



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE AMBIENTAL

Optimización de la planta de tratamiento de lixiviados para la
mancomunidad Colta, Alausí, Guamote

Trabajo de Titulación para optar al título de
Ingeniera Ambiental

Autor:

Alvarez Ortega Nicole Valentina

Tutor:

Ing. Marcel Paredes Herrera, Msc.

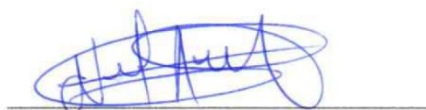
Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Nicole Valentina Alvarez Ortega, con cédula de ciudadanía 060584817-5 autora del trabajo de investigación titulado: Optimización de la planta de tratamiento de lixiviados para la mancomunidad Colta, Alausí, Guamote, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 30 de junio de 2026.



Nicole Valentina Alvarez Ortega

C.I: 060584817-5

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Marcel Paredes Herrera catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: Optimización de la planta de tratamiento de lixiviados para la mancomunidad Colta, Alausí, Guamote, bajo la autoría de Nicole Valentina Alvarez Ortega; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 24 días de junio de 2026



Ing. Marcel Paredes Herrera, MgS.

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación Optimización de la planta de tratamiento de lixiviados de la mancomunidad Colta, Alausí, Guamote, presentado por Nicole Valentina Alvarez Ortega, con cédula de identidad número 060584817-5, bajo la tutoría de Ing. Marcel Paredes Herrera, MgS; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 30 de junio de 2026.

Mgs. Carlos Maldonado PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO	 Firmado digitalmente en FirmadOT Firmado digitalmente por: CARLOS ANDRES MALDONADO CHAVEZ
Mgs. Carla Silva MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO	 Firmado digitalmente en FirmadOT Firmado digitalmente por: CARLA FERNANDA SILVA PADILLA
Mgs. Patricio Santillán MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO	 Firmado digitalmente en FirmadOT Firmado digitalmente por: GUIDO PATRICIO SANTILLAN LIMA



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-08.17
VERSIÓN 01: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, ALVAREZ ORTEGA NICOLE VALENTINA con CC: 0605848175, estudiante de la Carrera INGENIERÍA AMBIENTAL, Facultad de INGENIERÍA; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS PARA LA MANCOMUNIDAD COLTA, ALAUSÍ, GUAMOTE", cumple con el 10%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio , COMPILATIO, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 19 de junio de 2026



Validar documento en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**MARCO MARCEL
PAREDES HERRERA**

Ing. Marcel Paredes Herrera Mgs
TUTOR(A)

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación, en primer lugar, a mis padres, por ser mi mayor inspiración y el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su amor incondicional, sus sacrificios, consejos y apoyo constante en cada etapa de mi formación académica y personal. Todo este logro también les pertenece a ustedes.

A mi familia en general, especialmente a mis abuelitos, tíos y primos, quienes con su cariño, motivación y confianza me impulsaron a seguir adelante aun en los momentos más difíciles. Gracias por acompañarme siempre y por celebrar conmigo cada pequeño avance hacia esta meta.

De manera especial, dedico este trabajo a mi novio, por su paciencia, comprensión, apoyo incondicional y palabras de aliento durante todo este proceso. Gracias por estar presente en cada momento, motivándome a no rendirme y brindándome tranquilidad y fortaleza para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

Finalmente, dedico esta tesis a todas las personas que creyeron en mí y formaron parte de este camino, porque de una u otra manera contribuyeron al cumplimiento de este sueño profesional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por bendecirme, cuidarme y darme la fortaleza necesaria para seguir aquí, luchando por mis sueños y metas. Gracias por guiar cada uno de mis pasos, por darme salud, sabiduría y la oportunidad de culminar esta importante etapa de mi vida. En los momentos difíciles, su amor y protección fueron mi mayor refugio y motivación para no rendirme.

Expreso mi más profundo agradecimiento a mis padres, por su esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional a lo largo de mi formación académica. Gracias por confiar siempre en mí, por motivarme a seguir adelante y por ser mi ejemplo de perseverancia y dedicación.

A mis abuelitos, tíos, primos y demás familiares, gracias por sus consejos, palabras de ánimo y cariño constante, los cuales fueron fundamentales para alcanzar esta meta. Su apoyo y compañía hicieron más llevadero este proceso.

A mi novio, gracias por estar a mi lado en cada momento, por tu comprensión, paciencia y apoyo emocional durante el desarrollo de esta investigación. Tus palabras de motivación y tu confianza en mí fueron esenciales para no desistir y continuar hasta el final.

También agradezco a mis docentes y tutor de tesis de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Chimborazo, por compartir sus conocimientos, orientación y experiencia durante mi formación académica y el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo y culminación de este trabajo investigativo.

ÍNDICE

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO SISTEMA ANTI PLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Antecedentes	18
1.2 Planteamiento del Problema	19
1.3 Justificación	20
1.4 Objetivos.....	22
1.4.1 Objetivo general	22
1.4.2 Objetivos Específicos	22
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 Área de estudio y contexto de la gestión de residuos sólidos	23
2.2 Antecedentes, características territoriales y población de la mancomunidad..	25
2.3 Precipitación	25
2.4 Participación comunitaria y su influencia en la generación de lixiviados	26
2.5 Funcionamiento y estado actual de la planta de tratamiento de lixiviados.....	26
2.6 Optimización del sistema de tratamiento de lixiviados	27
2.7 Marco normativo:	27
2.8 Análisis físicos y químicos de los lixiviados	29
2.9 Técnica de “connected papers” en investigaciones ambientales	29

2.10	Variable técnica	30
2.11	Variable ambiental	31
2.12	Variable social	31
2.13	Integración de variables en la connected papers.....	32
CAPÍTULO III. METODOLOGIA.....		33
3.1	Enfoque metodológico	33
3.2	Diseño de la investigación	33
3.3	Desarrollo metodológico en función de los objetivos específicos.....	34
3.3.1	Objetivo específico 1: Evaluar la planta de tratamiento de lixiviados existente de la mancomunidad Colta, Alausí, Guamote.....	34
3.3.2	Análisis Fisicoquímicos de Lixiviados.....	35
3.3.3	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	36
3.3.4	Parámetros Complementarios.....	36
3.3.5	Fundamento del método	36
3.3.6	Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	38
3.3.7	Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST)	38
3.3.8	Determinación de Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)	38
3.3.9	Determinación de Fósforo Total.....	39
3.4	Objetivo específico 2: Generar alternativas de mejora para la optimización de la planta de tratamiento de lixiviados.....	40
3.5	Métodos de cálculo y análisis de resultados	42
3.5.1	Eficiencia de remoción	43
3.5.2	Cálculo del caudal	43
3.5.3	Tiempo de retención hidráulica	44
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		44
4.1	Evaluar la planta de tratamiento de lixiviados existente de la mancomunidad Colta, Alausí, Guamote”	44
4.1.1	Recolección de información primaria	44
4.1.2	Análisis de laboratorio.....	45
4.1.3	Análisis de eficiencia del sistema.....	46
4.2	Resultados del objetivo específico.....	47

4.2.1	“Generar alternativas de mejora para la optimización de la planta de tratamiento de lixiviados para la mancomunidad Colta, Alausí, Guamote”	47
4.2.2	Análisis y selección de la alternativa de tratamiento.....	48
4.2.3	Propuesta del sistema de tratamiento optimizado.....	56
4.2.4	Parámetros de diseño y cálculos hidráulicos	57
4.2.5	Cálculo del tanque de homogenización	58
4.2.6	Cálculo de la laguna anaerobia.....	58
4.2.7	Cálculo de la laguna facultativa.....	58
4.2.8	Cálculo del sedimentador secundario	59
4.2.9	Cálculo del filtro de arena	59
4.3	Comparativa entre la planta actual y el rediseño propuesto	61
4.3.1	Comparación de eficiencias de remoción	62
4.4	Discusión científica de los resultados	66
4.5	Comparación de eficiencias de remoción	66
4.6	Nutrientes y limitaciones del sistema actual	67
4.7	Sustento técnico de la propuesta optimizada	68
4.8	Relevancia ambiental y operativa	69
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		70
5.1	Conclusiones.....	70
5.2	Recomendaciones	71
REFERENCIAS		73
ANEXOS.....		78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de laboratorio.....	46
Tabla 2 Tesis de Enfoque Técnico	48
Tabla 3. Tesis de Enfoque Ambiental	50
Tabla 4. Tesis de Enfoque Económico	52
Tabla 5. Comparativa entre la planta actual y el rediseño optimizado.....	61
Tabla 6. Comparación de eficiencias de remoción entre la planta actual y la planta optimizada	62

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa de ubicación del proyecto.....	24
Ilustración 2. Diseño planta actual	39
Ilustración 3. Mapa de ubicación de tesis en Ecuador.....	54
Ilustración 4. Diseño de planta de tratamiento de lixiviados Optimizado.....	63

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo optimizar la planta de tratamiento de lixiviados del consorcio Colta, Alausí y Guamote a través de una evaluación exhaustiva de su condición actual y el desarrollo de una propuesta de mejora técnica para mejorar la eficiencia del tratamiento. La información primaria se obtuvo a través de visitas técnicas de campo, inspecciones de infraestructura, observación directa de los procesos de tratamiento y muestreo de lixiviados en los puntos de entrada y salida. La información secundaria incluía informes operativos, análisis de calidad del agua, estudios técnicos y diseños de plantas de tratamiento proporcionados por la entidad gestora. Se realizaron análisis de laboratorio fisicoquímicos para determinar los parámetros clave de calidad de la lixiviación y evaluar la eficiencia de eliminación de contaminantes del sistema existente. Los resultados revelaron limitaciones operativas y deficiencias en la eliminación de materia orgánica, nutrientes y sólidos suspendidos. Además, se utilizó la herramienta Connected Papers para revisar estudios científicos y experiencias relacionadas con el tratamiento con lixiviados en Ecuador, lo que permitió la identificación y comparación de las tecnologías de tratamiento aplicables. Basándose en los datos de campo, los resultados del laboratorio, la documentación técnica y la evidencia científica, se desarrolló una propuesta de optimización que incluye unidades de pretratamiento, mejoras en los procesos biológicos y etapas de pulido complementarias. El rediseño propuesto representa una alternativa técnicamente viable para mejorar la gestión ambiental y apoyar el cumplimiento de las regulaciones ambientales actuales.

Palabras clave: lixiviado, optimización, planta de tratamiento, análisis de laboratorio, rediseño, gestión ambiental.

Abstract

This research aimed to optimize the leachate treatment plant of the Colta, Alausí, and Guamote consortium through a comprehensive evaluation of its current condition and the development of a technical improvement proposal to enhance treatment efficiency. Primary data was obtained through technical visits, infrastructure inspections, direct observation of treatment processes, and leachate sampling at the inlet and outlet points. Secondary data included operational reports, water quality analyses, technical studies, and treatment plant designs provided by the managing entity.

Physicochemical laboratory analyses were performed to determine key leachate quality parameters and evaluate the contaminant removal efficiency of the existing system. The results revealed operational limitations and deficiencies in the removal of organic matter, nutrients, and suspended solids.

Additionally, the Connected Papers tool was used to review scientific studies and experiences related to leachate treatment in Ecuador, enabling the identification and comparison of applicable treatment technologies.

Based on field data, laboratory results, technical documentation, and scientific evidence, an optimization proposal was developed, it includes pretreatment units, improvements to biological processes, and additional polishing stages. The proposed redesign represents a technically feasible alternative for improving environmental management and supporting compliance with current environmental regulations.

Keywords: leachate, optimization, treatment plant, laboratory analysis, redesign, environmental management



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**WASHINGTON GEOVANNY
ARMAS PESANTEZ**

Reviewed by:

Geovanny Armas Pesántez, B.A. Mgs.

EFL PROFESSOR

ID. N°: 0602773301

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

La gestión técnica de los lixiviados generados en los sistemas de disposición final de residuos sólidos urbanos constituye un componente crítico dentro de la ingeniería sanitaria, al implicar la necesidad de prevenir, controlar y mitigar impactos ambientales negativos. Los lixiviados se caracterizan por contener elevadas concentraciones de materia orgánica medidos a través de factores como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), metales pesados, nutrientes nitrogenados (principalmente nitrógeno amoniacal) y microorganismos patógenos, lo que obliga a implementar procesos de tratamiento especializados que permitan proteger los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, así como conservar la calidad del suelo, en cumplimiento de la normativa ambiental vigente (Kaza et al., 2018; Renou et al., 2015).

A nivel global, se evidenció un incremento sostenido en la generación de residuos sólidos urbanos, pasando de aproximadamente 2.01 mil millones de toneladas en 2016 a una proyección de 3.40 mil millones de toneladas para el año 2050, lo cual implica un aumento directo en la producción de lixiviados (Kaza et al., 2018). En América Latina, la generación per cápita oscila entre 0.9 y 1.2kg/hab/día, mientras que en Ecuador se estiman valores cercanos a 0.84kg/hab/día, lo que refleja una tendencia creciente en la presión sobre los sistemas de disposición final (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2022).

En la provincia de Chimborazo, específicamente en la mancomunidad conformada por los cantones Colta, Alausí y Guamote, se registra una población aproximada de: Colta: 45,000 habitantes, Alausí: 44,000 habitantes y Guamote: 42,000 habitantes. Lo que suma un total cercano a 130,000 habitantes (INEC, 2022).

Esta población genera volúmenes significativos de residuos sólidos que, bajo condiciones de disposición final, dan lugar a la formación de lixiviados. Se estima que la generación de lixiviados puede incrementarse entre un 20% y 50% en sistemas expuestos a altas precipitaciones, debido a la infiltración de agua en los residuos (Tchobanoglous et al., 2015). Considerando que la región presenta condiciones de alta pluviometría (entre 500 y 1000mm anuales), se puede inferir un aumento progresivo en la producción de lixiviados en los últimos años.

En este contexto, se evidenció que la planta de tratamiento de lixiviados actualmente en operación presenta deficiencias técnicas relevantes, tales como presentar infraestructura obsoleta y registrar deficiencias en el mantenimiento preventivo y correctivo. Estas condiciones limitan la capacidad del sistema para tratar adecuadamente el caudal creciente de lixiviados, reduciendo su eficiencia global (Kjeldsen et al., 2016). La ausencia de un sistema optimizado de tratamiento contribuye a generar impactos ambientales negativos, tales como contaminar cuerpos hídricos superficiales y subterráneos, incumplir los límites máximos permisibles establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A del Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE), y provocar el deterioro progresivo de la calidad ambiental en el área de influencia.

Estudios demuestran que los lixiviados sin tratamiento pueden presentar concentraciones de DQO superiores a 5000mg/L y nitrógeno amoniacal superiores a 1000 mg/L, superando ampliamente los límites permisibles (Foo & Hameed, 2015).

Adicionalmente, se consideró el impacto sobre la salud pública, al existir riesgo de exposición a patógenos y sustancias tóxicas presentes en los lixiviados, lo que puede afectar a las poblaciones cercanas a los sitios de disposición final. Esta situación

evidenció la necesidad de implementar medidas correctivas y preventivas orientadas a mejorar la gestión de estos efluentes (Kaza et al., 2018).

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo principal optimizar la planta de tratamiento de lixiviados de la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote, mediante la aplicación de una metodología integral que permita: realizar un diagnóstico técnico detallado de las condiciones actuales de operación; caracterizar los lixiviados desde el punto de vista fisicoquímico y microbiológico; y diseñar una solución técnica integral alineada con la normativa ambiental nacional.

Asimismo, se buscó desarrollar una propuesta de rediseño de la planta, basada en criterios de eficiencia, sostenibilidad y viabilidad técnico-económica, con el fin de identificar, prevenir y mitigar los impactos derivados del tratamiento de lixiviados. Todo ello con el propósito de garantizar una gestión adecuada de estos efluentes y contribuir a mejorar la calidad ambiental y sanitaria de la mancomunidad.

1.1 Antecedentes

La gestión de lixiviados constituye uno de los principales desafíos asociados a la operación de rellenos sanitarios debido a la elevada carga contaminante que estos efluentes pueden presentar. Diversas investigaciones desarrolladas a nivel nacional demostraron que los sistemas convencionales de tratamiento presentan limitaciones para remover eficientemente nutrientes, compuestos recalcitrantes y otros contaminantes presentes en lixiviados de mediana y alta carga orgánica (Von Sperling, 2007; Metcalf & Eddy, 2014).

En la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote, el tratamiento de lixiviados se realizó mediante un sistema compuesto por unidades físicas y biológicas diseñadas para reducir la carga contaminante generada en el relleno sanitario. Sin embargo, el incremento progresivo de residuos sólidos y las características propias del lixiviado produjeron una mayor exigencia operativa sobre la infraestructura existente.

La evaluación técnica efectuada durante la presente investigación permitió identificar limitaciones relacionadas con la ausencia de unidades completas de pretratamiento, acumulación de sólidos y una capacidad limitada para remover determinados contaminantes. Paralelamente, los análisis de laboratorio evidenciaron concentraciones elevadas de DBO₅, DQO, sólidos suspendidos, nitrógeno y fósforo, así como eficiencias moderadas de remoción para materia orgánica y bajas eficiencias para nutrientes.

Estas condiciones evidenciaron la necesidad de fortalecer el sistema existente mediante la incorporación de procesos complementarios que permitieran mejorar el desempeño global de la planta y optimizar la calidad del efluente tratado.

1.2 Planteamiento del Problema

La planta de tratamiento de lixiviados de la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote fue implementada con la finalidad de reducir la carga contaminante generada por los residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario. No obstante, la evaluación técnica realizada durante la presente investigación evidenció limitaciones operativas que afectaron el desempeño general del sistema.

Los análisis físico-químicos efectuados en muestras de entrada y salida determinaron concentraciones elevadas de materia orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes. Aunque el sistema logró reducir parcialmente algunos parámetros, las eficiencias de remoción obtenidas fueron moderadas para DBO₅ y DQO, mientras que la eliminación de nitrógeno y fósforo resultó limitada.

Adicionalmente, durante la inspección técnica se identificó la ausencia de unidades completas de pretratamiento, situación que favoreció la acumulación de sólidos y aumentó el riesgo de colmatación en las unidades posteriores. Estas condiciones redujeron la eficiencia hidráulica del sistema y limitaron su capacidad para responder adecuadamente a la carga contaminante actual del lixiviado.

Frente a este escenario, surgió la necesidad de plantear alternativas de optimización que permitieran mejorar la remoción de contaminantes, fortalecer la estabilidad operativa del sistema y contribuir a una gestión más eficiente de los lixiviados generados por la mancomunidad.

1.3 Justificación

La necesidad de disponer de información técnica actualizada sobre el funcionamiento de la planta de tratamiento de lixiviados de la Mancomunidad Colta, Alausí y Guamote surge de la importancia de identificar alternativas que permitan mejorar su desempeño operativo y ambiental. Diversos estudios señalan que los lixiviados constituyen efluentes complejos con elevadas concentraciones de materia orgánica, nitrógeno amoniacal, compuestos recalcitrantes y otros contaminantes que requieren procesos de tratamiento eficientes y continuamente optimizados para garantizar el cumplimiento de los estándares ambientales (Teng et al., 2021; Bandala et al., 2021).

Desde el punto de vista técnico, la investigación permitió evaluar el comportamiento de las unidades existentes mediante la caracterización físico-química del lixiviado y el análisis de las eficiencias de remoción alcanzadas por el sistema. La literatura científica indica que la caracterización detallada del lixiviado constituye una etapa fundamental para comprender su comportamiento, determinar las limitaciones operativas de los sistemas de tratamiento y diseñar estrategias de optimización acordes con las condiciones específicas de cada instalación (Teng et al., 2021; Remmas et al., 2023). Esta información constituyó la base para formular una propuesta de optimización sustentada en las condiciones reales de operación de la planta.

Desde la perspectiva ambiental, el estudio permitió identificar limitaciones en la remoción de materia orgánica y nutrientes, parámetros que pueden influir directamente en la calidad del efluente tratado. Se ha demostrado que una remoción insuficiente de compuestos orgánicos, nitrógeno y otros contaminantes presentes en los lixiviados puede

generar impactos negativos sobre los cuerpos receptores, afectar los ecosistemas acuáticos y comprometer la calidad de las aguas superficiales y subterráneas (Kurniawan et al., 2021; Sharma et al., 2023). En este contexto, la propuesta desarrollada buscó fortalecer los procesos de tratamiento existentes y contribuir a una gestión ambiental más eficiente de los lixiviados.

Desde el ámbito académico, la investigación generó información técnica que puede servir como referencia para futuras evaluaciones y proyectos relacionados con el tratamiento de lixiviados en sistemas mancomunados y rellenos sanitarios con características similares. Diversos autores destacan la necesidad de desarrollar estudios locales que permitan comprender el comportamiento específico de los lixiviados y evaluar tecnologías de tratamiento bajo condiciones reales de operación, contribuyendo así al fortalecimiento del conocimiento científico y al desarrollo de soluciones más eficientes para la gestión de residuos sólidos (Ahmed et al., 2022; Remmas et al., 2023).

Finalmente, desde el punto de vista práctico, la propuesta planteada constituye una herramienta de apoyo para la toma de decisiones orientadas al mejoramiento de la infraestructura existente, permitiendo disponer de criterios técnicos para futuras intervenciones en la planta de tratamiento. Estudios recientes señalan que la evaluación del desempeño de las plantas y la implementación de medidas de optimización basadas en datos operativos reales contribuyen significativamente al incremento de las eficiencias de remoción, la reducción de costos operativos y el cumplimiento de los requisitos ambientales establecidos por la normativa vigente (Asadi et al., 2023; Chen et al., 2024).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Optimizar la planta de tratamiento de lixiviados para la mancomunidad Colta, Alausí, Guamote

1.4.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la planta de tratamiento de lixiviados existente de la mancomunidad Colta, Alausí, Guamote
- Generar alternativas de mejora para la optimización de la planta de tratamiento de lixiviados para la mancomunidad Colta, Alausí, Guamote

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1 Área de estudio y contexto de la gestión de residuos sólidos

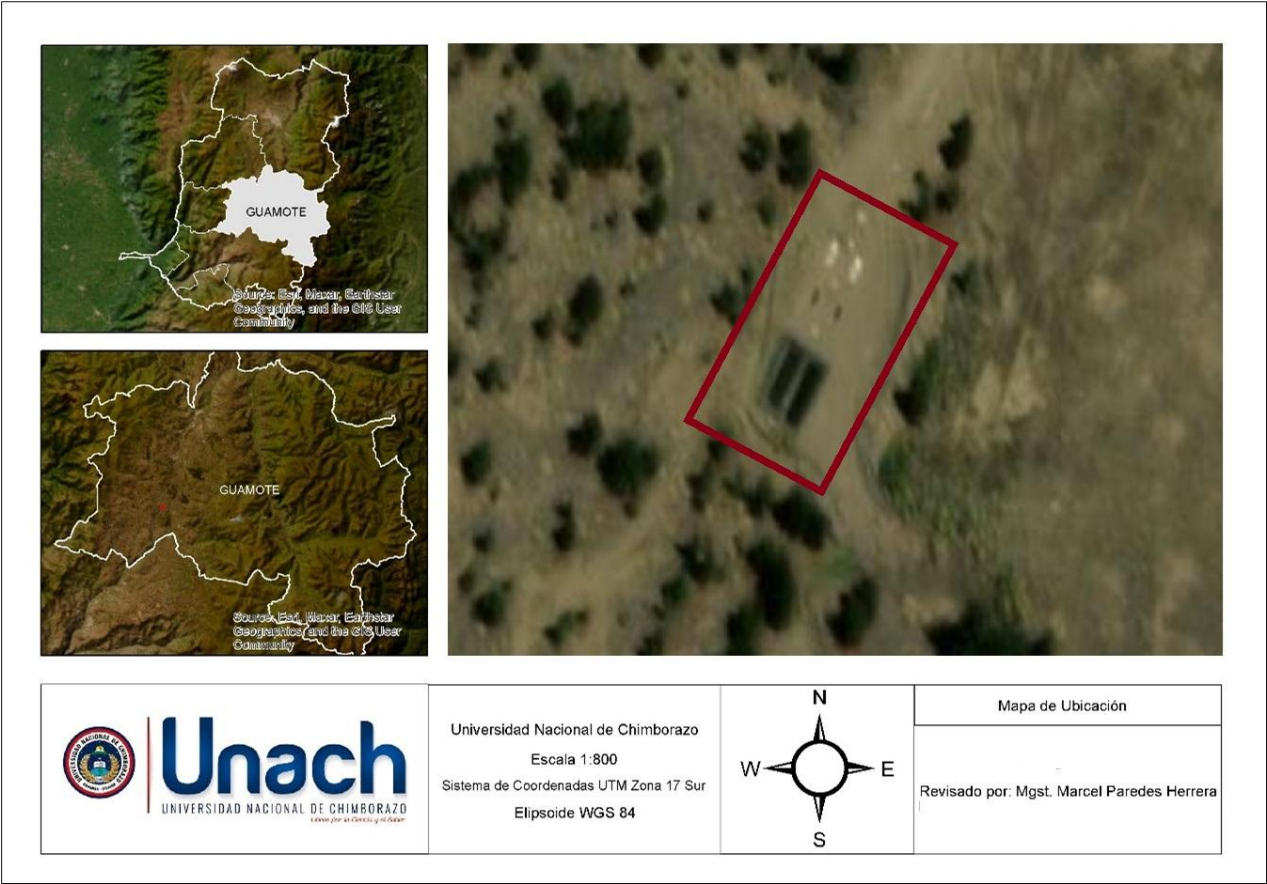
El presente estudio se desarrolla en la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario perteneciente a la mancomunidad de los cantones Colta, Alausí y Guamote, ubicada en la provincia de Chimborazo, en la región interandina del Ecuador.

Esta zona presenta un clima templado de montaña, con temperaturas entre 8 °C y 20 °C y precipitaciones anuales que oscilan entre 500 y 1.200 mm, condiciones que influyen directamente en la generación de lixiviados debido a la infiltración de agua a través de los residuos sólidos, incrementando su volumen especialmente en épocas lluviosas (MAATE, 2021; INAMHI, 2020).

En este contexto, la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) se define como un sistema que articula todas las etapas del manejo de residuos, desde su generación hasta su disposición final, integrando criterios ambientales, técnicos, económicos y sociales para garantizar la sostenibilidad del sistema (Kaza et al., 2018).

Sin embargo, en territorios rurales y mancomunados como Colta, Alausí y Guamote, la implementación de la GIRS presenta limitaciones asociadas a la dispersión poblacional, la topografía y las restricciones presupuestarias, lo que dificulta alcanzar niveles óptimos de eficiencia en la gestión (Ferronato & Torretta, 2019).

Ilustración 1. Mapa de ubicación del proyecto



Nota: ubicación de la planta de tratamiento de lixiviados de la mancomunidad Colta, Alausí, Guamote

2.2 Antecedentes, características territoriales y población de la mancomunidad

La mancomunidad de los cantones Colta, Alausí y Guamote se constituye como una estrategia de gestión conjunta orientada a mejorar el manejo de los residuos sólidos en la provincia de Chimborazo, en el marco de las políticas públicas ambientales promovidas en el Ecuador desde la década de 2010 (MAE, 2015).

Territorialmente, Colta se ubica en la zona central de la provincia con predominancia de actividades agropecuarias y una altitud aproximada de 3.200 msnm; Alausí se localiza al sur y presenta una topografía accidentada que dificulta las operaciones logísticas; y Guamote se ubica en la zona centro-sur, caracterizándose por una alta ruralidad y dispersión poblacional.

En conjunto, estos cantones albergan aproximadamente 130.000 habitantes, generando entre 100 y 110 toneladas diarias de residuos sólidos, lo que representa una presión significativa sobre el sistema de gestión existente (INEC, 2022).

Actualmente, el sistema presenta limitaciones como cobertura incompleta en zonas rurales, ausencia de separación en la fuente y escasa infraestructura para reciclaje, lo que incrementa la dependencia del relleno sanitario y, por ende, la generación de lixiviados (Tchobanoglous et al., 2015).

2.3 Precipitación

La precipitación es uno de los factores más influyentes en la generación de lixiviados, ya que el agua de lluvia se infiltra en los residuos sólidos, aumentando el volumen de líquidos contaminados. En la mancomunidad, la precipitación varía entre 500 y 1.000mm/año

dependiendo del cantón, con una marcada estacionalidad que incrementa la producción de lixiviados durante ciertos periodos (INAMHI, 2020).

Este aumento puede alcanzar entre un 30% y 60% en épocas lluviosas, generando impactos ambientales como la contaminación de suelos y aguas subterráneas, efectos económicos relacionados con el incremento de costos operativos y riesgos sociales asociados a la salud pública (Tchobanoglous et al., 2015).

2.4 Participación comunitaria y su influencia en la generación de lixiviados

La participación comunitaria se convierte en un elemento clave para la sostenibilidad del sistema, ya que la educación ambiental, la separación en la fuente y la corresponsabilidad social contribuyen a reducir la carga contaminante y mejorar la eficiencia del tratamiento (UNEP, 2019).

2.5 Funcionamiento y estado actual de la planta de tratamiento de lixiviados

La planta de tratamiento de lixiviados de la mancomunidad opera mediante un sistema convencional compuesto por varias etapas que permiten la reducción progresiva de contaminantes. El proceso inicia con un tanque de homogenización que regula el caudal y la concentración del lixiviado, seguido de un sedimentador de doble cámara para la remoción de sólidos suspendidos mediante procesos físicos.

Posteriormente, el lixiviado pasa a un filtro anaerobio de flujo ascendente, donde microorganismos degradan la materia orgánica, y finalmente es conducido a lagunas de oxidación y evaporación para su estabilización final (GACEMMA-EP, 2023). Este sistema funciona principalmente por gravedad y presenta una eficiencia aproximada del 83%; sin

embargo, su estado actual evidencia limitaciones como infraestructura obsoleta, deficiencias en mantenimiento, ausencia de monitoreo continuo y baja eficiencia en la remoción de contaminantes, lo que dificulta el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

2.6 Optimización del sistema de tratamiento de lixiviados

La optimización del sistema de tratamiento de lixiviados se plantea como una estrategia fundamental para mejorar su eficiencia y garantizar el cumplimiento de la normativa ambiental. Este proceso implica la mejora del diseño hidráulico, el fortalecimiento de la operación y mantenimiento, y la incorporación de tecnologías más eficientes que integren procesos físicos, químicos y biológicos.

En este sentido, los sistemas híbridos han demostrado ser altamente efectivos, alcanzando eficiencias superiores al 90% en la remoción de contaminantes, al combinar diferentes tecnologías de tratamiento (Zhang et al., 2021). Además, desde un enfoque integral, la optimización busca reducir costos operativos, minimizar impactos ambientales y mejorar la calidad de vida de las poblaciones cercanas, promoviendo un sistema sostenible a largo plazo (Renou et al., 2015).

2.7 Marco normativo:

Acuerdo Ministerial 097-A y Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-ISO 5667-10:2024

El tratamiento de lixiviados en el Ecuador se encuentra regulado por el Acuerdo Ministerial 097-A, el cual establece los límites máximos permisibles para la descarga de efluentes al ambiente. Entre los parámetros más relevantes se encuentran la Demanda

Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el nitrógeno amoniacal, con límites de 100 mg/L, 250 mg/L y 10 mg/L respectivamente (MAE, 2015).

Estos parámetros constituyen indicadores clave de la contaminación orgánica y deben ser controlados rigurosamente para proteger los recursos hídricos y evitar impactos ambientales negativos. En este sentido, cualquier propuesta de optimización de la planta debe enfocarse principalmente en la reducción de estos contaminantes para asegurar el cumplimiento de la normativa.

Para garantizar la representatividad y confiabilidad de los resultados obtenidos durante la caracterización del lixiviado, la toma de muestras en los puntos de entrada (afluente) y salida (efluente) de la planta de tratamiento se realizó considerando la normativa ecuatoriana vigente aplicable al muestreo de aguas residuales.

En este contexto, se tomó como referencia la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-ISO 5667-10:2024, Calidad del agua – Muestreo – Parte 10: Guía para el muestreo de aguas residuales, la cual establece los criterios técnicos para la planificación de campañas de muestreo, selección de puntos de monitoreo, recolección, preservación, almacenamiento y transporte de muestras de aguas residuales. Esta norma permite asegurar que las muestras obtenidas sean representativas de las condiciones reales del sistema de tratamiento.

De manera complementaria, se consideró la NTE INEN 2176:2013, Agua. Calidad del agua. Muestreo. Técnicas de muestreo, que proporciona lineamientos generales sobre los procedimientos de muestreo, tipos de muestras, manejo de recipientes, conservación y control de calidad durante la recolección de muestras ambientales.

Para la presente investigación, estas normas fueron aplicadas en la selección de los puntos de muestreo ubicados en el afluente y efluente de la planta de tratamiento de lixiviados de la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote, permitiendo evaluar la calidad del

lixiviado antes y después del tratamiento y determinar la eficiencia de remoción de contaminantes del sistema.

2.8 Análisis físicos y químicos de los lixiviados

Los análisis físicos y químicos del lixiviado son fundamentales para evaluar la calidad del efluente y la eficiencia del sistema de tratamiento. Los análisis físicos permiten determinar parámetros como temperatura, color, turbidez y sólidos suspendidos, los cuales proporcionan información sobre las características generales del lixiviado.

Por su parte, los análisis químicos permiten cuantificar la concentración de contaminantes mediante parámetros como pH, DBO₅, DQO, nitrógeno amoniacal y metales pesados, que son indicadores clave del nivel de contaminación (Kjeldsen et al., 2016). En la presente investigación, estos análisis serán utilizados para diagnosticar el estado actual de la planta, evaluar su eficiencia y establecer las bases técnicas para su optimización, teniendo como criterio principal el cumplimiento de los límites establecidos en la normativa ambiental vigente.

2.9 Técnica de “connected papers” en investigaciones ambientales

La técnica de “connected papers” se define como un enfoque metodológico basado en la revisión, análisis crítico e integración de estudios científicos previos, con el propósito de relacionar sus resultados, metodologías y conclusiones para aplicarlos a un contexto específico de investigación. Esta técnica permite construir conocimiento a partir de evidencia existente, facilitando la identificación de soluciones óptimas y adaptables a problemáticas reales (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

En el ámbito de la ingeniería ambiental, la *connected papers* no se limita a la recopilación de información, sino que implica un proceso analítico en el cual se comparan diferentes tecnologías, se evalúan sus resultados y se seleccionan aquellas que presentan mayor viabilidad técnica, económica, ambiental y social. Este enfoque es fundamental en estudios relacionados con el tratamiento de lixiviados, debido a la complejidad de su composición y la necesidad de aplicar soluciones integrales (Renou et al., 2015).

La aplicación de esta técnica en la presente investigación permite relacionar estudios científicos sobre sistemas de tratamiento de lixiviados, tales como reactores anaerobios, humedales construidos y sistemas combinados, con el objetivo de identificar alternativas que puedan ser implementadas en la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote.

2.10 Variable técnica

La variable técnica se refiere a la capacidad de una tecnología o sistema para cumplir con los objetivos de tratamiento de lixiviados, considerando su eficiencia, funcionamiento y adaptabilidad.

Entre los principales indicadores técnicos se encuentran:

- Eficiencia de remoción de contaminantes (DBO₅, DQO, nutrientes, metales pesados)
- Tipo de tecnología empleada (biológica, físico-química o combinada)
- Condiciones operativas (tiempo de retención hidráulica, carga orgánica)
- Facilidad de operación y mantenimiento
- Adaptabilidad a condiciones locales

Diversos estudios evidencian que los sistemas combinados presentan mayores eficiencias de remoción, alcanzando valores superiores al 90% en condiciones óptimas

(Zhang et al., 2021). Por lo tanto, la variable técnica permite seleccionar tecnologías que garanticen un adecuado desempeño del sistema de tratamiento.

2.11 Variable ambiental

La variable ambiental evalúa los impactos que genera el sistema de tratamiento sobre el entorno natural, así como su capacidad para prevenir la contaminación.

Los principales indicadores ambientales incluyen:

- Cumplimiento de la normativa ambiental vigente
- Reducción de carga contaminante en efluentes
- Protección de recursos hídricos y suelo
- Generación de subproductos o residuos secundarios
- Emisiones asociadas al proceso

El tratamiento adecuado de lixiviados es fundamental para evitar la contaminación de cuerpos de agua y suelos, debido a la alta carga de compuestos orgánicos y sustancias tóxicas presentes en estos líquidos (Kjeldsen et al., 2016). En este sentido, la variable ambiental permite priorizar tecnologías que minimicen impactos negativos y garanticen la sostenibilidad del sistema.

2.12 Variable social

La variable social considera la interacción entre el sistema de tratamiento y la comunidad, evaluando aspectos relacionados con la aceptación social, la salud pública y la participación comunitaria.

Los principales indicadores sociales incluyen:

- Aceptación de la tecnología por parte de la comunidad
- Impacto en la salud pública
- Generación de empleo local
- Facilidad de operación por personal no especializado
- Nivel de participación comunitaria

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2019), la participación comunitaria es un factor clave para la sostenibilidad de los sistemas de gestión de residuos, ya que fortalece la operación, el mantenimiento y la vigilancia del sistema.

2.13 Integración de variables en la connected papers

La técnica de connected papers permite integrar las variables técnica, ambiental y social para la selección de alternativas óptimas de tratamiento de lixiviados. Este enfoque multidimensional facilita la identificación de tecnologías que no solo sean eficientes desde el punto de vista técnico, sino que también sean económicamente viables, ambientalmente sostenibles y socialmente aceptables.

En este contexto, la presente investigación utiliza la connected papers como una herramienta para analizar estudios científicos y adaptar sus resultados a la realidad de la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote, permitiendo proponer soluciones integrales que respondan a las necesidades del sistema de tratamiento de lixiviados.

CAPÍTULO III. METODOLOGIA.

3.1 Enfoque metodológico

La presente investigación adopta un enfoque aplicado, cuantitativo, descriptivo y propositivo, orientado a evaluar el funcionamiento de la planta de tratamiento de lixiviados y proponer alternativas de optimización basadas en evidencia técnica.

El enfoque cuantitativo permitió analizar los parámetros físico-químicos del lixiviado, mientras que el enfoque descriptivo facilita la caracterización del sistema existente. El enfoque propositivo permite plantear soluciones técnicas viables para mejorar el sistema (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

3.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es **no experimental**, ya que no se manipulan las variables de estudio, sino que se analizan en su estado actual. Asimismo, es de tipo **transversal**, debido a que la información se recopila en un periodo determinado de tiempo.

El estudio se desarrolla mediante:

- Observación directa de la planta de tratamiento
- Análisis de resultados de laboratorio
- Revisión bibliográfica de estudios científicos
- Evaluación técnica, económica y ambiental

3.3 Desarrollo metodológico en función de los objetivos específicos

3.3.1 Objetivo específico 1: Evaluar la planta de tratamiento de lixiviados existente de la mancomunidad Colta, Alausí, Guamote

Para el cumplimiento de este objetivo se realizó una evaluación integral de la planta de tratamiento de lixiviados mediante la recopilación y análisis de información primaria y secundaria. Inicialmente, se revisó la documentación técnica proporcionada por la empresa administradora, incluyendo informes de funcionamiento y calidad de agua, documentos de cierre técnico de los cantones Colta, Alausí y Guamote, estudios y diseños definitivos para la gestión integral de residuos sólidos, así como los planos constructivos de la planta. Esta información permitió conocer las características de diseño, capacidad operativa y condiciones de funcionamiento del sistema.

Posteriormente, se efectuó una visita técnica de campo durante la segunda semana de febrero, período en el cual no se registraron precipitaciones que pudieran alterar las características del lixiviado. Durante la inspección se identificaron y evaluaron los procesos unitarios que conforman la planta de tratamiento, los cuales incluyen: tanque de homogenización, filtro sedimentador de doble cámara, filtro anaerobio de flujo ascendente y laguna de maduración y evaporación. Además, se verificó el estado físico de la infraestructura, el funcionamiento hidráulico por gravedad, la acumulación de lodos, las condiciones de operación y mantenimiento, así como la capacidad de tratamiento de cada unidad.

Como parte de la caracterización del sistema, se realizaron muestreos de lixiviado en dos puntos estratégicos de la planta. El primer punto correspondió al afluente o entrada del sistema, ubicado antes del ingreso al tanque de homogenización, con el propósito de determinar la carga contaminante inicial del lixiviado. El segundo punto se ubicó en el

efluente o salida final de la planta, después de la última unidad de tratamiento, con la finalidad de evaluar la calidad del lixiviado tratado y determinar la eficiencia global del sistema.

La toma de muestras de lixiviado se realizó en los puntos de entrada y salida de la planta de tratamiento, con el fin de evaluar la calidad del afluente y efluente y determinar la eficiencia de remoción de contaminantes del sistema. El procedimiento de muestreo se ejecutó de acuerdo con los lineamientos establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-ISO 5667-10:2024, Calidad del agua – Muestreo – Parte 10: Guía para el muestreo de aguas residuales, complementada con la NTE INEN 2176:2013, Agua. Calidad del agua. Muestreo.

Técnicas de muestreo, las cuales establecen los criterios para la selección de puntos de muestreo, recolección, preservación, transporte y aseguramiento de la representatividad de las muestras. Posteriormente, los resultados analíticos fueron comparados con los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental ecuatoriana vigente para descargas de efluentes.

3.3.2 Análisis Fisicoquímicos de Lixiviados

En el marco de la evaluación y optimización de la planta de tratamiento de lixiviados de la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote, la caracterización del efluente se realizó mediante análisis fisicoquímicos estandarizados. Los procedimientos analíticos se fundamentaron en los lineamientos del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF).

3.3.3 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO se determinó empleando el Método 5220 D, utilizando el rango de bajo a medio (50 a 1000 mg/L). Las muestras de lixiviado fueron sometidas a oxidación con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en un medio fuertemente ácido, utilizando sulfato de plata (Ag_2SO_4) como catalizador y sulfato de mercurio ($HgSO_4$) para acomplejar y mitigar las interferencias por cloruros. La digestión térmica se ejecutó a 150 °C durante dos horas en un termoreactor Merck EI27, procediendo posteriormente a la cuantificación colorimétrica del ion crómico producido (Cr^{3+}) a través de un espectrofotómetro HACH DR 5000 EI02.

3.3.4 Parámetros Complementarios

La cuantificación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) y Fósforo Total se rigió por los fundamentos de los métodos estandarizados 5210 B, 2540 D, 4500-N B y 4500-P E, respectivamente.

3.3.5 Fundamento del método

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) se evaluó como una medida del equivalente de oxígeno de la materia orgánica presente en la muestra de lixiviado, la cual es susceptible a la oxidación por un oxidante químico fuerte. El principio analítico (Método 5220 D de la 23ª edición del Standard Methods) consistió en calentar la muestra durante dos horas con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$). Durante este proceso, los compuestos orgánicos oxidables redujeron el ion dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$) a ion crómico (Cr^{3+}). La concentración se determinó mediante método colorimétrico.

Debido a la naturaleza de los lixiviados, los compuestos alifáticos de cadena lineal volátiles presentan resistencia a la oxidación. Para contrarrestar esto, se añadió sulfato de plata (Ag_2SO_4) como agente catalizador. Adicionalmente, para evitar la interferencia y

oxidación parcial generada por los haluros (cloruros, bromuros y yoduros), se incorporó sulfato de mercurio ($HgSO_4$) previo al reflujo para la formación de complejos, manteniendo una proporción estricta de 10:1 de $HgSO_4:Cl^-$ en muestras con concentraciones de cloruros inferiores a 2000 mg/L.

Equipos e Instrumentos

Los análisis se ejecutaron con el siguiente equipamiento del laboratorio: Espectrofotómetro HACH DR 5000 EI02, reactor de DQO MERCK EI27, balanza analítica SARTORIUS EI04, tubos de cultivo HACH para digestión, material volumétrico de vidrio Clase A.

Reactivos

Se utilizaron reactivos premezclados en tubos de cultivo HACH. Como método alternativo de preparación en laboratorio, las soluciones emplearon ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) dicromato de potasio estándar primario ($K_2Cr_2O_7$) secado a 150 °C, y ftalato de hidrógeno de potasio ($C_8H_5KO_4$) para los patrones de calibración. El agua destilada utilizada mantuvo un pH entre 6.0 y 7.0 y una conductividad eléctrica de 5 $\mu S/cm$.

Procedimiento

Preparación: La muestra de lixiviado, preservada a $pH < 2$ y refrigerada a 4 °C, se homogeneizó manualmente durante 30 segundos. Se procedió a realizar la dilución correspondiente para ajustarse al rango de lectura del equipo.

Digestión: Se dosificaron 2.00 mL de la muestra en un tubo de digestión de DQO inclinado a 45 grados. Se invirtió suavemente para mezclar y se colocó en el reactor termoeléctrico precalentado a 150 °C durante exactamente 2 horas, en conjunto con un blanco de agua destilada y un estándar de 100 mg/L.

Cuantificación: Tras el enfriamiento progresivo de los tubos a temperatura ambiente, las lecturas se realizaron en el espectrofotómetro HACH ingresando el programa 430. El equipo fue encerado con el blanco y la absorbancia de la muestra arrojó el resultado directo en mg/L de DQO.

3.3.6 Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)

De acuerdo con el Método 5210 B, la DBO5 determina la cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la degradación aerobia de la materia orgánica carbonácea en el lixiviado. La cuantificación se basa en medir la diferencia de oxígeno disuelto inicial y final de la muestra, tras un periodo de incubación en oscuridad de 5 días a una temperatura controlada de 20 °C.

3.3.7 Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Con base en el Método 2540 D, los SST representan la porción de sólidos retenidos por un filtro de fibra de vidrio de porosidad estándar. Una alícuota de la muestra se filtra al vacío, y el residuo retenido en el filtro se seca en una estufa a temperatura constante entre 103 °C y 105 °C hasta alcanzar un peso constante. El incremento de peso en el filtro representa los sólidos suspendidos totales.

3.3.8 Determinación de Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)

Basado en el Método 4500-N B, el NTK cuantifica la suma del nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal libre. El método comprende una fase de digestión térmica donde el nitrógeno orgánico se convierte en amonio mediante el uso de ácido sulfúrico y un catalizador metálico. Posteriormente, el medio se alcaliniza y el amoníaco se destila, para finalmente ser cuantificado mediante titulación volumétrica.

3.3.9 Determinación de Fósforo Total

Siguiendo el Método 4500-P E, la determinación requiere la oxidación y conversión previa de todas las formas de fósforo presentes (polifosfatos y fósforo orgánico) a ortofosfatos reactivos mediante una digestión vigorosa. Tras la digestión, los ortofosfatos reaccionan con molibdato de amonio y tartrato de antimonio y potasio en un medio ácido, formando un complejo que es reducido por el ácido ascórbico para producir un color azul intenso de molibdeno, el cual es medido espectrofotométrica o colorimétricamente.

Ilustración 2. Diseño planta actual



Nota: Se identifican los puntos de muestreo correspondientes al afluente (entrada) y efluente (salida) utilizados para la caracterización físico-química del lixiviado y la evaluación de la eficiencia del sistema de tratamiento.

3.4 Objetivo específico 2: Generar alternativas de mejora para la optimización de la planta de tratamiento de lixiviados

En función de la información recopilada y analizada, se procede a la identificación de las principales problemáticas del sistema, considerando tanto aspectos técnicos como operativos, lo que permite establecer las bases para la formulación de alternativas de mejora. Para ello, se apoya en la aplicación de herramientas como Connected Papers, mediante la cual se analizan estudios científicos relevantes que abordan tecnologías de tratamiento de lixiviados, permitiendo identificar soluciones viables y adaptables al contexto de la mancomunidad.

La herramienta connected papers, es una plataforma de análisis bibliométrico basada en inteligencia artificial que permite explorar visualmente la relación entre publicaciones científicas a partir de sus patrones de citación y co-citación.

Connected Papers funciona mediante algoritmos que analizan bases de datos científicas indexadas y generan una red gráfica de artículos relacionados con un documento de referencia o artículo semilla. La herramienta no establece conexiones únicamente por citaciones directas, sino que identifica similitudes temáticas entre investigaciones mediante el análisis de referencias compartidas y coincidencias bibliográficas. Esto permite localizar estudios relevantes, identificar tendencias de investigación, reconocer trabajos fundamentales en un área específica y descubrir publicaciones recientes asociadas a una determinada línea de estudio. (Donthu et al., 2021; Zupic & Čater, 2015).

Para la presente investigación, se seleccionaron como artículos semilla publicaciones científicas relacionadas con el tratamiento y optimización de lixiviados de rellenos sanitarios, procesos biológicos anaerobios, humedales construidos, reactores

UASB y tecnologías complementarias para la remoción de materia orgánica y nutrientes. A partir de estos documentos iniciales, la herramienta generó redes de investigación que facilitaron la identificación de literatura científica relevante para el desarrollo de la propuesta de optimización.

Los criterios de selección de los artículos científicos incluyeron:

- Publicaciones indexadas en bases de datos científicas reconocidas (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink y MDPI).
- Estudios publicados preferentemente entre los años 2019 y 2025, con el fin de garantizar la actualidad de la información.
- Investigaciones relacionadas con el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios.
- Artículos que reportaran eficiencias de remoción de parámetros como DBO₅, DQO, nitrógeno total y fósforo.
- Estudios que evaluaran tecnologías biológicas, físico-químicas o sistemas híbridos aplicables a contextos similares al área de estudio.
- Investigaciones que presentaran resultados experimentales, operativos o de diseño susceptibles de adaptación a la planta evaluada.

La utilización de Connected Papers permitió desarrollar una revisión bibliográfica estructurada y sistemática, facilitando la identificación de tecnologías con evidencia científica comprobada y reduciendo el riesgo de omitir investigaciones relevantes. Asimismo, posibilitó comparar diferentes alternativas de tratamiento utilizadas a nivel internacional, analizar sus ventajas, limitaciones y condiciones de aplicación, y establecer criterios técnicos para la selección de la propuesta de optimización más adecuada.

La información obtenida mediante esta herramienta constituyó un insumo fundamental para el cumplimiento del segundo objetivo específico de la investigación, ya que permitió sustentar técnicamente la propuesta de rediseño de la planta de tratamiento de lixiviados mediante evidencia científica actualizada. Además, contribuyó a la identificación de tecnologías viables desde los puntos de vista técnico, económico y ambiental, fortaleciendo la rigurosidad metodológica del estudio y garantizando que las alternativas planteadas estuvieran respaldadas por investigaciones científicas reconocidas.

A partir de este análisis, se plantean posibles alternativas de optimización que pueden incluir la mejora de los procesos unitarios existentes, la incorporación de tecnologías complementarias o el rediseño parcial del sistema, dependiendo de las condiciones identificadas. Estas alternativas son evaluadas de manera integral considerando criterios técnicos, económicos y ambientales. Desde el punto de vista técnico, se analiza la eficiencia de remoción de contaminantes y la adaptabilidad de la tecnología al contexto local; desde el enfoque económico, se consideran los costos de inversión, operación y mantenimiento; y desde el enfoque ambiental, se evalúa la reducción de impactos y el cumplimiento de la normativa vigente (UNEP, 2019).

3.5 Métodos de cálculo y análisis de resultados

Con el propósito de evaluar la eficiencia de la planta de tratamiento de lixiviados de la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote, se aplicaron métodos de análisis físico-químicos y cálculos técnicos que permitieron interpretar el comportamiento del sistema de tratamiento existente. Para ello, se utilizaron fórmulas relacionadas con la eficiencia de remoción de contaminantes, caudal, tiempo de retención hidráulica y dimensionamiento preliminar de las unidades propuestas para el rediseño de la planta.

3.5.1 Eficiencia de remoción

La eficiencia de remoción permitió determinar el porcentaje de reducción de contaminantes entre el afluente y efluente de la planta de tratamiento.

(Ec 1)

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{C_e - C_s}{C_e} \times 100$$

Donde:

C_e= concentración de entrada del contaminante (mg/L)

C_s= concentración de salida del contaminante (mg/L)

Esta fórmula se aplicó para los parámetros DBO₅, DQO, SST, nitrógeno y fósforo.

3.5.2 Cálculo del caudal

El caudal generado de lixiviado se determinó mediante la relación entre volumen y tiempo.

(Ec 2)

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

Q= Caudal

V= volumen

T= tiempo

3.5.3 Tiempo de retención hidráulica

Para estimar el tiempo de permanencia del lixiviado dentro de las unidades de tratamiento se utilizó la siguiente expresión:

(Ec 3)

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Donde:

TRH= tiempo de retención hidráulica

V= volumen de la unidad

Q= caudal

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluar la planta de tratamiento de lixiviados existente de la mancomunidad Colta, Alausí, Guamote”

Para el cumplimiento de este objetivo, se realizó una evaluación integral de la planta de tratamiento de lixiviados, basada en la recopilación de información primaria y secundaria.

4.1.1 Recolección de información primaria

La información primaria se obtuvo mediante una visita técnica a la planta de tratamiento de lixiviados, la cual se llevó a cabo durante la segunda semana del mes de febrero. Durante esta visita se realizó una inspección directa de las instalaciones, con el objetivo de observar el funcionamiento de los procesos unitarios, las condiciones operativas y el estado de la infraestructura.

En esta fase se identificaron los siguientes componentes del sistema:

- Tanque de homogenización
- Filtro sedimentador
- Filtro anaerobio
- Lagunas de oxidación

Además, se evaluaron aspectos como:

- Condiciones físicas de las estructuras
- Flujo del sistema (por gravedad)
- Presencia de lodos y acumulación de sólidos
- Uso de productos químicos en el tratamiento

Durante la misma visita, se realizó el muestreo de lixiviados en los puntos de entrada y salida de la planta, con el fin de determinar la eficiencia del sistema. Las muestras fueron recolectadas siguiendo criterios técnicos para garantizar su representatividad.

4.1.2 Análisis de laboratorio

Con el propósito de actualizar la información técnica de los procesos unitarios de la planta, se realizaron análisis físico-químicos de muestras de lixiviado tomadas en la entrada y salida del sistema de tratamiento. Los análisis permitieron determinar parámetros relacionados con materia orgánica, nutrientes y sólidos suspendidos.

Los resultados obtenidos evidenciaron concentraciones elevadas de DBO₅, DQO y sólidos suspendidos en el afluente, indicando una alta carga contaminante del lixiviado generado en la mancomunidad. Asimismo, al comparar los resultados de entrada y salida se determinó que la planta presenta una eficiencia moderada en la remoción de materia orgánica; sin embargo, la eliminación de nutrientes como nitrógeno y fósforo continúa siendo limitada.

Tabla 1. Análisis de laboratorio

Parámetros	Entrada	Salida
DBO5	2116 mgo2/l	905 mgo2/l
DQO	4275 mg/l	1850 mg/l
Sólidos Suspendidos	1790 mg/l	400 mg/l
Fósforo	$0.19 \cdot 100 = 19$ mg/l	$0.06 \cdot 250 = 15$ mg/l
Nitrógeno	95,2 mg/l	81,7 mg/l

Nota: Análisis de laboratorio realizado en el Laboratorio de Servicios Ambientales en el Unach, muestreo de los puntos de entrada y salida de la planta de tratamiento de lixiviados. Elaboración propia.

4.1.3 Análisis de eficiencia del sistema

A partir de los resultados obtenidos, se calcularon las eficiencias de remoción:

- DBO₅: 57,2%
- DQO: 56,7%
- Sólidos suspendidos: 77,7%
- Fósforo: 21,0%
- Nitrógeno: 14,2%

Estos resultados evidencian que:

- El sistema presenta mejor desempeño en la remoción de sólidos suspendidos
- La remoción de materia orgánica (DBO₅ y DQO) es moderada
- La eliminación de nutrientes (N y P) es baja

La aplicación de la fórmula de eficiencia de remoción permitió identificar que el sistema actual no alcanza porcentajes óptimos de depuración para algunos parámetros, especialmente aquellos relacionados con nutrientes y compuestos recalcitrantes.

Estos resultados evidencian que el tratamiento existente requiere procesos complementarios capaces de mejorar la calidad del efluente y reducir el impacto ambiental generado por la descarga de lixiviados.

Los análisis de laboratorio permitieron identificar que la planta presenta una eficiencia limitada frente a la carga contaminante actual del lixiviado, evidenciando la necesidad de incorporar nuevas unidades de tratamiento que permitan mejorar la remoción de materia orgánica y nutrientes.

4.2 Resultados del objetivo específico

4.2.1 “Generar alternativas de mejora para la optimización de la planta de tratamiento de lixiviados para la mancomunidad Colta, Alausí, Guamate”

Se empleó la herramienta Conect Papers como estrategia de revisión bibliográfica, la cual permite establecer conexiones entre investigaciones científicas relevantes sobre el tratamiento de lixiviados. A partir de esta herramienta, se realiza la búsqueda y análisis de tesis desarrolladas en diferentes provincias del Ecuador, lo que facilita la comparación de tecnologías, metodologías y resultados aplicados en contextos similares.

Este proceso permite identificar si la planta requiere un rediseño completo o si es posible realizar modificaciones parciales que mejoren su eficiencia, apoyándose en evidencia científica y experiencias previas. Según Tchobanoglous et al. (2015), la integración de información técnica y científica es clave para la actualización y mejora de sistemas de tratamiento de residuos líquidos.

4.2.2 Análisis y selección de la alternativa de tratamiento

Tabla 2 Tesis de Enfoque Técnico

N°	Autor	Tema de la tesis	Universidad	Lugar	Procesos principales
1	López Torres, E.	Diseño de planta de tratamiento de lixiviados	UEA	Pastaza	Filtros anaerobios y aerobios
2	Cisneros, M. y Rodríguez, J.	Diseño de planta de lixiviados del relleno sanitario	UTPL	Loja	Lagunas + tratamiento físico- químico
3	Rivadeneira, L.	Análisis del funcionamiento del sistema El Inga	USFQ	Quito	Lagunas de estabilización
4	Ortiz, P.	Tratamiento de lixiviados mediante fotocatálisis	USFQ	Quito	Oxidación avanzada (TiO ₂ /UV)
5	Coral, K.	Tratamiento de lixiviados por oxidación química	UISEK	Santo Domingo	Oxidación química (Peróxido de calcio)

6	Falcón, J.	Simulación de filtros anaerobios y aerobios	UTA	Ambato	UASB + filtro percolador
7	Guevara, A.	Diseño de sistema de tratamiento de lixiviados El Inga	EPN	Quito	Electrocoagulación + humedales
8	De la Torre, E.	Diseño de humedales artificiales para lixiviados	EPN	Quito	Humedales (fitorremediación)
9	Andrade, V.	Producción de biogás mediante tratamiento de lixiviados	UTA	Ambato	Biodigestores anaerobios
10	Pesántes, L.	Evaluación de laguna aerobia piloto	EPN	Pichincha	Laguna aerobia

Nota: Revisión bibliográfica mediante la herramienta Connect Papers y repositorios universitarios del Ecuador. Elaboración propia.

Tabla 3. Tesis de Enfoque Ambiental

N°	Autor	Tema de la tesis	Universidad	Lugar	Procesos principales
1	Duque, C.	Uso de melaza y bacterias para tratamiento de lixiviados	UTE	Machachi	Biodegradación anaerobia
2	Cunalata, R.	Microorganismos eficientes en tratamiento de lixiviados	UTE	La Concordia	Tratamiento biológico con EM
3	Rivadeneira, L.	Caracterización ambiental de lixiviados del relleno	USFQ	Quito	Evaluación de impacto ambiental
4	Ortiz, P.	Fotocatálisis aplicada a lixiviados	USFQ	Quito	Oxidación avanzada (TiO ₂ /UV)
5	Pesántes, L.	Tratamiento de lixiviados en botadero controlado	EPN	Pichincha	Laguna aerobia

6	Andrade, V.	Biogás y reducción de contaminación en lixiviados	UTA	Ambato	Biodigestores anaerobios
7	Coral, K.	Reducción de carga contaminante de lixiviados	UISEK	Santo Domingo	Oxidación química
8	Guevara, A.	Evaluación ambiental de electrocoagulación	EPN	Quito	Electrocoagulación
9	De la Torre, E.	Adsorción con carbón activado en lixiviados	EPN	Quito	Adsorción
10	Falcón, J.	Impacto ambiental de sistemas de tratamiento	UTA	Ambato	Modelación ambiental

Nota: Revisión bibliográfica mediante la herramienta Connect Papers y repositorios universitarios del Ecuador.

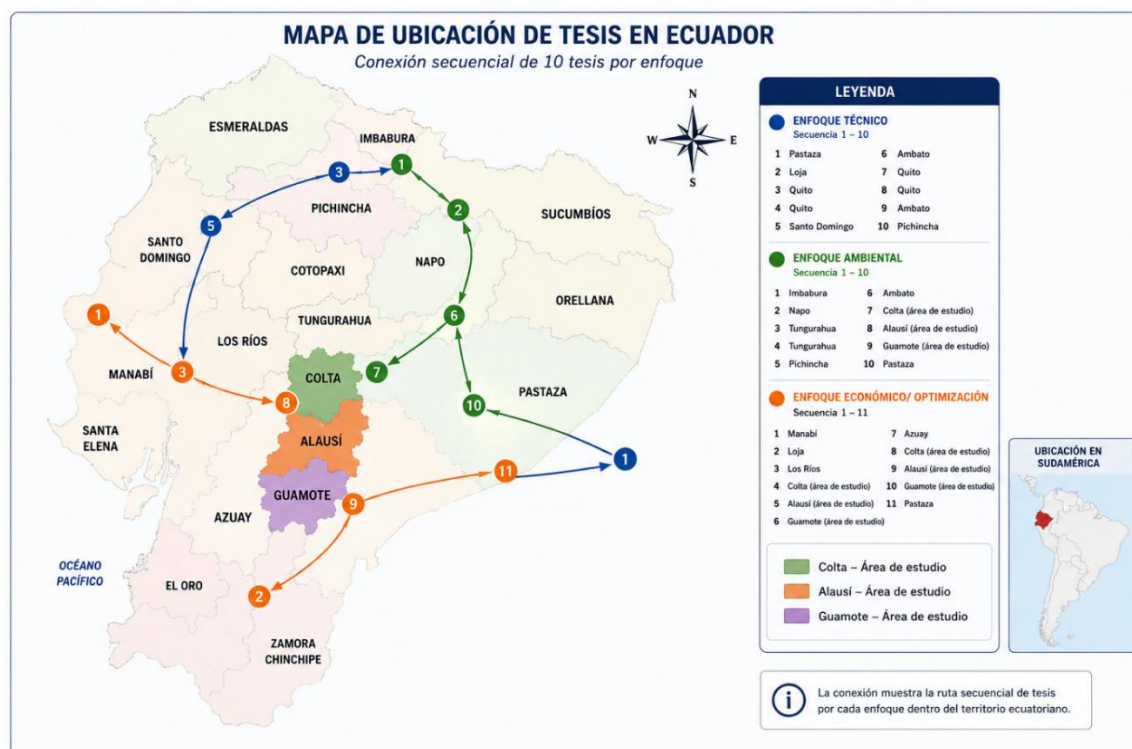
Tabla 4. Tesis de Enfoque Económico

N°	Autor	Tema de la tesis	Universidad	Lugar	Aporte económico
1	López Torres, E.	Diseño optimizado de planta de tratamiento	UEA	Pastaza	Optimización de recursos
2	Cisneros, M. y Rodríguez, J.	Diseño de planta financiada por GAD Loja	UTPL	Loja	Reducción de costos
3	Rivadeneira, L.	Evaluación económica del sistema existente	USFQ	Quito	Optimización operativa
4	Coral, K.	Oxidación química eficiente y económica	UISEK	Santo Domingo	Minimización de carga tratada
5	Duque, C.	Solución biológica de bajo costo para lixiviados	UTE	Machachi	Alternativa económica
6	Cunalata, R.	Uso de microorganismos para bajo costo operativo	UTE	La Concordia	Bajo costo operativo

7	Guevara, A.	Electrocoagulación optimizada en costos	EPN	Quito	Reducción de reactivos
8	De la Torre, E.	Humedales artificiales y carbón activado	EPN	Quito	Sistema sostenible y económico
9	Andrade, V.	Producción energética con biogás de lixiviados	UTA	Ambato	Aprovechamiento energético
10	Falcón, J.	Simulación computacional para optimización	UTA	Ambato	Optimización hidráulica

Nota: Revisión bibliográfica mediante la herramienta Connect Papers y repositorios universitarios del Ecuador.

Ilustración 3. Mapa de ubicación de tesis en Ecuador



Nota: mediante una revisión bibliográfica y la herramienta connect papers, se realizó una selección de alternativas eficaces para aplicarlas en la optimización de la planta de tratamiento de lixiviados.

A partir de la revisión de diversas investigaciones desarrolladas en el Ecuador sobre el tratamiento de lixiviados, se realizó un análisis comparativo considerando tres enfoques principales: técnico, ambiental y económico. Este análisis permitió identificar las tecnologías más utilizadas a nivel nacional, entre las cuales destacan los sistemas biológicos, físico-químicos y combinados.

Los sistemas biológicos, como las lagunas anaerobias y facultativas, constituyen la alternativa más empleada en el país debido a su bajo costo de implementación y operación, así como su alta adaptabilidad a condiciones rurales. Estos sistemas permiten una adecuada remoción de materia orgánica, expresada en términos de DBO y DQO; sin embargo, presentan limitaciones en la eliminación de compuestos recalcitrantes y metales pesados

(von Sperling, 2007). En el caso de los lixiviados, estos contaminantes suelen estar presentes en concentraciones elevadas, lo que reduce la eficiencia global de este tipo de tratamiento (Townsend et al., 2015).

Por otro lado, los tratamientos físico-químicos, como la coagulación-floculación y los procesos de oxidación avanzada, presentan una alta eficiencia en la remoción de contaminantes complejos, incluyendo metales pesados y compuestos no biodegradables. No obstante, su aplicación en el contexto ecuatoriano es limitada debido a los altos costos operativos y la necesidad de personal técnico especializado (Edzwald, 2011).

En función de estas limitaciones, los sistemas combinados surgen como una alternativa óptima, ya que integran procesos biológicos y físico-químicos, permitiendo aprovechar las ventajas de ambos. Este tipo de sistemas logra una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes sin incrementar significativamente los costos operativos, lo cual es especialmente relevante para contextos como el de la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote (Metcalf & Eddy, 2014).

Adicionalmente, estudios locales desarrollados en el Ecuador evidencian la aplicabilidad de estos sistemas en condiciones reales. Por ejemplo, investigaciones como las de López Torres (2018) y Cisneros y Rodríguez (2016) demuestran que los sistemas combinados permiten mejorar la eficiencia del tratamiento en rellenos sanitarios, mientras que Rivadeneira (2017) evidencia la importancia de optimizar las unidades existentes para mejorar el desempeño global del sistema.

Con base en este análisis, se seleccionó como alternativa óptima un sistema combinado optimizado, el cual incorpora un tratamiento biológico como proceso principal y un tratamiento físico-químico como etapa de pulimiento, garantizando así una mayor eficiencia global del sistema.

4.2.3 Propuesta del sistema de tratamiento optimizado

El sistema propuesto se estructura en varias etapas que permiten un tratamiento progresivo del lixiviado, iniciando con un pretratamiento para la remoción de sólidos gruesos, seguido de una homogenización del caudal y carga contaminante, un tratamiento biológico para la degradación de materia orgánica, un tratamiento físico-químico para la remoción de contaminantes persistentes y, finalmente, una etapa de pulimiento antes de la descarga.

El flujo del sistema inicia con el ingreso de lixiviados hacia una unidad de rejillas, donde se retienen sólidos gruesos que podrían afectar el funcionamiento de las unidades posteriores. Posteriormente, el flujo pasa a un desarenador, el cual permite la sedimentación de partículas pesadas. A continuación, el lixiviado ingresa a un tanque de homogenización, cuya función es estabilizar el caudal y la carga contaminante, evitando variaciones bruscas en el sistema.

Luego, el flujo es conducido hacia una laguna anaerobia, donde se produce la degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno, seguida de una laguna facultativa que permite una remoción adicional de DBO y DQO mediante procesos biológicos aerobios y anaerobios. Estas unidades constituyen el núcleo del tratamiento, ya que permiten reducir significativamente la carga orgánica del lixiviado, tal como lo describen von Sperling (2007) y Metcalf y Eddy (2014).

Posteriormente, el efluente pasa a una etapa de coagulación-floculación, en la cual se adicionan reactivos químicos para favorecer la aglomeración de partículas y la remoción de contaminantes disueltos. Este proceso es seguido por un sedimentador secundario, donde los flóculos formados son removidos por sedimentación. Finalmente, el efluente es conducido a un filtro de arena, que actúa como una etapa de pulimiento final antes de su descarga o

posible reúso, en concordancia con los principios de tratamiento descritos por Edzwald (2011).

4.2.4

Parámetros de diseño y cálculos hidráulicos

Para el dimensionamiento del sistema de tratamiento de lixiviados se consideraron los caudales característicos del sistema, estableciéndose un caudal de diseño de 1,14 L/s y un caudal medio de 0,29 L/s. Estos valores fueron convertidos a unidades de volumen diario, con el fin de facilitar los cálculos de dimensionamiento.

El caudal de diseño corresponde a 98,5 m³/día, mientras que el caudal medio equivale a 25,1 m³/día.

A partir de estos valores, se procedió al cálculo de los volúmenes de las diferentes unidades mediante la aplicación del tiempo de retención hidráulica (TRH), utilizando la siguiente expresión:

$$V=Q\times TRH$$

Donde:

V = volumen de la unidad (m³)

Q = caudal (m³/día)

TRH = tiempo de retención hidráulica (días)

4.2.5 Cálculo del tanque de homogenización

Se adoptó un tiempo de retención hidráulica de 1 día, obteniéndose:

$$V = 25,1 \text{ m}^3$$

Considerando un factor de seguridad, se establece un volumen de diseño de 30 a 40 m³.

4.2.6 Cálculo de la laguna anaerobia

Se consideró un TRH de 4 días:

$$V = 98,5 \times 4 = 394 \text{ m}^3$$

Se adopta un volumen de diseño de 400 m³.

4.2.7 Cálculo de la laguna facultativa

Se adoptó un TRH de 7 días:

$$V = 98,5 \times 7 = 689,5 \text{ m}^3$$

Se establece un volumen aproximado de 700 m³.

4.2.8 Cálculo del sedimentador secundario

Se utilizó el criterio de carga superficial:

$$A = \text{área (m}^2\text{)}$$

$$Q = \text{caudal (m}^3\text{/día)}$$

$$CS = \text{carga superficial (m}^3\text{/m}^2\cdot\text{día)}$$

Asumiendo una carga superficial de 25 m³/m²·día:

$$A = 98,5 / 25 = 3,94 \text{ m}^2$$

Se adopta un área de 4 m².

4.2.9 Cálculo del filtro de arena

Se consideró una velocidad de filtración de 5 m³/m²·h:

$$A = 4,1 / 5 = 0,82 \text{ m}^2$$

Se adopta un área de 1 m².

A partir de los resultados obtenidos en la evaluación técnica de la planta y de los análisis físico-químicos realizados al lixiviado, se desarrolló una propuesta de rediseño orientada a mejorar la eficiencia hidráulica, biológica y físico-química del sistema de tratamiento existente. La propuesta se fundamentó en las deficiencias identificadas durante el diagnóstico inicial y en los bajos porcentajes de remoción evidenciados en determinados parámetros analizados en laboratorio.

El rediseño de la planta contempla la incorporación de nuevas unidades de tratamiento y la optimización de los procesos existentes, permitiendo mejorar el funcionamiento integral del sistema y aumentar la capacidad de remoción de contaminantes. Entre las principales mejoras planteadas se encuentran la implementación de unidades de pretratamiento, reactor anaerobio optimizado, sedimentación secundaria, filtración y laguna de pulimento, procesos que permiten incrementar la estabilidad operativa y mejorar la calidad final del efluente.

Con la finalidad de evidenciar las mejoras alcanzadas mediante la propuesta planteada, se realizó una comparación técnica entre la planta actual y el sistema optimizado.

4.3 Comparativa entre la planta actual y el rediseño propuesto

Tabla 5. Comparativa entre la planta actual y el rediseño optimizado

Aspecto evaluado	Planta Actual	Planta Optimizado
Tipo de tratamiento	Sistema convencional básico	Sistema combinado optimizado
Pretratamiento	Limitado	Incorporación de rejillas y desarenador
Remoción de sólidos	Moderada	Alta eficiencia de separación
Remoción DBO5 y DQO	Eficiencia media	Mayor eficiencia biológica
Remoción de nitrógeno y fósforo	Baja	Mejora mediante procesos complementarios
Tratamiento terciario	No posee	Incluye filtración y pulimento
Control hidráulico	Limitado	Mejor distribución caudales
Producción de olores	Mayor generación	Reducción de olores y gases
Acumulación de lodos	Frecuente	Mejor manejo y estabilización
Riesgo de colmatación	Alto	Disminución del riesgo
Cumplimiento normativo	Parcial	Mayor probabilidad de cumplimiento
Operación del sistema	Menor estabilidad	Operación más eficiente
Impacto ambiental	Mayor riesgo de contaminación	Reducción del impacto ambiental

Nota: Evaluación técnica de la planta de tratamiento de lixiviados de la mancomunidad Colta, Alausí y Guamate. Elaboración propia

4.3.1 Comparación de eficiencias de remoción

Los análisis realizados evidenciaron que la planta actual presenta eficiencias moderadas en la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos, mientras que la propuesta optimizada permitiría incrementar considerablemente la eficiencia del sistema mediante la incorporación de procesos complementarios.

Tabla 6. Comparación de eficiencias de remoción entre la planta actual y la planta optimizada

Parámetro	PLANTA ACTUAL	PLANTA OPTIMIZADA
DBO5	57,2%	85-90%
DQO	56,7%	80-88%
SÓLIDOS	77,7%	90-95%
SUSPENDIDOS		
NITRÓGENO	14,2%	60-75%
FÓSFORO	21,0%	55-70%

Nota: Elaboración a partir de los resultados de laboratorio y proyecciones de diseño del sistema optimizado. Elaboración propia.

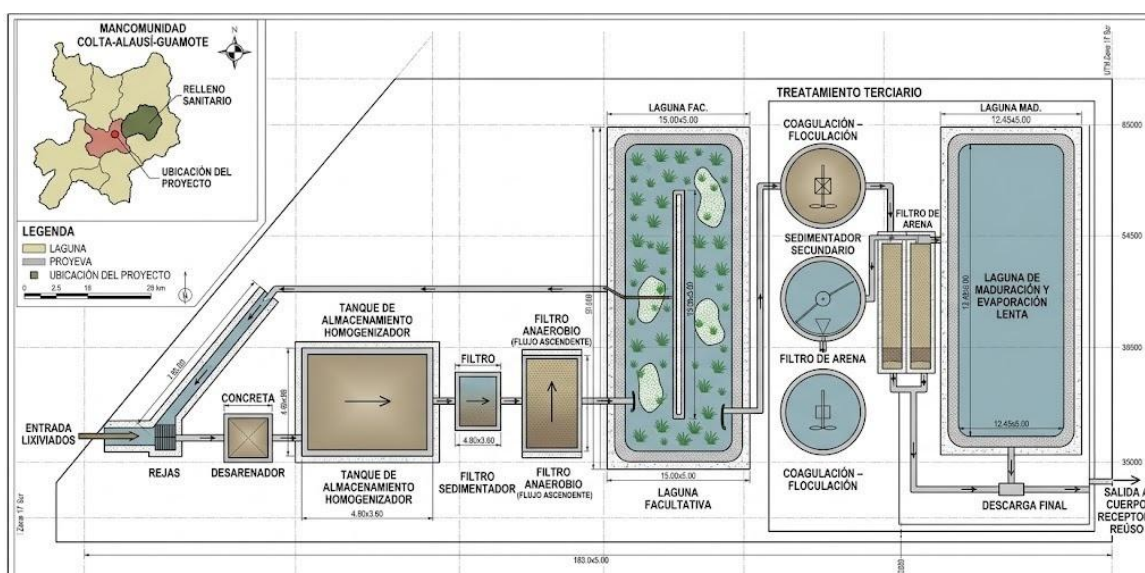
La comparación evidencia que el sistema optimizado mejoraría significativamente la remoción de contaminantes, especialmente en parámetros relacionados con nutrientes, los cuales representan una de las principales limitaciones del sistema actual.

La incorporación de unidades de tratamiento complementarias permitiría aumentar el tiempo de retención hidráulica, mejorar los procesos biológicos y optimizar la sedimentación y filtración del lixiviado. Además, el tratamiento terciario contribuiría a

obtener un efluente de mejor calidad y reducir el riesgo de contaminación del suelo y cuerpos de agua cercanos.

De igual manera, la propuesta optimizada permitiría disminuir problemas operativos identificados en la planta actual, tales como acumulación de sólidos, colmatación de unidades, generación de olores y pérdida de eficiencia hidráulica.

Ilustración 4. Diseño de planta de tratamiento de lixiviados Optimizado



Nota: Diseño elaborado a partir de la evaluación técnica de la planta existente y de la revisión bibliográfica de tecnologías de tratamiento de lixiviados.

El análisis de la planta de tratamiento de lixiviados de la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote se realizó a partir de los planos originales del sistema existente y de los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio. Inicialmente, se identificó que la planta está conformada por un tanque de almacenamiento y homogenización, un filtro sedimentador, un filtro anaerobio de flujo ascendente y una laguna de maduración y

evaporación lenta. Estas unidades trabajan de manera secuencial permitiendo el tratamiento progresivo del lixiviado generado en el relleno sanitario.

El tanque de homogenización cumple la función de regular el caudal y estabilizar la carga contaminante antes de ingresar al tratamiento principal, evitando variaciones bruscas que puedan afectar el funcionamiento hidráulico y biológico del sistema. Posteriormente, el filtro sedimentador permite la remoción de sólidos suspendidos y material sedimentable mediante procesos físicos de decantación, mientras que el filtro anaerobio constituye la unidad principal de tratamiento biológico, donde los microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno.

Finalmente, la laguna de maduración actúa como una etapa de pulimento y evaporación lenta, favoreciendo la sedimentación complementaria y la reducción parcial de algunos contaminantes.

Sin embargo, mediante la evaluación técnica y los resultados de laboratorio se identificaron limitaciones importantes en el sistema actual. Los análisis evidenciaron concentraciones elevadas de DBO₅, DQO, sólidos suspendidos, nitrógeno y fósforo, indicando que el lixiviado presenta una alta carga contaminante. Aunque el sistema logra reducir parcialmente estos parámetros, las eficiencias de remoción aún son moderadas, especialmente en el caso de nutrientes y compuestos recalcitrantes.

La remoción de DBO₅ y DQO se mantiene alrededor del 57 %, mientras que la reducción de nitrógeno es limitada, lo que demuestra que el sistema existente no es suficiente para garantizar una depuración integral del lixiviado. Además, se observó que la planta carece de unidades completas de pretratamiento, como rejillas y desarenadores, lo que incrementa el riesgo de colmatación, acumulación de sólidos y disminución de la eficiencia hidráulica de las unidades posteriores.

Con base en estas deficiencias, se planteó una propuesta de optimización orientada a mejorar el desempeño general de la planta sin modificar completamente la infraestructura existente. La propuesta consiste en mantener las unidades que aún presentan funcionalidad adecuada, como el tanque homogenizador, el sedimentador y el filtro anaerobio, incorporando nuevas etapas de tratamiento que permitan complementar la remoción de contaminantes.

En primer lugar, se propone implementar un sistema de pretratamiento conformado por rejas y desarenador, con el objetivo de retener sólidos gruesos y partículas pesadas antes de que ingresen a las unidades biológicas. Posteriormente, se optimiza el tratamiento secundario mediante la incorporación de una laguna facultativa que mejora la degradación biológica de materia orgánica. Finalmente, se adiciona un tratamiento terciario compuesto por coagulación-floculación, sedimentación secundaria y filtración en arena, procesos físico-químicos que permiten remover contaminantes disueltos, nutrientes y sólidos finos que no son eliminados en las etapas anteriores.

La incorporación de estas unidades mejora significativamente la eficiencia global del sistema, ya que combina procesos físicos, biológicos y físico-químicos en una misma línea de tratamiento. Con esta optimización se espera incrementar la remoción de DBO₅ hasta valores entre el 85 % y 95 %, reducir la DQO hasta aproximadamente el 90 %, alcanzar remociones superiores al 90 % de sólidos suspendidos y mejorar considerablemente la eliminación de nitrógeno y fósforo.

Además, el nuevo diseño permite un flujo hidráulico más estable, reduce problemas de colmatación y mejora la operatividad general de la planta. De esta manera, la propuesta optimizada no solo incrementa la eficiencia del tratamiento, sino que también garantiza una mayor viabilidad técnica, ambiental y económica para la mancomunidad Colta, Alausí y

Guamote, contribuyendo al cumplimiento de la normativa ambiental ecuatoriana y a la protección de los recursos hídricos de la zona.

4.4 Discusión científica de los resultados

Los resultados obtenidos en la caracterización del lixiviado de la planta de tratamiento de la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote evidenciaron concentraciones elevadas de DBO₅ (2116 mg/L) y DQO (4275 mg/L), lo que confirma que el lixiviado presenta una alta carga orgánica y un grado importante de contaminación. Estos valores son comparables con los reportados en estudios recientes sobre lixiviados de rellenos sanitarios en operación, donde se registran concentraciones de DQO entre 2000 y 10000 mg/L y altos contenidos de nitrógeno amoniacal asociados a la degradación anaerobia de los residuos sólidos urbanos (Teng et al., 2021; Kurniawan et al., 2021). La similitud de estos resultados indica que el comportamiento del lixiviado estudiado responde a las características típicas de lixiviados estabilizados o de mediana madurez.

4.5 Comparación de eficiencias de remoción

La eficiencia de remoción de DBO₅ obtenida en la planta actual fue de 57,2 %, mientras que la DQO alcanzó 56,7 %. Estos porcentajes son inferiores a los reportados para sistemas anaerobios optimizados tipo UASB y sistemas híbridos, donde se han observado remociones de DBO₅ entre 70 % y 90 % y de DQO entre 65 % y 85 % (Ahmed & Lan, 2022; Aziz et al., 2020). Esta diferencia puede atribuirse a varios factores técnicos: i) el tiempo de retención hidráulica posiblemente insuficiente en algunas unidades, ii) la ausencia de pretratamiento

adecuado, iii) la acumulación de lodos observada durante la inspección de campo y iv) la presencia de compuestos recalcitrantes que limitan la biodegradabilidad del lixiviado. De acuerdo con Remmas et al. (2023), los lixiviados maduros contienen sustancias húmicas y compuestos aromáticos de difícil degradación, lo que reduce significativamente la eficiencia de los procesos biológicos convencionales.

En contraste, la remoción de sólidos suspendidos alcanzó 77,7 %, constituyéndose en el parámetro con mejor desempeño dentro del sistema evaluado. Este resultado coincide con lo señalado por Aziz et al. (2020), quienes reportan eficiencias entre 70 % y 90 % para sistemas que combinan sedimentación y tratamiento anaerobio. La similitud observada sugiere que las unidades físicas existentes —particularmente el filtro sedimentador— mantienen una capacidad aceptable para la separación de sólidos sedimentables. Sin embargo, el mantenimiento deficiente y la acumulación de lodos podrían comprometer progresivamente esta eficiencia, afectando el comportamiento hidráulico del sistema.

4.6 Nutrientes y limitaciones del sistema actual

Uno de los hallazgos más relevantes de la investigación fue la baja remoción de nutrientes: 14,2 % para nitrógeno y 21,0 % para fósforo. Estos valores son considerablemente inferiores a los obtenidos en sistemas que incorporan procesos específicos de nitrificación-desnitrificación, humedales construidos o etapas físico-químicas complementarias, donde se alcanzan remociones superiores al 60 % para nitrógeno y superiores al 50 % para fósforo (Chen et al., 2024; Kurniawan et al., 2021). La baja eficiencia observada puede explicarse porque el sistema actual está basado principalmente en procesos anaerobios, los cuales son

efectivos para la degradación de materia orgánica, pero limitados para la transformación y eliminación de nutrientes. Además, la ausencia de etapas aerobias controladas impide el desarrollo adecuado de bacterias nitrificantes responsables de la oxidación del amonio.

Desde el punto de vista técnico, estos resultados evidencian que la planta actual presenta un desempeño parcial: logra reducir sólidos y parte de la carga orgánica, pero no garantiza una depuración integral del lixiviado. Esta situación coincide con lo reportado por Teng et al. (2021), quienes señalan que los sistemas basados únicamente en lagunas y tratamientos anaerobios suelen ser insuficientes para cumplir estándares ambientales estrictos, especialmente cuando se trata de lixiviados con alta concentración de nitrógeno amoniacal y compuestos recalcitrantes.

4.7 Sustento técnico de la propuesta optimizada

La propuesta de optimización desarrollada en esta investigación, basada en la incorporación de pretratamiento, laguna facultativa, coagulación-floculación, sedimentación secundaria y filtración, se encuentra alineada con las tendencias actuales en el tratamiento de lixiviados. Diversos estudios recientes recomiendan sistemas híbridos que integren procesos biológicos y físico-químicos para mejorar la remoción de materia orgánica y nutrientes (Ahmed & Lan, 2022; Remmas et al., 2023). En particular, Chen et al. (2024) demostraron que la coagulación-floculación constituye una etapa eficiente para remover fósforo, sólidos finos y compuestos orgánicos refractarios, complementando adecuadamente los procesos biológicos.

Las eficiencias proyectadas para el sistema optimizado (85–90 % para DBO₅, 80–88 % para DQO, 90–95 % para sólidos suspendidos, 60–75 % para nitrógeno y 55–70 % para fósforo) se encuentran dentro de los rangos reportados por la literatura científica internacional para sistemas combinados de tratamiento de lixiviados (Ahmed & Lan, 2022; Chen et al., 2024). Esto respalda técnicamente la viabilidad de la alternativa propuesta y demuestra que el rediseño planteado podría mejorar significativamente la calidad del efluente y el cumplimiento de la normativa ambiental ecuatoriana.

4.8 Relevancia ambiental y operativa

La relevancia ambiental de estos resultados es considerable, ya que la descarga de lixiviados con altos contenidos de nitrógeno y materia orgánica puede generar procesos de eutrofización, consumo de oxígeno disuelto y contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Asimismo, desde la perspectiva operativa, la incorporación de unidades de pretratamiento y pulimiento contribuiría a reducir problemas identificados en la planta actual, como colmatación, acumulación de sólidos, generación de olores y pérdida de eficiencia hidráulica.

En conjunto, los hallazgos de la presente investigación confirman que la planta de tratamiento existente requiere una optimización integral y que la implementación de un sistema combinado representa una alternativa técnica, ambiental y económicamente más adecuada para las condiciones de la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La evaluación técnica de la planta de tratamiento de lixiviados de la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote permitió determinar que el sistema actual, conformado por tanque de homogenización, filtro sedimentador, filtro anaerobio y laguna de maduración, presenta limitaciones operativas e hidráulicas que afectan su desempeño. La ausencia de unidades adecuadas de pretratamiento y tratamiento terciario incrementa el riesgo de colmatación, acumulación de sólidos y disminución de la eficiencia global del sistema.
- La caracterización físico-química de los lixiviados evidenció una elevada carga contaminante, registrándose concentraciones de entrada de 2116 mgO₂/L de DBO₅, 4275 mg/L de DQO, 1790 mg/L de sólidos suspendidos, 95,2 mg/L de nitrógeno y 19 mg/L de fósforo. Estos resultados confirman que el lixiviado generado en la mancomunidad requiere procesos de tratamiento más robustos para garantizar una adecuada reducción de contaminantes antes de su descarga al ambiente.
- El análisis de eficiencia de remoción demostró que la planta actual presenta un desempeño moderado para la eliminación de materia orgánica y sólidos suspendidos, alcanzando eficiencias de 57,2 % para DBO₅, 56,7 % para DQO y 77,7 % para sólidos suspendidos. Sin embargo, la remoción de nutrientes fue limitada, obteniéndose eficiencias de apenas 14,2 % para nitrógeno y 21,0 % para fósforo, lo que evidencia la necesidad de incorporar procesos complementarios orientados a la eliminación de estos compuestos.

5.2 Recomendaciones

- Implementar progresivamente la propuesta de optimización desarrollada en esta investigación, priorizando la incorporación de unidades de pretratamiento (rejas y desarenador) y tratamiento terciario (coagulación-floculación, sedimentación secundaria y filtración), con el fin de mejorar la eficiencia global de remoción de contaminantes y reducir los problemas operativos identificados en la planta actual.
- Establecer un programa de monitoreo periódico de la calidad del lixiviado en los puntos de entrada y salida de la planta, considerando como mínimo los parámetros DBO₅, DQO, sólidos suspendidos, nitrógeno total y fósforo, con el propósito de evaluar el desempeño del sistema y verificar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.
- Implementar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para todas las unidades de tratamiento, especialmente en el filtro sedimentador, filtro anaerobio y lagunas, a fin de evitar procesos de colmatación, acumulación excesiva de lodos y pérdida de eficiencia hidráulica.
- Realizar la caracterización estacional de los lixiviados durante diferentes épocas del año, considerando periodos secos y lluviosos, para determinar la variabilidad de la carga contaminante y ajustar las condiciones operativas del sistema de tratamiento de acuerdo con las características reales del afluente.
- Evaluar mediante estudios piloto la aplicación de tecnologías complementarias para la remoción de nutrientes y compuestos recalcitrantes, tales como humedales artificiales, adsorción con carbón activado, electrocoagulación u otros procesos avanzados, con el fin de mejorar la calidad final del efluente tratado.

- Desarrollar evaluaciones técnico-económicas y análisis de costos de implementación, operación y mantenimiento de la propuesta optimizada, que permitan a la mancomunidad planificar adecuadamente la inversión requerida y garantizar la sostenibilidad del sistema a largo plazo.
- Continuar desarrollando investigaciones relacionadas con la optimización de sistemas de tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios de características similares, incorporando modelación hidráulica, análisis de eficiencia a escala real y evaluación del cumplimiento normativo de los efluentes tratados.

REFERENCIAS

- Alvarez, J., Paredes, M., & Yupanqui, A. (2018). Uso de humedales para tratamiento de lixiviados en Lima. *Revista Ambiental Andina*, 15(2), 45–53.
- Banco Mundial. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. <https://openknowledge.worldbank.org>
- 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>
- EPA. (2020). *Leachate Treatment Options*. United States Environmental Protection Agency.
- FAO. (2020). *Sistemas de tratamiento de lixiviados en zonas rurales: Experiencias en Perú*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 1060.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2009). An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.115>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2015). Treatment of landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*.

Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2019). Review on leachate treatment technologies. *Journal of Environmental Management*, 247, 267–284.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.042>

Gálvez, A., et al. (2021). Optimización de la coagulación-floculación en lixiviados. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 39(2), 27–36.

GIZ. (2017). *Gestión de proyectos ambientales con enfoque de marco lógico*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.

GIZ. (2019). *Gestión de residuos sólidos en América Latina: Retos y oportunidades*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2022). *Censo de Población y Vivienda*.

ISO. (2016). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. International Organization for Standardization.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank.

Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T. H. (2017). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297–336.

Kjeldsen, P., et al. (2016). Present and long-term composition of landfill leachate. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*.

Kurniawan, T. A., Lo, W.-H., & Chan, G. Y. (2020). Technologies for managing landfill leachate. *Waste Management*, 119, 46–60.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.021>

Medeiros, R. M., Araujo, F. O., & Silva, M. S. (2017). Caracterización de lixiviados y su tratamiento. *Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 22(3), 189–196.

Metcalf & Eddy. (2017). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). (2015). *Acuerdo Ministerial 097-A*.

Ministerio del Ambiente. (2019). *Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA)*. Quito, Ecuador.

Ministerio del Ambiente. (2021). *Diagnóstico de plantas de tratamiento de lixiviados en Ecuador*. Quito: MAATE.

Ministerio del Ambiente. (2022). *Informe técnico de evaluación de mejoras en sistemas de tratamiento de lixiviados*. Quito, Ecuador.

ONU-Hábitat. (2021). *Estado de las ciudades de América Latina*. <https://unhabitat.org>

OPS. (2020). *Guía para la implementación de la GIRS en municipios de América Latina*. Organización Panamericana de la Salud.

Oturan, M. A., & Aaron, J. J. (2014). Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(23), 2577–2641.

- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468–493.
- Renou, S., et al. (2015). Landfill leachate treatment: Review. *Journal of Hazardous Materials*.
- Rizzo, L., Malato, S., Antakyali, D., Beretsou, V. G., & Thomaidis, N. S. (2019). Advances in water reuse technologies for wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 710, 136-168.
- Tchobanoglous, G., Gestión integral de residuos sólidos. McGraw-Hill. (2014). (*Nota: Combinado con la versión de coautores de 2014*) Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (2014). *Gestión integral de residuos sólidos*. McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Tchobanoglous, G., et al. (2015). *Integrated Solid Waste Management*. McGraw-Hill.
- UNEP. (2019). *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. United Nations Environment Programme.
- UNEP. (2019). *Waste Management Outlook for Latin America and the Caribbean*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- UNEP. (2021). *Global Waste Management Outlook*. United Nations Environment Programme.
- Vergara, S., & Tchobanoglous, G. (2020). Municipal Solid Waste Management in Latin America. *Waste Management & Research*, 38(10), 1123–1132.

Wang, X., Chen, R., & Ma, Y. (2020). Performance of sequencing batch reactor treating landfill leachate: A review. *Bioresource Technology*, 309, 123386.

Wang, Y., Liu, H., Zhang, H., & Zhao, X. (2020). Advanced treatment of landfill leachate by Fenton process combined with membrane bioreactor. *Science of the Total Environment*, 707, 135872.

Weather Consulting. (2013). *Diagnóstico técnico de la planta de tratamiento de lixiviados de la mancomunidad Colta-Alausí-Guamote*.

Zhang, J., Li, Y., & Wang, Y. (2021). Advanced treatment of landfill leachate using Fenton process and SBR. *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102384.

ANEXOS

Anexo 1. *Visita técnica en la planta de tratamiento de lixiviados para la mancomunidad Colta, Alausí y Guamote*



Anexo 2. Análisis físico-químico en el laboratorio de servicios ambientales de la UNACH en base al muestreo realizado en el afluente y el efluente de la planta de tratamiento



Anexo 3. Análisis de la DQO

