, confirmando la presencia de materia orgánica y sólidos residuales que justificaron la aplicación de un tratamiento complementario mediante biofiltración.

El diseño y construcción de los biofiltros a escala con bagazo de caña de azúcar y aserrín permitieron implementar un sistema de flujo descendente funcional, conformado por columnas acrílicas de 15 cm × 15 cm y 1 m de altura, con capas de grava gruesa, grava fina, arena y material lignocelulósico. La configuración empleada permitió evaluar el comportamiento de ambos materiales filtrantes bajo las mismas condiciones de operación y verificar su aplicación como alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

La evaluación del desempeño de los biofiltros demostró que ambos materiales alcanzaron una eficiencia de remoción del 100 % de la turbidez; sin embargo, el aserrín presentó el mejor rendimiento al reducir los TDS de 2,78 a 2,40 mg/L y el DQO de 47 mg/L a 7 mg/L, alcanzando una eficiencia de remoción de DQO del 85,11 %. En contraste, el biofiltro con

bagazo de caña de azúcar incrementó los valores de TDS y DQO debido a la liberación de compuestos orgánicos propios del material, por lo que el aserrín se identificó como el medio filtrante más eficiente para las condiciones evaluadas.

16 RECOMENDACIONES

Evaluar la eficiencia de los biofiltros durante períodos de operación más prolongados, con el fin de determinar la vida útil de los materiales lignocelulósicos, la frecuencia de mantenimiento y el momento adecuado para su reemplazo.

Analizar diferentes tamaños de partícula, espesores de las capas filtrantes y tiempos de retención hidráulica, con el propósito de optimizar el diseño del biofiltro y mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes.

Incorporar en futuras investigaciones el análisis de otros parámetros de calidad del agua, como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), nitrógeno total, fósforo total, coliformes fecales y *Escherichia coli*, para obtener una evaluación más completa de la eficiencia del tratamiento.

Desarrollar investigaciones orientadas a evaluar la eficiencia de los biofiltros elaborados con bagazo de caña de azúcar y aserrín en la remoción de metales pesados, considerando que los materiales lignocelulósicos poseen propiedades adsorbentes que podrían favorecer la retención de este tipo de contaminantes y ampliar su aplicación en el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales.

Emplear elementos filtrantes de porcelana porosa durante el procesamiento de las muestras de laboratorio, con el propósito de mejorar la retención de partículas finas y obtener resultados más precisos y confiables en la evaluación de la eficiencia de los biofiltros. Promover el aprovechamiento de residuos agroindustriales y forestales como materiales filtrantes en sistemas de tratamiento de aguas residuales, fomentando prácticas de economía circular y contribuyendo a reducir los costos asociados a tecnologías convencionales de tratamiento.

17 BIBLIOGRAFÍAS

Abdissa, D., & Beyecha, K. (2021). Sugarcane bagasse adsorption evaluation and application on BOD and COD removal from textile wastewater treatment. *Water Conservation and Management*, 5(1), 30–34. <https://doi.org/10.26480/wcm.01.2021.30.34>

- ACS ES&T Water. (2025). Accelerated start-up and microbial community using novel plant-based waste biofilter media for treatment of real domestic wastewater via simultaneous nitrification and denitrification. ACS ES&T Water. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsestwater.5c00230>
- Agricultural lignocellulose biochar material in wastewater treatment: A critical review and sustainability assessment. (2025). Resources, Conservation & Recycling Advances. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773058125000055>
- Akter, M., Bhattacharjee, M., Dhar, A. K., Rahman, F. B. A., Haque, S., Rashid, T. U., & Kabir, S. M. F. (2021). *Cellulose-Based Hydrogels for Wastewater Treatment: A Concise Review*. **Gels**, 7(1), 30. <https://doi.org/10.3390/gels7010030> MDPI - Gels
- Alcívar-Bravo, A. A., Velásquez-Bazurto, S. D., Baquerizo-Crespo, R. J., & Riera, M. A. (2022). *Diseño de una biorrefinería para la obtención de bioproductos a partir de residuos lignocelulósicos*. **Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia**, 45(3). <https://doi.org/10.22209/rt.v45n3a04>
- American Water Works Association. (2022). *ANSI/AWWA B100-22: Granular filter material*. American Water Works Association.
- American Water Works Association. (2022). *ANSI/AWWA B101-22: Precoat Filter Media*. American Water Works Association.
- American Water Works Association. (2022). *Operational control of coagulation and filtration processes* (Manual M37, 4th ed.). American Water Works Association.
- Bahroodin, M. B., Zaidi, N. S., Kadier, A., Hussein, N., Syafiuddin, A., & Boopathy, R. (2022). A novel natural active coagulant agent extracted from the sugarcane bagasse for wastewater treatment. *Applied Sciences*, 12(16), 7972. <https://doi.org/10.3390/app12167972>
- Bashar, R., Gungor-Demirci, G., Karthikeyan, K. G., & Janke, R. (2021). *Assessment of wastewater characteristics and treatment performance for sustainable wastewater management*. **Journal of Environmental Management**, 292, 112738. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112738>

- Cabrera, M., Montenegro, L., & Jiménez, A. (2022). **Análisis de un sistema de tratamiento de aguas residuales de una industria de embutidos**. *Revista Politécnica*, 49(2), 47-54. <https://doi.org/10.33333/rp.vol49n2.05>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2024). *Panorama de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe 2024*.
- Costa-Conceição, K., Villamar Ayala, C. A., Dávila, T., & Gallardo, M. C. (2023). Performance of hybrid biofilter based on rice husks/sawdust treating grey wastewater. *Water Science and Technology*, 87(10), 2416–2431. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.132>
- Crini, G., & Badot, P. M. (2010). Application of chitosan, a natural polysaccharide, to wastewater treatment. *Progress in Polymer Science*, 35(3), 373–387. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.11.002>
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). *Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment*. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 145–155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
- Del Angel, E., Pantoja, M. A., López, R., & Cruz, A. E. (2022). Treatment of domestic wastewater using activated carbon prepared from sugarcane bagasse. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(1), 144–183. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-04>
- Domestic wastewater treatment using oakwood biochar: Filter column performance, influencing factors, and machine learning predictions. (2025). *Environmental Science: Water Research & Technology*. <https://pubs.rsc.org/nb/content/articlelanding/2025/ew/d5ew00313j>
- Fitriani, N., Radin Mohamed, R. M. S., Affandi, M., Nurdin, R. R., Kurniawan, S. B., & Ni'matuzahroh. (2023). Performance of intermittent slow sand filter processing units in treating food court wastewater. *Journal of Ecological Engineering*, 24(4), 117–139. <https://doi.org/10.12911/22998993/159399>
- García-Rodríguez, A., Matamoros, V., & Bayona, J. M. (2022). *Biological treatment of wastewater using biofilm-based systems: Recent advances and perspectives*. **Science of The Total Environment**, 806, 150688. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150688>

- González-Tineo, P., Aguilar, A., Reynoso, A., Durán, U., Garzón-Zúñiga, M., Meza-Escalante, E., Álvarez, L., & Serrano, D. (2022). *Organic matter removal in a simultaneous nitrification–denitrification process using fixed-film system*. **Scientific Reports**, **12**, 1882. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05521-3>
- Hạnh, T. X., & Yen, V. T. H. (2022). *Research on the process of making paper from bagasse at laboratory scale*. *Tạp Chí Đại Học Thủ Dầu Một*, *4*, 150–156. <https://doi.org/10.37550/tdmu.ejs/2022.03.316>
- Hiranobe, C. T., et al. (2024). *Sugarcane Bagasse: Challenges and Opportunities for Waste Recycling*. *Journal of Composites Science*, *6*(2), 35. https://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/public/journals/1/html_v7n3/art004.html
- <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780073401188>
- <https://www.fao.org/3/i7754e/i7754e.pdf>
- https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292013000100002&script=sci_arttext
- Iturralde Jácome, X. A., & Hernández Escobar, A. A. (2022). Biofiltración de aguas residuales de industrias arroceras de San Jacinto de Yaguachi, Ecuador mediante cascarilla de arroz. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, *5*, e271. <https://doi.org/10.46380/rias.vol5.e271>
- Iturralde Jácome, X. A., & Hernández Escobar, A. A. (2022). *Biofiltración de aguas residuales de industrias arroceras de San Jacinto de Yaguachi, Ecuador mediante cascarilla de arroz*. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, *5*, e271. <https://doi.org/10.46380/rias.vol5.e271>
- Juela, D., Vera, M., Cruzat, C., Álvarez, X., & Vanegas, E. (2021). Adsorption properties of sugarcane bagasse and corn cob for the sulfamethoxazole removal in a fixed-bed column. **Sustainable Environment Research**, **31**, 27. <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00102-x>
- Kamboj, A., Sadh, P. K., Yadav, B., Kumari, A., Kumar, R., Surekha, Saharan, B. S., Brar, B., Kumar, D., Goyal, C., et al. (2024). *Unravelling the potential of sugarcane bagasse: An eco-*

friendly and inexpensive agro-industrial waste for the production of valuable products using pretreatment processes for sustainable bioeconomy. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12, 114461. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114461>

Lázaro Ramos, G. Y. (2024). *Eficiencia de filtros orgánicos para el tratamiento de las aguas residuales provenientes del Hospital Regional Hermilio Valdizán Medrano de Huánuco – Perú 2023* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional de la Universidad de Huánuco. <http://repositorio.udh.edu.pe/20.500.14257/4857>

Mahmud, M. A., & Anannya, F. R. (2021). *Sugarcane bagasse—A source of cellulosic fiber for diverse applications. Heliyon*, 7(8), e07771. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07771>

Manikkampatti Palanisamy, M. (2022). *Treatment of Municipal Wastewater in a Fixed Aerated Bed: Use of Natural Fibrous Materials. International Journal of Biomaterials*, 2022, 4839913. <https://doi.org/10.1155/2022/4839913>

Masi, F., Rizzo, A., & Regelsberger, M. (2021). Shifting from conventional to organic filter media in wastewater biofiltration treatment: A review. *Applied Sciences*, 11(18), 8650. <https://doi.org/10.3390/app11188650>

Mateo-Sagasta, J., Raschid-Sally, L., & Thebo, A. (2017). *Water Pollution from Agriculture: A Global Review. FAO & IWMI*.

Matsueda, Y., & Antunes, E. (2024). *A review of current technologies for the sustainable valorisation of sugarcane bagasse. Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 114900. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114900>

Meez, E., Rahdar, A., & Kyzas, G. Z. (2021). Sawdust for the removal of heavy metals from water: A review. *Molecules*, 26(14), 4318. <https://doi.org/10.3390/molecules26144318>

Mendoza-Espinosa, L. G., Stephenson, T., & Paredes, D. (2021). *Sistemas de tratamiento con biopelículas: principios y aplicaciones en aguas residuales. Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(5), 1-25.

Montenegro-Rosero, K., Villamar-Ayala, C. A., Fernández, L., & Espinoza-Montero, P. (2022). Operational performance of corncobs/sawdust biofilters coupled to microbial fuel

cells treating domestic wastewater. *Science of the Total Environment*, 809, Article 151115.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721061933>

Morales-Fiallos, F., Maldonado-Narváez, L., Núñez-Aldás, G., Paredes-Cabezas, G., & Hechavarría, R. (2022). *Filtro con elementos de bagazo de caña de azúcar para el tratamiento de aguas residuales. Tecnología y Ciencias del Agua.*
<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-05-09>

ONU-Agua. (2024). *Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos y la gestión sostenible del agua.*

Ortega Ramírez, A. T., & Sánchez Rodríguez, N. (2021). Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(2), 121–134.
<https://doi.org/10.18359/rcin.5343>

Ouadi, B., Bendraoua, A., Boualla, N., & Adjdir, M. (2020). Efficiency of pozzolan and sawdust as biofilter in the treatment of wastewater. *Applied Water Science*, 10(143).
<https://doi.org/10.1007/s13201-020-01226-y>

Patel, P., Gupta, S., & Mondal, P. (2022). Modeling of continuous adsorption of greywater pollutants onto sawdust activated carbon bed integrated with sand column. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107155.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107155>

Pérez-López, M. E., Hernández-González, E., & Ramírez-Carrillo, R. (2023). *Tecnologías biológicas sostenibles para el tratamiento de aguas residuales: una revisión. Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 39, 1-15.

Performance of wood chips/peanut shells biofilters used to remove organic matter from domestic wastewater. (2020). *Science of the Total Environment*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720331065>

Pimentel, C. H., Freire, M. S., Gómez-Díaz, D., & González-Álvarez, J. (2023). Removal of wood dyes from aqueous solutions by sorption on untreated pine (*Pinus radiata*) sawdust. *Cellulose*, 30, 4587–4608. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05145-4>

- Review on use of lignocellulosic biomass-derived carbon sources for biological wastewater treatment: Scale-up challenges and pretreatment strategies. (s.f.). *Resources, Conservation & Recycling Advances*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S194439862600007X>
- Samer, M. (2022). *Biological and chemical wastewater treatment processes: A review*. **Water**, 14(19), 3140. <https://doi.org/10.3390/w14193140>
- Sampaolesi, S., Toledo, M. V., Saparrat, M. C. N., & Briand, L. E. (2023). *Exploración de celulasas nativas argentinas para la sacarificación de residuos lignocelulósicos urbanos*. **Revista de Ciencia y Tecnología**.
- Tony, M. A. (2022)**. Aquananotechnology: oriented-sawdust waste valorization into magnetic nanocellulosic particles for Synozol Red K-HL sorption prospect. *Applied Water Science*, 12, 199. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01725-0>
- Trujillo-del Bosque, A., Dopico-Ramírez, D., León-Fernández, V., & Díaz-López, C. (2021). *Remoción de Pb(II) usando meollo del bagazo de la caña de azúcar como biosorbente*. **Revista Cubana de Química**, 33(3), 250-273.
 URL: <https://www.redalyc.org/journal/4435/443569388001/html/>
- Trujillo-del Bosque, A., Dopico-Ramírez, D., León-Fernández, V., & Díaz-López, C.** (2021). *Remoción de Pb (II) usando meollo del bagazo de la caña de azúcar como biosorbente*. **Revista Cubana de Química**, 33(3), 250–273. **Redalyc:** <https://www.redalyc.org/journal/4435/443569388001/html/>
- Osorio-Rivera, M. A. (2021). *La calidad de las aguas residuales domésticas*. **Polo del Conocimiento**, 6(3).
- Tamayo, F. M. J., et al. (2024). *Análisis de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales: Una revisión sistemática*. **Revista La Técnica**.
- ONU-Agua. (2024). *Progresos en la proporción de los flujos de aguas residuales domésticas e industriales tratadas de manera adecuada: Situación a mitad de período del indicador 6.3.1 de los ODS*.

