

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

FACULTAD DE INGENIERÍA



**UNIVERSIDAD
NACIONAL DE JAÉN**

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL SULFATO DE
ALUMINIO, COMO ALTERNATIVA PARA DISMINUIR LA
TURBIEDAD EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-
FLOCULACIÓN DEL LIXIVIADO, DEL BOTADERO
CONTROLADO LA PUSHURA, EN JAÉN, CAJAMARCA**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
FORESTAL Y AMBIENTAL**

Autores:

Bach. Edson Córdova Saavedra

Bach. Jhon Anthony Díaz Llamo

Asesora:



Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo

**Línea de Investigación: Innovación tecnológica para el desempeño y competitividad de
la calidad ambiental**

**JAÉN – PERÚ
2025**

Edson Córdova Saavedra Jhon Anthony Díaz Llamo

APLICACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN PARA DISMINUIR LA TURBIEDAD DEL LIXIVI...

-  Quick Submit
-  Quick Submit
-  Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3383711315

38 páginas

Fecha de entrega

23 oct 2025, 10:18 a.m. GMT-5

7424 palabras

Fecha de descarga

23 oct 2025, 10:21 a.m. GMT-5

43.058 caracteres

Nombre del archivo

SON_CORDOVA_SAAVEDRA_JHON_ANTHONY_LLAMO_D_AZ_-_Edson_Cordova.pdf

Tamaño del archivo

2.6 MB

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dr. Alexander Huamán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería




4% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN


Dr. Alexander Huamán Mera
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería



ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el 31 de octubre del 2025, siendo las 11:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado Evaluador designados con Resolución N° 373 – 2025 – UNJ/FI.

Presidente, Dr. Lupo Leonidas Varas Ponce.

Secretario, Mg. María Marleni Torres Cruz.

Vocal, Dr. Wagner Colmenares Mayanga.

para evaluar la sustentación del Informe Final de Tesis titulado: "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL SULFATO DE ALUMINIO, COMO ALTERNATIVA PARA DISMINUIR LA TURBIEDAD EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN DEL LIXIVIADO, DEL BOTADERO CONTROLADO LA PUSHURA, EN JAÉN, CAJAMARCA", cuyos autores son el Bach. Edson Córdova Saavedra y Bach. Jhon Anthony Díaz Llamo, de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental, teniendo como asesora a la Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo.

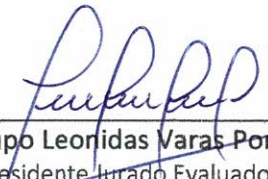
Después de la sustentación y defensa, el Jurado Evaluador acuerda:

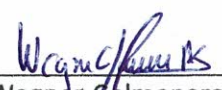
() Aprobar () Desaprobar () Unanimidad () Mayoría

Con la siguiente mención:

Excelente	18, 19, 20	()
Muy bueno	16, 17	()
Bueno	14, 15	()
Regular	13	(<u>13</u>)
Desaprobado	12 o menos	()

Siendo las 12:02 horas, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.


Dr. Lupo Leonidas Varas Ponce
Presidente Jurado Evaluador


Dr. Wagner Colmenares Mayanga
Secretario Jurado Evaluador


Mg. María Marleni Torres Cruz
Vocal Jurado Evaluador

“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

ANEXO N°06:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)

Yo, **Cordova Saavedra Edson**, egresado de la carrera Profesional de la carrera profesional de Ingeniería Forestal Y Ambiental de la Facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI 72648460.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL SULFATO DE ALUMINIO, COMO ALTERNATIVA PARA DISMINUIR LA TURBIEDAD EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN DEL LIXIVIADO, DEL BOTADERO CONTROLADO LA PUSHURA, EN JAÉN, CAJAMARCA”.

Asesorado por Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo.

El mismo que presento bajo la modalidad de tesis para optar; el Título Profesional/Grado Académico de INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Jaén, 22 diciembre 2025.



CORDOVA SAAVEDRA EDSON

“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

ANEXO N°06:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)

Yo, **Diaz Llamo Jhon Anthony**, egresado de la carrera Profesional de la carrera profesional de Ingeniería Forestal Y Ambiental de la Facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI 70896932.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL SULFATO DE ALUMINIO, COMO ALTERNATIVA PARA DISMINUIR LA TURBIEDAD EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN DEL LIXIVIADO, DEL BOTADERO CONTROLADO LA PUSHURA, EN JAÉN, CAJAMARCA”.

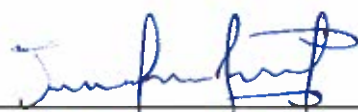
Asesorado por Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo.

El mismo que presento bajo la modalidad de tesis para optar; el Título Profesional/Grado Académico de INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Jaén, 22 diciembre 2025.



DIAZ LLAMO JHON ANTHONY.



ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
I. INTRODUCCIÓN	7
II. MATERIAL Y MÉTODOS	9
2.1. Ubicación del área de estudio	9
2.2. Materiales	10
2.3. Población, muestra.....	10
2.4. Variables de estudio.....	10
2.5. Método	11
2.6. Procedimiento	11
2.7. Análisis de datos	14
III. RESULTADOS	15
3.1. Caracterización fisicoquímica del lixiviado	15
3.2. Disminución de la turbiedad del lixiviado mediante coagulación-floculación	15
3.3. Dosificación óptima para la disminución de la turbiedad	19
IV. DISCUSIÓN	20
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	23
5.1. Conclusiones.....	23
5.2. Recomendaciones	23
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
AGRADECIMIENTO	29
DEDICATORIA	30
ANEXOS	31

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Dosificaciones de sulfato de aluminio evaluadas en el proceso de coagulación-floculación.....	12
Tabla 2 Características fisicoquímicas del lixiviado crudo del botadero La Pushura	15
Tabla 3 Porcentaje de disminución de turbiedad por tratamiento.....	16
Tabla 4 Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la turbiedad.....	17
Tabla 5 Correlación no paramétrica Rho de Spearman entre dosificación de aluminio y turbiedad	18
Tabla 6 Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	18
Tabla 7 Prueba estadística de Bonferroni para comparación por parejas	19

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Mapa de ubicación del área de estudio.....	9
Figura 2 Diagrama de flujo test de jarras	13
Figura 3 Diagrama de dispersión de los resultados de turbiedad.....	16
Figura 4 Porcentaje de disminución promedio de la turbiedad por coagulación-floculación..	19
Figura 5 Reporte de caracterización fisicoquímica de lixiviado.....	31
Figura 6 Informe de ensayo de turbiedad postratamiento.....	33
Figura 7 Georreferenciación del punto de muestreo.....	34
Figura 8 Toma de muestra y rotulado de lixiviado en el botadero controlado La Pushura	35
Figura 9 Pesado del coagulante-floculante sulfato de aluminio	36
Figura 10 Proceso de coagulación-floculación utilizando el equipo Test de Jarras	37
Figura 11 Correlación de Spearman en SPSS 25.....	37
Figura 12 Prueba de normalidad – Shapiro – Wilk en SPSS 25.....	38
Figura 13 Prueba de hipótesis Kruskal-Walis en SPSS 25	38

RESUMEN

El lixiviado generado en rellenos sanitarios o botaderos presenta una composición compleja y variada con naturaleza potencialmente contaminante para el ambiente y riesgosa para la salud humana cuando no existe un sistema de gestión y tratamiento bien planificado. Este estudio tuvo como objetivo aplicar el proceso de coagulación-floculación para disminuir la turbiedad del lixiviado del botadero controlado La Pushura, Jaén-Cajamarca, caracterizándolo fisicoquímicamente, evaluando la eficiencia del sulfato de aluminio como coagulantes y determinando la dosificación óptima. El experimento se desarrolló en condiciones de laboratorio. La caracterización fisicoquímica reveló que el lixiviado es de tipo maduro con pH ligeramente alcalino (8.27), alta conductividad eléctrica (9.69 mS cm^{-1}), sólidos totales disueltos (4.850 mg L^{-1}) y turbiedad inicial de 733 NTU. Las dosificaciones de 0.2 y $0.4 \text{ g Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$, fueron las más efectivas, alcanzando disminuyendo de turbiedad del 61.35% y 60.80 %, respectivamente. Estadísticamente, se identificó una correlación negativa significativa ($\rho = -0.930$; $p < 0.001$) entre la dosis de coagulante y la disminución de la turbiedad. Se concluye que el proceso de coagulación-floculación con sulfato de aluminio es una técnica eficiente y viable para el tratamiento de lixiviados, siendo la dosificación óptima de $0.2 \text{ g Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$ la que genera mayor disminución de turbiedad.

Palabras clave: sulfato de aluminio, agua residual, contaminación hídrica, dosificación, tratamiento fisicoquímico

ABSTRACT

The leachate generated in landfills or dumps has a complex and varied composition that is potentially polluting for the environment and dangerous for human health when there is no management and treatment system in place. The objective of this study was to apply the coagulation-flocculation process to reduce the turbidity of leachate from the La Pushura controlled dump in Jaén-Cajamarca, characterizing it physicochemically, evaluating the efficiency of aluminum sulfate as a coagulant, and determining the optimal dosing. The experiment was conducted under laboratory conditions. Physicochemical characterization revealed that the leachate is mature with a pH slightly alkaline (8.27), high electrical conductivity (9.69 mS cm^{-1}), total solids dissolved ($4,850 \text{ mg L}^{-1}$), and a starting turbidity of 733 NTU. Dosages of 0.2 and $0.4 \text{ g Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$ were the most effective, reducing turbidity to 61.35% and 60.80%, respectively. Statistically, a significant negative correlation ($\rho = -0.930$; $p < 0.001$) was identified between the coagulant dose and the decrease in turbidity. It is concluded that the coagulation-flocculation process with aluminum sulfate is an efficient and viable technique for the treatment of leachate, with the optimal dosage of $0.2 \text{ g Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$ generating the greatest reduction in turbidity.

Keywords: aluminum sulfate, wastewater, water pollution, dosing, physicochemical treatment

I. INTRODUCCIÓN

Se estima que la población mundial alcance entre 8.5 y 8.6 mil millones en 2030, entre 9.4 y 10.1 mil millones en 2050, mientras que, para fin de siglo se calcula entre 9.4 y 12.7 mil millones de habitantes (United Nations *et al.*, 2019), representando una presión significativa sobre el ambiente y los recursos naturales. El aumento exponencial de la población, la rápida urbanización y el crecimiento económico generan cantidades significativas de residuos sólidos en todas partes del mundo (García-Guaita *et al.*, 2018; Mohammadi *et al.*, 2019); esto significaría una generación de aproximadamente 3.40 mil millones de toneladas de residuos sólidos municipales (RSM) para el 2050 desde los niveles actuales que fluctúan alrededor de los 2.01 mil millones de toneladas (Kaza *et al.*, 2018).

En Perú, durante el 2015, se registraron 7 588 646 t de RSM; es decir se estimó un incremento de un 1.7 % en la generación de residuos sólidos a nivel nacional con respecto al 2014 (MINAM, 2017). Mientras que, en la ciudad de Jaén, en el mismo año, la generación fue equivalente a 21 220.30 t de RSM; estimándose en 24 235.78 t para el 2025 (Dirección de Desarrollo Ambiental, 2015); sin embargo, la generación de RSM en Jaén, actualmente es de aproximadamente 30 178.93 t/año, es decir, 82.682 t/día de RSM (Gerencia de Gestión y Desarrollo Ambiental, 2017).

Los rellenos sanitarios son el método más común de eliminación de RSM (Addy *et al.*, 2023; de Melo *et al.*, 2023; Kaza y Bhada-Tata, 2018; Meena *et al.*, 2023), principalmente debido a sus ventajas económicas (Chen y Wang, 2017; de Melo *et al.*, 2023). El diseño y cobertura de los rellenos sanitarios, las condiciones meteorológicas y climatológicas como la precipitación, evapotranspiración, temperatura, velocidad y dirección del viento, (Miao *et al.*, 2019; Pazoki y Ghasemzadeh, 2020), las actividades de compactación y degradación de los residuos y el contenido de humedad (Costa *et al.*, 2019; Pazoki y Ghasemzadeh, 2020), todos estos factores influyen significativamente en la generación y producción de un extracto líquido altamente concentrado. De acuerdo con el Ministerio del Ambiente del Perú, este efluente, denominado técnicamente lixiviado, se define como el líquido que se genera por la percolación de agua a través de los residuos sólidos, arrastrando materiales disueltos o en suspensión, y que contiene

una alta carga orgánica e inorgánica, así como metales pesados y otros contaminantes (MINAM, 2017, 2021; Aziz *et al.*, 2023; Baettker *et al.*, 2020).

Según Hamid *et al.*, (2018), se han identificado aproximadamente 200 compuestos peligrosos presentes en los lixiviados, cuya gestión inadecuada representa un problema potencial para el ambiente (Baderna *et al.*, 2019) contaminando agua, suelo y aire (Addy *et al.*, 2023) debido a la dificultad para tratar su compleja y variada composición (Borba *et al.*, 2019), además de generar impacto en la salud humana (Addy *et al.*, 2023). Por lo tanto, el tratamiento de agua residual, incluido el lixiviado, implica minimizar o evitar cualquier tipo de riesgo perjudicial (Rambabu *et al.*, 2020), siendo empleado con éxito en la gestión de lixiviados, el proceso de coagulación-floculación (Aziz *et al.*, 2023; Costa *et al.*, 2019; de Melo *et al.*, 2023; Djefal *et al.*, 2019; Mohd-Salleh *et al.*, 2018; Teng *et al.*, 2021), reconocido actualmente como un tratamiento simple y rentable para eliminar sólidos coloidales no sedimentables (Ren *et al.*, 2019; Torretta *et al.*, 2017); ya que, es tratamiento que neutraliza las partículas suspendidas que están cargadas negativamente (Saritha *et al.*, 2017) y posteriormente, las partículas desestabilizadas se aglomeran para formar flóculos más grandes, seguido de su precipitación. Su eficacia en la reducción de turbiedad ha sido validada en diversos estudios: Ghafari *et al.* (2009) reportaron remociones de 88.9% y 94.4%; Marañón *et al.* (2010) alcanzaron 91.6%, 99.9% y 100%; Taoufik *et al.* (2018) lograron 89.5%; Tripathy y Kumar (2019) obtuvieron 52.75%, 77.27% y 89.01%; Djefal *et al.* (2019) registraron 98.6%, 98.9% y 99.4%; y Cuichán (2022) reportó 95.3%.

En este contexto, y considerando la necesidad de adaptar soluciones probadas a realidades locales como los botaderos en zonas en desarrollo; el presente trabajo de investigación se planteó con el objetivo general de aplicar el proceso de coagulación-floculación para disminuir la turbiedad del lixiviado del botadero controlado La Pushura, en Jaén, Cajamarca, contando con los siguientes objetivos específicos: 1. caracterizar fisicoquímicamente el lixiviado generado en el botadero controlado La Pushura, 2. ensayar el proceso de coagulación-floculación del lixiviado con sulfato de aluminio, a nivel de laboratorio, 3. determinar una dosificación óptima de acuerdo a las mejores eficiencias de disminución de la turbiedad. Los hallazgos constituyen un aporte significativo al ofrecer una solución técnicamente viable y económicamente sostenible para la gestión de lixiviados en botaderos controlados, representando un avance concreto en la mitigación del impacto ambiental de estos efluentes en localidades en desarrollo con limitaciones técnicas y económicas.

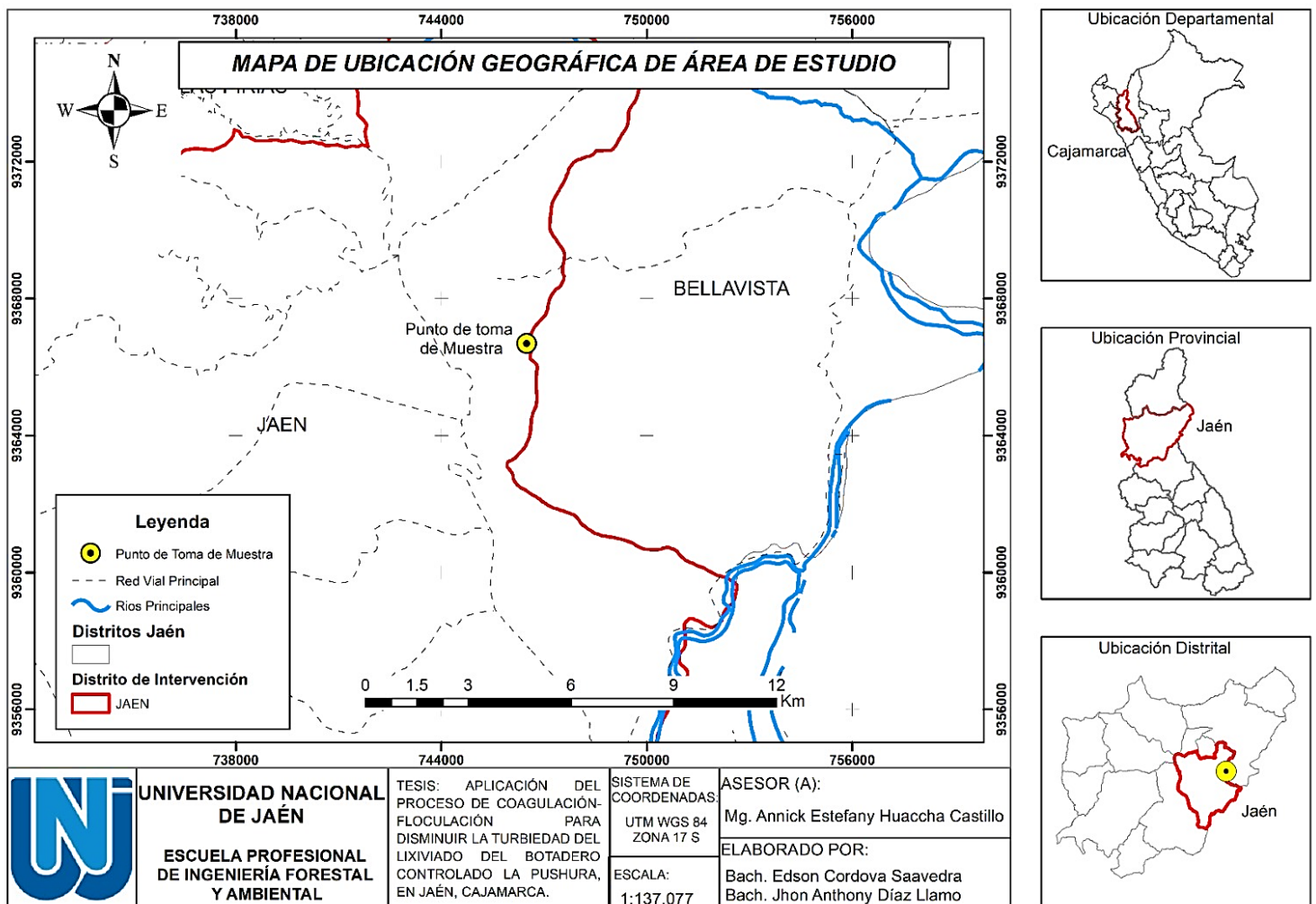
II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Ubicación del área de estudio

La ciudad de Jaén dispone sus residuos sólidos en un vertedero denominado “botadero controlado municipal”, ubicado a 6.59 Km con rumbo noreste de la ciudad, y ubicado en el sector La Pushura (coordenadas UTM: 17M 746877 m E 9367400 m N), a una altitud de 726 m.s.n.m. (Figura 1).

Figura 1

Mapa de ubicación geográfica del área de estudio



2.2. Materiales

En la ejecución de esta investigación se emplearon diversos materiales para el desarrollo experimental y analítico. Para la fase de muestreo, se utilizaron recipientes estériles y debidamente rotulados, cooler para la conservación de las muestras y GPS para la ubicación exacta del punto de muestreo en la poza de lixiviados del botadero controlado La Pushura. En el tratamiento de los lixiviados, se empleó sulfato de aluminio como coagulante-floculante, el cual fue dosificado utilizando una balanza de precisión. El proceso de coagulación-floculación se llevó a cabo con un equipo Test de Jarras. Para los análisis fisicoquímicos, se utilizaron equipos de laboratorio especializados, incluyendo un turbidímetro para medir la turbiedad según la norma SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, así un pH-metro para medir el pH, un conductímetro para la conductividad eléctrica, un medidor de sólidos totales disueltos (TDS meter) y un turbidímetro para la turbiedad.

2.3. Población, muestra

La población de estudio corresponde al lixiviado generado en el botadero controlado municipal La Pushura. Este universo abarca el total del efluente líquido producido por la infiltración de aguas pluviales y la descomposición anaeróbica de RSM depositados en el sitio.

La muestra consistió en 10 L de lixiviado crudo. Se recolectó directamente de la poza de lixiviados de acuerdo a lo estipulado por la Agencia de Protección Ambiental, en su publicación “*Landfill manuals - Guidance note of Landfill monitoring*” (EPA, 2013).

2.4. Variables de estudio

- Variable independiente: dosificación de sulfato de aluminio (coagulante), medida en g/L.
- Variable dependiente: porcentaje de disminución de turbiedad del lixiviado tratado.

2.5. Método

La investigación fue de carácter cuantitativo y de alcance explicativo empleando el método inductivo; es decir, se estudió una muestra representativa (lixiviados) a fin de establecer inferencias válidas a toda una población (Arias, 2020).

2.6. Procedimiento

1. Fase preliminar

- **Georreferenciación:** Mediante el uso de un equipo GPS, se identificó y marcó de manera precisa el punto de muestreo (Coordenadas UTM: 17M 746877 m E 9367400 m N) dentro de la poza de lixiviados, garantizando la repetibilidad del muestreo.
- **Revisión de protocolos:** Se consultaron y adaptaron los lineamientos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2013) en su documento "*Landfill manuals - Guidance note of Landfill monitoring*" para el muestreo de lixiviados.

2. Fase de muestreo

- **Preparación de materiales:** Se utilizaron recipientes de polietileno de alta densidad estériles de 10 L de capacidad, previamente lavados y enjuagados con agua desionizada.
- **Procedimiento de muestreo:** La muestra de lixiviado crudo fue recolectada directamente de la poza de lixiviados; se realizó un muestreo compuesto para obtener una muestra representativa. El llenado de los recipientes se realizó hasta el borde (evitando la formación de burbujas) y no se adicionó conservantes a la muestra de lixiviados debido a la naturaleza de los parámetros ensayados y a la proximidad del laboratorio.
- **Preservación y transporte:** Después de la recolección, las muestras fueron colocadas en una nevera portátil (cooler) con bolsas de gel refrigerante, manteniendo una temperatura aproximada de 4°C y protegiendo de la luz solar directa para evitar reacciones fotoquímicas. El transporte al laboratorio se realizó el mismo día de la recolección.

3. Fase de caracterización fisicoquímica del lixiviado

Una vez en el laboratorio, la muestra de lixiviado crudo fue sometida a una caracterización completa para determinar sus propiedades iniciales, utilizando los instrumentos calibrados.

4. Fase experimental: coagulación-floculación

- **Preparación del coagulante:** Se utilizó sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) como coagulante principal. Las dosis se pesaron con una balanza analítica de precisión.
- **Diseño de tratamientos:** Se establecieron cuatro tratamientos con tres repeticiones cada uno, definidos por la concentración de la Tabla 1 (Marañón *et al.*, 2010).

Tabla 1

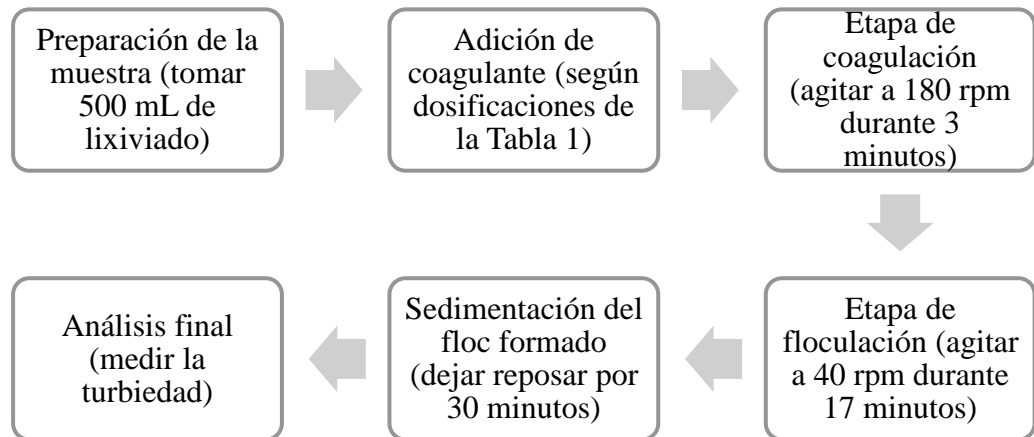
Dosificaciones de sulfato de aluminio evaluadas en el proceso de coagulación-floculación

Tratamiento	Dosificación ($\text{g Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$)
T1	0.2
T2	0.4
T3	0.6
T4	0.8

- **Test de jarras:** Se colocaron volúmenes de 500 mL de lixiviado crudo en cada una de las jarras (Amokrane *et al.*, 1997). En la etapa de coagulación (rápida mezcla), se añadió la dosis correspondiente de sulfato de aluminio a cada jarra. Seguidamente, se agitó a 180 revoluciones por minuto (rpm) durante 3 minutos (Marañón *et al.*, 2010). Esta etapa permite la desestabilización rápida de las partículas coloidales. En la etapa de floculación (lenta mezcla), la velocidad de agitación se redujo a 40 rpm durante 17 minutos (Ghafari *et al.*, 2009) y 1 hora (Verma y Kumar, 2016). Esta fase favorece el crecimiento y aglomeración de los microfloculos en partículas de mayor tamaño (floculos) susceptibles de sedimentar. En la etapa de sedimentación, las jarras se dejaron en reposo durante 60 minutos para permitir la precipitación de los floculos formados.

Figura 2

Diagrama de flujo test de jarras



5. Fase de medición y cálculo post-tratamiento

- **Medición de turbiedad:** Transcurrido el tiempo de sedimentación, se tomó una alícuota de la fase líquida superior (sobrenadante) de cada jarra, cuidando de no perturbar el sedimento. La turbiedad remanente se midió utilizando el turbidímetro, siguiendo estrictamente el método nefelométrico estandarizado en la Norma SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 22nd Ed Turbidity. Título: Nephelometric Method.
- **Cálculo de la eficiencia:** Para cada repetición de cada tratamiento, se calculó el porcentaje de disminución de turbiedad aplicando la fórmula propuesta por Ortiz *et al.*, (2018). Los resultados se registraron en una hoja de cálculo de Microsoft Excel para su posterior análisis.

$$\text{disminución turbiedad (\%)} = \left(\frac{\text{turbiedad}_{\text{inicial}} - \text{turbiedad}_{\text{remanente}}}{\text{turbiedad}_{\text{inicial}}} \right) \times 100$$

6. Fase de determinación de la dosificación óptima

La dosis óptima se determinó cruzando los resultados experimentales (porcentajes de disminución más altos) con los análisis estadísticos (pruebas de Kruskal-Wallis y Bonferroni), identificando el tratamiento que ofrecía la mayor eficiencia de manera estadísticamente robusta y con el menor consumo de reactivo.

2.7. Análisis de datos

En la investigación se evaluó la normalidad de la distribución de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk, seleccionada por su robustez para muestras menores a 50 datos (Paramasivam et al., 2024). Dado que los resultados mostraron desviaciones significativas de la distribución normal ($p < 0,05$), se optó por implementar métodos estadísticos no paramétricos para el análisis subsiguiente. Para establecer relaciones entre las variables de estudio se calculó el coeficiente de correlación de Spearman (ρ), adecuado para datos métricos que no cumplen con el supuesto de normalidad. Este análisis permitió evaluar la relación entre la dosificación de sulfato de aluminio y el porcentaje de disminución de turbiedad. La prueba de hipótesis se realizó mediante el análisis de varianza de Kruskal-Wallis para muestras independientes, método no paramétrico, apropiado para comparar pares cuando no se cumple el supuesto de normalidad (Flores-Ruiz et al., 2017). Al detectarse diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, se procedió con una prueba post-hoc de Bonferroni para identificar las comparaciones específicas que explicaban las diferencias. Todos los análisis se procesaron utilizando el software IBM SPSS Statistics 25, estableciendo un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. El enfoque metodológico adoptado garantizó la robustez de las inferencias estadísticas y la validez de las conclusiones derivadas del estudio experimental.

III. RESULTADOS

3.1. Caracterización fisicoquímica del lixiviado

El lixiviado del botadero controlado La Pushura presentó características fisicoquímicas que lo clasifican como maduro y recalcitrante, con un pH ligeramente alcalino (8.27), conductividad eléctrica elevada (9.69 mS cm^{-1}), alta carga de sólidos totales disueltos ($4\ 850 \text{ mg L}^{-1}$) responsables del lixiviado ($41\ 700 \text{ UCV-Pt-Co}$) y turbiedad significativa (733 NTU). Estos parámetros, resumidos en la Tabla 2, reflejan la composición acorde con lixiviados de rellenos sanitarios de más de 10 años, además se cumple con los parámetros de pH y temperatura según el D. S. 004-2017-MINAM; sin embargo, se superan ampliamente el Límite Máximo Permisible (LMP) para Sólidos Totales Disueltos ($2\ 000.00 \text{ mg L}^{-1}$).

Tabla 2

Características fisicoquímicas del lixiviado crudo del botadero La Pushura

Parámetro	Unidad de medida	Valor	D. S. 004-2017-MINAM (LMP)	Análisis valor vs LMP
pH		8.27	6.5 -9.00	cumple
Temperatura	°C	28.70	$\leq 40 \text{ °C}$	cumple
Conductividad eléctrica (CE)	mS cm^{-1}	9.69	-	-
Cloruro de sodio (NaCl)	%	17.70	-	-
Color aparente	UCV-Pt-Co	41 700	-	-
Sólidos totales disueltos (STD)	mg L^{-1}	4 850.00	2 000.00	no cumple
Turbiedad	NTU	733.00	-	-

3.2. Disminución de la turbiedad del lixiviado mediante coagulación-floculación

El proceso de coagulación-floculación con sulfato de aluminio logró reducir la turbiedad del lixiviado en un rango de 36.15% a 62.07%, con un promedio general de 53.94% a partir de un valor inicial de 733 NTU. Los tratamientos con dosificaciones de 0.2 g Al^{3+}

L⁻¹ (T1) y 0.4 g Al³⁺ L⁻¹ (T2) alcanzaron las mayores reducciones, con 61.35% y 60.80%, respectivamente, mientras que la dosificación más alta (0.8 g Al³⁺ L⁻¹, T4) mostró la menor eficiencia (37.56%). Los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

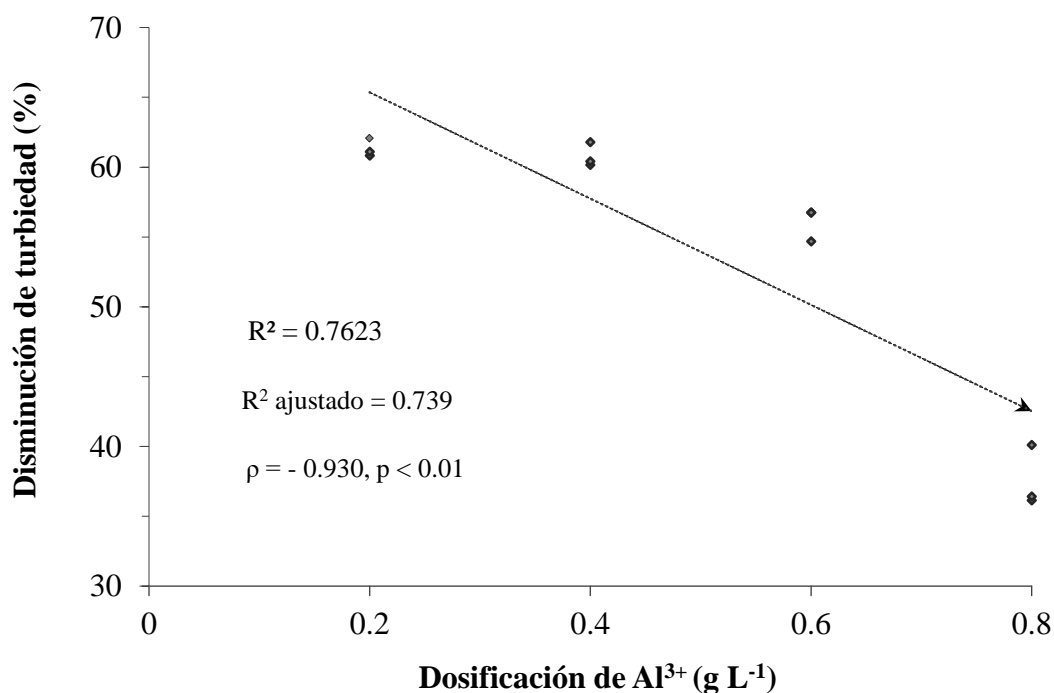
Porcentaje de disminución de turbiedad por tratamiento

Tratamiento	Dosificación (g Al ³⁺ L ⁻¹)	Porcentaje de disminución de turbiedad			
		R1	R2	R3	Promedio
T1	0.2	62.07	60.85	61.12	61.35
T2	0.4	61.80	60.16	60.44	60.80
T3	0.6	54.71	56.75	56.75	59.07
T4	0.8	40.11	36.15	36.43	37.56

La Figura 3 muestra la tendencia negativa entre los niveles de aluminio ensayados durante el proceso de coagulación-floculación y la disminución de la turbiedad del lixiviado. A mayor concentración de aluminio, menor porcentaje de disminución de turbiedad. Además, la disminución de turbiedad puede explicarse en aproximadamente el 74 % (R^2 ajustado = 0.739) por los niveles del coagulante-floculante.

Figura 3

Diagrama de dispersión de los resultados de turbiedad



Análisis estadístico

- **Prueba estadística de normalidad de Shapiro-Wilk**

Mostró que los datos de disminución de turbiedad no siguen una distribución normal ($p = 0.02, < 0.05$), justificando el uso de pruebas no paramétricas para el análisis estadístico posterior (Tabla 4).

Tabla 4

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para la turbiedad

Variable	Estadístico W	Grados de libertad (gl)	p – valor (Sig.)	Observación
Porcentaje de disminución de la turbiedad	0.737	12	0.002	Significativo ($p < 0.05$)

- **Correlación Rho de Spearman (ρ)**

Mostró correlación negativa significativa a una confiabilidad del 99 % ($p < 0.01$) entre la dosificación de sulfato de aluminio y el porcentaje de disminución de turbiedad (Tabla 5); indicando que a menores dosificaciones de coagulante están asociadas con mayores porcentajes de disminución de turbiedad. Esta fuerte correlación sugiere que el tratamiento podría utilizarse como predictor confiable del porcentaje de disminución de turbiedad.

Tabla 5

Correlación no paramétrica Rho de Spearman entre dosificación de aluminio y turbiedad

Variable	Correlaciones	Dosificación (g Al ³⁺ L ⁻¹)	Turbiedad
Dosificación (g Al³⁺ L⁻¹)	Coefficiente de correlación (ρ)	1.000	-0.9300
	Significancia estadística bilateral ¹ ($\rho < 0.001$)		0.000
	N	12	12
Porcentaje de disminución de turbiedad	Coefficiente de correlación (ρ)	-0.9300	1.000
	Significancia estadística bilateral ($\rho <$ 0.001)	0.000²	
	N	12	12

- **Prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis para muestras independientes**

La prueba de Kruskal-Wallis (Tabla 6) indica diferencias significativas en el porcentaje de disminución de turbiedad entre los tratamientos ($p < 0.05$).

Tabla 6

Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes

Variable	H de Kruskal-Wallis	Grados de libertad (gl)	p
Turbiedad	9.701	3	0.021

- **Prueba estadística de Bonferroni para comparación por parejas**

La prueba de Bonferroni (Tabla 7) identificó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos T1 - T4 (p ajustado < 0.05), consolidando que las dosificaciones más bajas de 0.2 y 0.4 g Al³⁺ L⁻¹ fueron más efectivas.

¹ Bilateral: Evalúa ambas direcciones de la relación:

Positiva: A aumenta, B aumenta

Negativa: A aumenta, B disminuye

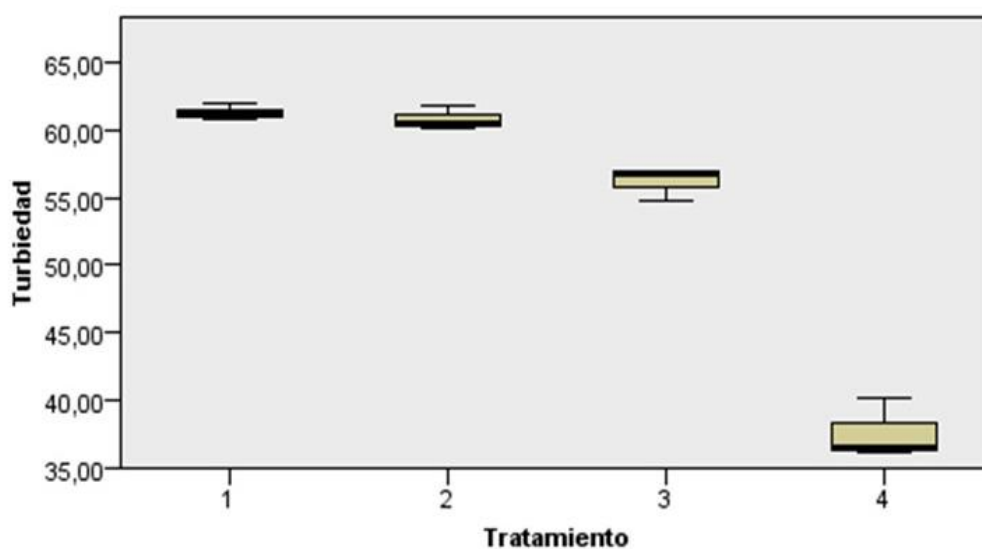
² 0.000" significa que su correlación es estadísticamente muy confiable

Tabla 7*Prueba estadística de Bonferroni para comparación por parejas*

Pareja	Estadístico de contraste	Error	Desviación del estadístico de contraste	p ajustado
T ₁ – T ₂	1.667	2.939	0.567	1.000
T ₁ – T ₃	5.333	2.939	1.815	0.417
T ₁ – T ₄	8.333	2.939	2.836	0.027*
T ₂ – T ₃	3.667	2.939	1.248	1.000
T ₂ – T ₄	6.667	2.939	2.269	0.140
T ₃ – T ₄	3.000	2.939	10.21	1.000

3.3. Dosificación óptima para la disminución de la turbiedad

Los mejores resultados de disminución de la turbiedad se obtuvieron a concentraciones bajas de aluminio (Figura 4). Las dosis óptimas para la disminución de turbiedad se lograron con T1 (0.2 g Al³⁺ L⁻¹, 61.35%) y T2 (0.4 g Al³⁺ L⁻¹, 60.80%). Estos tratamientos alcanzaron las mayores eficiencias, destacando la viabilidad del proceso a bajas concentraciones de coagulante.

Figura 4*Porcentaje de disminución promedio de la turbiedad por coagulación-floculación*

IV. DISCUSIÓN

La caracterización fisicoquímica del lixiviado del botadero controlado La Pushura revela que se trata de un efluente maduro, con un pH ligeramente alcalino (8.27), alta conductividad eléctrica (9.69 mS cm^{-1}), elevada concentración de sólidos totales disueltos ($4\ 850 \text{ mg L}^{-1}$), y una turbiedad significativa (733 NTU). Estos resultados son consistentes con las características reportadas para lixiviados de rellenos sanitarios de más de 10 años de operación, donde los procesos de estabilización biológica y química predominan (Miao *et al.*, 2019; Pazoki y Ghasemzadeh, 2020). El pH alcalino observado coincide con estudios como el de Marañón *et al.* (2010), quienes reportaron un pH de 8.3 en lixiviados maduros en España, y el de Melo *et al.* (2023), con un pH de 8.1 en Brasil. Este comportamiento puede atribuirse a la disminución de ácidos orgánicos volátiles debido a la degradación anaeróbica avanzada, lo que eleva el pH. Sin embargo, la conductividad eléctrica (9.69 mS cm^{-1}) es menor que los valores reportados por Djefal *et al.* (2019) en Argelia (90.3 mS cm^{-1}), lo que podría deberse a diferencias en la composición de los RSM, las condiciones climáticas locales, o la menor dilución por precipitaciones en el caso de La Pushura. La turbiedad inicial (733 NTU) es superior a los 432 NTU reportados por Marañón *et al.* (2010) y los 692 NTU de Barrantes (2020) para el mismo botadero, lo que sugiere una mayor carga de partículas coloidales, posiblemente influenciada por las condiciones tropicales de la ciudad de Jaén, caracterizadas por alta precipitación que favorece la lixiviación de materiales finos (Costa *et al.*, 2019).

El proceso de coagulación-floculación con sulfato de aluminio logró una disminución promedio de la turbiedad del 53.94%, con un rango de 37.56% (T4: $0.8 \text{ g Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$) a 61.35% (T1: $0.2 \text{ g Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$). Estos resultados, aunque significativos, son inferiores a los reportados en otros estudios, como el 89.5% de Taoufik *et al.* (2018) en Marruecos, el 94.4% de Ghafari *et al.* (2009) en Malasia, el 95.3% de Cuichán (2022) en Ecuador, y hasta el 99.9% de Marañón *et al.* (2010) en España. Esta variación puede explicarse por varios factores: primero, la composición del lixiviado de La Pushura, con una alta carga de sólidos disueltos y materia orgánica recalcitrante, podría haber limitado la eficiencia del coagulante, ya que los lixiviados maduros tienden a contener compuestos más resistentes a la coagulación; segundo, las condiciones experimentales, como el tiempo de sedimentación (60 min) y las velocidades de agitación (180 rpm en coagulación y 40 rpm en floculación), podrían no haber sido óptimas para maximizar la formación de flóculos en este lixiviado. Estudios como el de Amokrane *et*

al., (1997), sugieren que ajustes en los tiempos y velocidades de mezcla pueden mejorar significativamente la remoción de turbiedad. Además, la alta turbiedad inicial (733 NTU) representa un desafío mayor en comparación con lixiviados de menor turbiedad inicial, como los 432 NTU de Marañón *et al.* (2010).

Un hallazgo notable es la mayor eficiencia de las dosificaciones bajas (0.2 y 0.4 g Al³⁺ L⁻¹) frente a las más altas (0.6 y 0.8 g Al³⁺ L⁻¹). Este resultado, también reportado por Djefal *et al.* (2019), puede atribuirse a la reversión de carga coloidal, donde un exceso de coagulante provoca la estabilización de partículas debido a una sobrecarga de iones Al³⁺, impidiendo la formación de flóculos. La correlación negativa significativa ($\rho = -0.930$, $p < 0.001$) entre la dosis de coagulante y la disminución de turbiedad respalda este análisis, considerando que dosis más bajas son más efectivas en este contexto. Este resultado tiene implicaciones prácticas importantes, ya que el uso de dosis menores reduce los costos asociados con el coagulante y minimiza la generación de lodos, un subproducto del proceso que requiere manejo adicional (Aziz *et al.*, 2023).

Desde una perspectiva teórica, los resultados contribuyen al conocimiento sobre la aplicación de la coagulación-floculación en lixiviados de botaderos en lugares tropicales y en desarrollo, como el de Jaén. La identificación de una dosificación óptima de 0.2 g Al³⁺ L⁻¹ no solo valida la viabilidad técnica del proceso, sino que también destaca su sostenibilidad económica, un factor crítico en regiones con limitaciones presupuestarias para la gestión de residuos (Kaza y Bhada-Tata, 2018). Comparado con estudios previos, esta investigación aporta datos específicos sobre el tratamiento de lixiviados en un botadero controlado en una región tropical en Perú, donde las condiciones climáticas y la composición de los residuos difieren de las reportadas en contextos europeos o asiáticos; por ejemplo, la alta precipitación en Jaén incrementa la generación de lixiviado, lo que podría explicar la mayor turbiedad inicial observada en comparación con estudios en climas más secos, como el de Djefal *et al.* (2019). En términos de implicaciones prácticas, este estudio demuestra que el proceso de coagulación-floculación con sulfato de aluminio es una alternativa viable para la gestión de lixiviados en el botadero La Pushura, especialmente considerando su bajo costo relativo frente a tecnologías más avanzadas, como la ósmosis inversa o los procesos de oxidación avanzada (Torretta *et al.*, 2017). La dosificación óptima identificada (0.2 g Al³⁺ L⁻¹) permite una reducción significativa de la turbiedad, mejorando la calidad del lixiviado antes de su disposición final o tratamiento

secundario. Esto es particularmente relevante para la Municipalidad Provincial de Jaén, donde la infraestructura para el tratamiento de lixiviados es limitada.

La implementación de este proceso podría mitigar el impacto ambiental del lixiviado, reduciendo la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, un problema crítico señalado por (Baderna *et al.*, 2019). Sin embargo, el estudio presenta varias limitaciones que deben considerarse: primero, la caracterización y los ensayos se realizaron en condiciones de laboratorio, lo que podría no reflejar completamente el comportamiento del lixiviado en un sistema de tratamiento a escala real, donde factores como la variabilidad estacional, la heterogeneidad del lixiviado y las condiciones operativas pueden influir en los resultados (Pazoki y Ghasemzadeh, 2020); segundo, el estudio se centró exclusivamente en la turbiedad, sin evaluar otros parámetros críticos como la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda biológica de oxígeno (DBO) o la presencia de metales pesados, que son igualmente importantes para determinar la calidad del efluente tratado (Abdel-Shafy *et al.*, 2024); tercero, el uso de sulfato de aluminio genera lodos que requieren disposición adecuada, un aspecto no abordado en este estudio. Finalmente, la falta de un análisis de costos detallado limita la capacidad de evaluar la viabilidad económica a gran escala.

Para futuras investigaciones, se recomienda explorar la combinación de la coagulación-floculación con otros procesos, como la oxidación avanzada o la adsorción con carbón activado, para mejorar la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos, como sugieren de Melo *et al.* (2023). También sería valioso realizar ensayos a escala piloto para validar los resultados en condiciones más cercanas a las reales, considerando variaciones estacionales y la dinámica del botadero. Además, se sugiere investigar coagulantes alternativos, como cloruro férrico o coagulantes naturales (por ejemplo, almidón de yuca, como en Ortiz *et al.*, 2018), que podrían ser más sostenibles y reducir la generación de lodos.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El lixiviado generado en el botadero controlado La Pushura tuvo el pH (8.27) ligeramente alcalino, la carga de sales medida como CE (9.69 mS cm^{-1}) y NaCl (17.7 %) fue significativa. La turbiedad fue 733 NTU y, los STD se midieron en $4\,850 \text{ mg L}^{-1}$ incumpliendo con lo establecido en el D. S. 004-2017-MINAM ($2\,000 \text{ mg L}^{-1}$), responsables del elevado color aparente ($41\,700 \text{ UCV-Pt-Co}$).
- La disminución media de la turbiedad del lixiviado fue 53.94 %. La disminución promedio mínima fue 37.56 % y sucedió con el T4 ($0.8 \text{ g Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$). La disminución promedio máxima fue 61.35 % y ocurrió bajo las condiciones del T1 ($0.2 \text{ g Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$).
- Las dosificaciones óptimas se establecieron bajo las condiciones del T1 ($0.2 \text{ g Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$) y T2 ($0.4 \text{ g Al}^{3+} \text{ L}^{-1}$), donde se alcanzaron las máximas eficiencias de disminución de turbiedad.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda a la Municipalidad Provincial de Jaén considerar al proceso de coagulación-floculación como una alternativa viable de solución en el tratamiento de lixiviados en el botadero controlado La Pushura.
- Se recomienda a los tesisistas de las carreras profesionales afines a ciencias ambientales a desarrollar investigación de este tipo para generar conocimiento científico en la gestión de lixiviados mediante la implementación de metodologías analíticas y tecnológicas eficientes.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Shafy, H. I., Ibrahim, A. M., Al-Sulaiman, A. M., y Okasha, R. A. (2024). Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(1), 102293. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102293>
- Addy, R., Kalamdhad, A., y Goud, V. V. (2023). Insight on the prevalence of pathogens present in the municipal solid waste of sanitary landfills, dumpsites, and leachate. In K. Huang, S. A. Bhat, y G. Cui (Eds.), *Fate of Biological Contaminants During Recycling of Organic Wastes* (pp. 279–295). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95998-8.00006-6>
- Agunbiade, M. O., Pohl, C. H., y Ashafa, A. O. T. (2016). A review of the application of bioflocculants in wastewater treatment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(4), 1381–1389. <https://doi.org/10.15244/pjoes/61063>
- Amokrane, A., Comel, C., y Veron, J. (1997). Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation. *Water Research*, 31(11), 2775–2782. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00147-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00147-4)
- Arias, J. L. (2020). *Proyecto de tesis. Guía para la elaboración* (1st ed.). Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú.
- Aziz, H. A., Ramli, S. F., y Hung, Y.-T. (2023). Physicochemical technique in municipal solid waste (MSW) landfill leachate remediation: A review. *Water*, 15(6), 1249. <https://doi.org/10.3390/w15061249>
- Baderna, D., Caloni, F., y Benfenati, E. (2019). Investigating landfill leachate toxicity in vitro: a review of cell models and endpoints. *Environment International*, 122, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.024>
- Baettker, E. C., Kozak, C., Knapik, H. G., y Aisse, M. M. (2020). Applicability of conventional and non-conventional parameters for municipal landfill leachate characterization. *Chemosphere*, 251, 126414. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126414>
- Barrantes Salazar, N. F. (2020). *Remoción de parámetros fisicoquímicos del lixiviado del botadero controlado “La Pushura”, mediante proceso de oxidación avanzada, Jaén, Cajamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén]. <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/183>
- Borba, F. H., Leichtweis, J., Bueno, F., Pellenz, L., Inticher, J. J., y Seibert, D. (2019). Pollutant removal and acute toxicity assessment (*Artemia salina*) of landfill leachate treated by

- photo-Fenton process mediated by oxalic acid. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.01.017>
- Chen, Y.-C., y Wang, C.-T. (2017). Municipal solid waste (MSW) incineration's potential contribution to electricity production and economic revenue in Taiwan. *Journal of Taiwan Energy*, 4(1), 93–106.
- Costa, A. M., de Souza Marotta Alfaia, R. G., y Carbonelli Campos, J. (2019). Landfill leachate treatment in Brazil – An overview. *Journal of Environmental Management*, 232, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.006>
- Cuichán Ango, J. I. (2022). *Tratabilidad de lixiviados sanitarios : Tratamiento de lixiviados del relleno sanitario "Romerillos" del cantón Mejía, provincia de Pichincha, mediante coagulación-floculación con cloruro férrico* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23015>
- De Melo, J., de Alencar, T., de Sousa, D. L., Carvalho, R., Araújo, M. V., Alves, O. L., Guimarães, J. R., Nolasco, M. A., y Rosa, A. H. (2023). Effect of the association of coagulation/flocculation, hydrodynamic cavitation, ozonation and activated carbon in landfill leachate treatment system. *Scientific Reports*, 13(9502). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36662-8>
- Dirección de Desarrollo Ambiental. (2015). *Plan integral de gestión ambiental de residuos sólidos PIGARS JAÉN*. Municipalidad Provincial de Jaén.
- Djeffal, K., Bouranene, S., Fievet, P., Déon, S., y Gheid, A. (2019). Treatment of controlled discharge leachate by coagulation-flocculation: influence of operational conditions. *Separation Science and Technology*, 56(1), 168–183. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1708114>
- EPA. (2013). *Landfill manuals. Landfill monitoring* (2nd ed.). <https://www.epa.ie/publications/licensing--permitting/waste/landfill-manual---guidance-note-of-landfill-monitoring.php>
- Flores-Ruiz, E., Miranda-Navales, M. G., y Villasís-Keever, M. Á. (2017). El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. *Rev Alerg. Mex*, 64(3), 364–370. <https://doi.org/10.29262/ram.v64i3.304>
- García-Guaita, F., González-García, S., Villanueva-Rey, P., Moreira, M. T., y Feijoo, G. (2018). Integrating urban metabolism, material flow analysis and life cycle assessment in the environmental evaluation of Santiago de Compostela. *Sustainable Cities and Society*, 40, 569–580. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.027>
- Gerencia de Gestión y Desarrollo Ambiental. (2017). *Estudio de caracterización de residuos*

- sólidos municipales del distrito de Jaén - 2017*. Municipalidad Provincial de Jaén.
- Ghafari, S., Aziz, H. A., Isa, M. H., y Zinatizadeh, A. A. (2009). Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2–3), 650–656. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.090>
- Hamid, H., Li, L. Y., y Grace, J. R. (2018). Review of the fate and transformation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in landfills. *Environmental Pollution*, 235, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.030>
- Kaza, S., y Bhada-Tata, P. (2018). *Decision maker's guides for solid waste management technologies. Urban development series knowledge papers*. World Bank. <https://hdl.handle.net/10986/31694>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., y Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. The World Bank.
- Marañón, E., Castrillón, L., Fernández-Nava, Y., y Fernández-Méndez, A. (2010). Colour, turbidity and COD removal from old landfill leachate by coagulation-flocculation treatment. *Waste Management y Research*, 28, 731–737. <https://doi.org/10.1177/0734242X09352504>
- Meena, M. D., Dotaniya, M. L., Meena, B. L., Rai, P. K., Antil, R. S., Meena, H. S., Meena, L. K., Dotaniya, C. K., Meena, V. S., Ghosh, A., Meena, K. N., Singh, A. K., Meena, V. D., Moharana, P. C., Meena, S. K., Srinivasarao, C., Meena, A. L., Chatterjee, S., Meena, D. K., ... Meena, R. B. (2023). Municipal solid waste: Opportunities, challenges and management policies in India: A review. *Waste Management Bulletin*, 1(1), 4–18. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.04.001>
- Miao, L., Yang, G., Tao, T., y Peng, Y. (2019). Recent advances in nitrogen removal from landfill leachate using biological treatments – A review. *Journal of Environmental Management*, 235, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.057>
- MINAM. (2017). *Cifras ambientales 2017*. Ministerio del Ambiente. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/cifras-ambientales-2017>
- MINAM. (2017). *Guía para el Manejo y Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios*. Ministerio del Ambiente.
- MINAM. (2021). *Protocolo de Monitoreo de la Calidad del Agua*. Ministerio del Ambiente.
- Mohammadi, M., Jämsä-Jounela, S.-L., y Harjunoski, I. (2019). Optimal planning of municipal solid waste management systems in an integrated supply chain network. *Computers y Chemical Engineering*, 123, 155–169.

<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.12.022>

- Mohd-Salleh, S. N. A., Mohd-Zin, N. S., Othman, N., Mohd-Amdan, N. S., y Mohd-Shahli, F. (2018). Dosage and pH optimization on stabilized landfill leachate via coagulation-flocculation process. *MATEC Web of Conferences*, 250(06007). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825006007>
- Ortiz, V., López, G., Torres, C., y Pampillón, L. (2018). Almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) como coadyuvante en la coagulación floculación de aguas residuales domésticas. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias: CIBA*, 7(13), 18-46. <https://doi.org/10.23913/ciba.v7i13.73>
- Paramasivam, G., Rao, I. R., y Prabhu, M. A. (2024). Normality testing in statistics: what clinician–researchers should know. *Heart Failure Journal of India*, 2(1), 55–60. <https://doi.org/10.4103/HFJI.HFJI>
- Pazoki, M., y Ghasemzadeh, R. (2020). *Municipal landfill leachate management*. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-50212-6>
- Rambabu, K., Banat, F., Pham, Q. M., Ho, S.-H., Ren, N.-Q., y Show, P. L. (2020). Biological remediation of acid mine drainage: review of past trends and current outlook. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.es.2020.100024>
- Ren, X., Xu, X., Xiao, Y., Chen, W., y Song, K. (2019). Effective removal by coagulation of contaminants in concentrated leachate from municipal solid waste incineration power plants. *Science of the Total Environment*, 685, 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.392>
- Saritha, V., Srinivas, N., y Vuppala, N. V. S. (2017). Analysis and optimization of coagulation and flocculation process. *Applied Water Science*, 7, 451–460. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0262-y>
- Taoufik, M., Elmoubarki, R., Moufti, A., Elhalil, A., Farnane, M., Machrouhi, A., Abdennouri, M., Qourzal, S., y Barka, N. (2018). Treatment of landfill leachate by coagulation-flocculation with FeCl₃: process optimization using Box–Behnken design. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 9(8), 2458–2467. <http://www.jmaterenvironsci.com/>
- Teng, C., Zhou, K., Peng, C., y Chen, W. (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water Research*, 203, 117525. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525>
- Torretta, V., Ferronato, N., Katsoyiannis, I. A., Tolkou, A. K., y Airoidi, M. (2017). Novel and

- conventional technologies for landfill leachates treatment: A review. *Sustainability*, 9(1), 1–39. <https://doi.org/10.3390/su9010009>
- Tripathy, B. K., Kumar, M. (2019). Sequential coagulation/flocculation and microwave-persulfate processes for landfill leachate treatment: Assessment of bio-toxicity, effect of pretreatment and cost-analysis. *Waste Management*, 85, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.014>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, y Population Division. (2019). *World Population Prospects 2019: Data Booklet (ST/ESA/SER.A/424)*.
- Verma, M., y Kumar, R. N. (2016). Can coagulation–flocculation be an effective pre-treatment option for landfill leachate and municipal wastewater co-treatment? *Perspectives in Science*, 8, 492–494. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.05.005>

AGRADECIMIENTO

A:

Dios, por brindarme la fortaleza para recorrer este camino.

Mi familia por ser mi soporte y apoyo incondicional cuándo intenté rendirme y mi abuela por ser una inspiración. Esta meta alcanzada es el reflejo de cada granito de arena de apoyo económico y emocional por cada uno de ellos.

Así mismo un agradecimiento especial para nuestra asesora Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo y a nuestros amigos el Mg. Jorge Antonio Delgado Soto y el Ing. Noymer Franklin Barrantes Salazar.

Edson Córdova Saavedra

Mis padres, Madeleine y Gaudencio que son mis guías e inspiración.

Mi hermano Alexander, mi confidente.

Mis amigos, mi alegría.

Gracias por ser mi familia en todos los sentidos. Este logro es un reflejo de nuestro cariño mutuo y de todo lo que hemos compartido.

Jhon Anthony Díaz Llamo

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación se lo dedico a mis tíos por creer en mí y darme la motivación diaria para luchar por mis sueños, a mis primos por hacerme creer que llegare a conseguir cosas grandes y recordarme que no tengo límites.

Edson Córdova Saavedra


El presente trabajo de investigación está dedicado con todo mi corazón a mis padres, pues sin ellos no hubiera logrado alcanzar tantas metas. Sus bendiciones a diario me han dado la fuerza y llevado por el buen camino. Por eso y muchas más cosas, este trabajo es una ofrenda a su paciencia y amor. Los amo.

Jhon Anthony Díaz Llamo

ANEXOS

Figura 5

Reporte de caracterización fisicoquímica de lixiviado



**ANÁLISIS QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO
DE SUELOS Y AGUAS
PARA LA AGRICULTURA Y CONSTRUCCIÓN**

**oikoslab
SAC**

ENSAYO DE AGUAS RESIDUALES OIKOSLAB S.A.C. N°2178-2024

Fecha de recepción : 09-10-2024
 Responsable del ensayo : Ing. Químico Jorge Antonio Delgado Soto
 Institución : Universidad Nacional de Jaén
 Escuela Profesional : Ingeniería Forestal y Ambiental
 Responsable de la muestra : Bach. Edson Córdova Saavedra
 Bach. Jhon Anthony Díaz Llamo
 Título de la Investigación :

APLICACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN PARA DISMINUIR LA TURBIEDAD DEL LIXIVIADO DEL BOTADERO CONTROLADO LA PUSHURA, EN JAÉN, CAJAMARCA

I. Datos de la muestra

Ubicación : Botadero Controlado "La Pushura"
 Tipo de muestra : Lixiviado
 Distrito : Jaén
 Provincia : Jaén
 Región : Cajamarca



II. Datos del ensayo

Tipo : Caracterización fisicoquímica


III. Resultados

Parámetro	Unidad	Expresión	Valor
Potencial de iones hidrógeno	Unidades de pH	Unidades de pH	8.27
Temperatura	Grados Celsius	°C	28.70
Conductividad eléctrica	Unidades de Conductividad Eléctrica	mS/cm	9.69
Color	Unidades de Color	UCV-Pt-Co	41700
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	ppm STD	4850
Porcentaje de Cloruro de Sodio	Porcentaje	%	17.70
Turbiedad	Unidades de Turbiedad Nefelométricas	NTU	733

Psje. San Pedro #113
 Morro Solar Alto - Jaén, Cajamarca.
 Cel.: 970 911 920
 R.U.C.: 20487352072

Jorge A. Delgado Soto
 ING. RESPONSABLE
 CIP. 60757





ANÁLISIS QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO
DE SUELOS Y AGUAS
PARA LA AGRICULTURA Y CONSTRUCCIÓN

oikoslab
SAC

IV. Descripción de las metodologías empleadas

Medición del color

Método Estándar Platino-Cobalto espectrofotométrico, adaptado al National Council for Air and Stream Improvement (NCASI). Norma: SMEWW. 20th ed. (2120 C) modificado.

Medición de conductividad eléctrica

Medición utilizando el equipo multiparámetro marca HANNA HI-2550, calibrado con solución HI7030, 12885 μcm . Norma: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B, 22nd ed. Título Conductivity. Laboratory Method.

Medición de la turbiedad

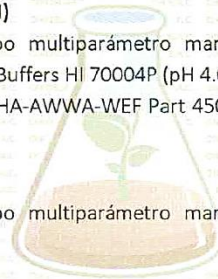
Norma: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 22nd ed. Turbidity. Título: Nephelometric Method.

Potencial de iones hidrógeno (pH)

Medición directa con el equipo multiparámetro marca HANNA HI-2550, previamente calibrado en tres puntos con los Buffers HI 70004P (pH 4.01), HI 70007P (pH 7.01) y HI 70010 (pH 10.01). Norma: SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 22nd ed. Título: pH Value. Electrometric Method.

Sólidos totales disueltos

Medición directa con el equipo multiparámetro marca HANNA HI-2550, previamente calibrado.



oikoslab



José A. Delgado Soto
ING. RESPONSABLE
CIP. 56757



Psje. San Pedro #113
Morro Solar Alto - Jaén, Cajamarca.
Cel.: 970 911 920
R.U.C.: 20487352072

Figura 6

Informe de ensayo de turbiedad postratamiento



**ANÁLISIS QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO
DE SUELOS Y AGUAS
PARA LA AGRICULTURA Y CONSTRUCCIÓN**

oikoslab
SAC

ENSAYOS DE AGUAS RESIDUALES OIKOSLAB S.A.C. N°2179-2024

Fecha de recepción : 09-10-2024
Responsable del ensayo : Ing. Químico Jorge Antonio Delgado Soto
Institución : Universidad Nacional de Jaén
Escuela Profesional : Ingeniería Forestal y Ambiental
Responsable de la muestra : Bach. Edson Córdova Saavedra
Bach. Jhon Anthony Díaz Llamo

Título de la Investigación :

**APLICACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN PARA DISMINUIR LA TURBIEDAD
DEL LIXIVIADO DEL BOTADERO CONTROLADO LA PUSHURA, EN JAÉN, CAJAMARCA**

I. Datos de la muestra



Ubicación : Botadero Controlado "La Pushura"
Tipo de muestra : Lixiviado tratado por coagulación-floculación
Distrito : Jaén
Provincia : Jaén
Región : Cajamarca

II. Datos del ensayo


Tipo : Medición de la turbiedad
Unidades de medición : NTU
Metodología empleada : SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B,
22nd ed. Turbidity. Título: Nephelometric Method.

III. Resultados

Repetición	Tratamiento			
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
R ₁	278	280	332	439
R ₂	287	292	317	468
R ₃	285	290	317	466

Jorge A. Delgado Soto
ING. RESPONSABLE
CIP. 66757



Psje. San Pedro #113
Morro Solar Alto - Jaén, Cajamarca.
Cel.: 970 911 920
R.U.C.: 20487352072

Figura 7

Georreferenciación del punto de muestreo



Figura 8

Toma de muestra y rotulado de lixiviado en el botadero controlado La Pushura



Figura 9

Pesado del coagulante-floculante sulfato de aluminio

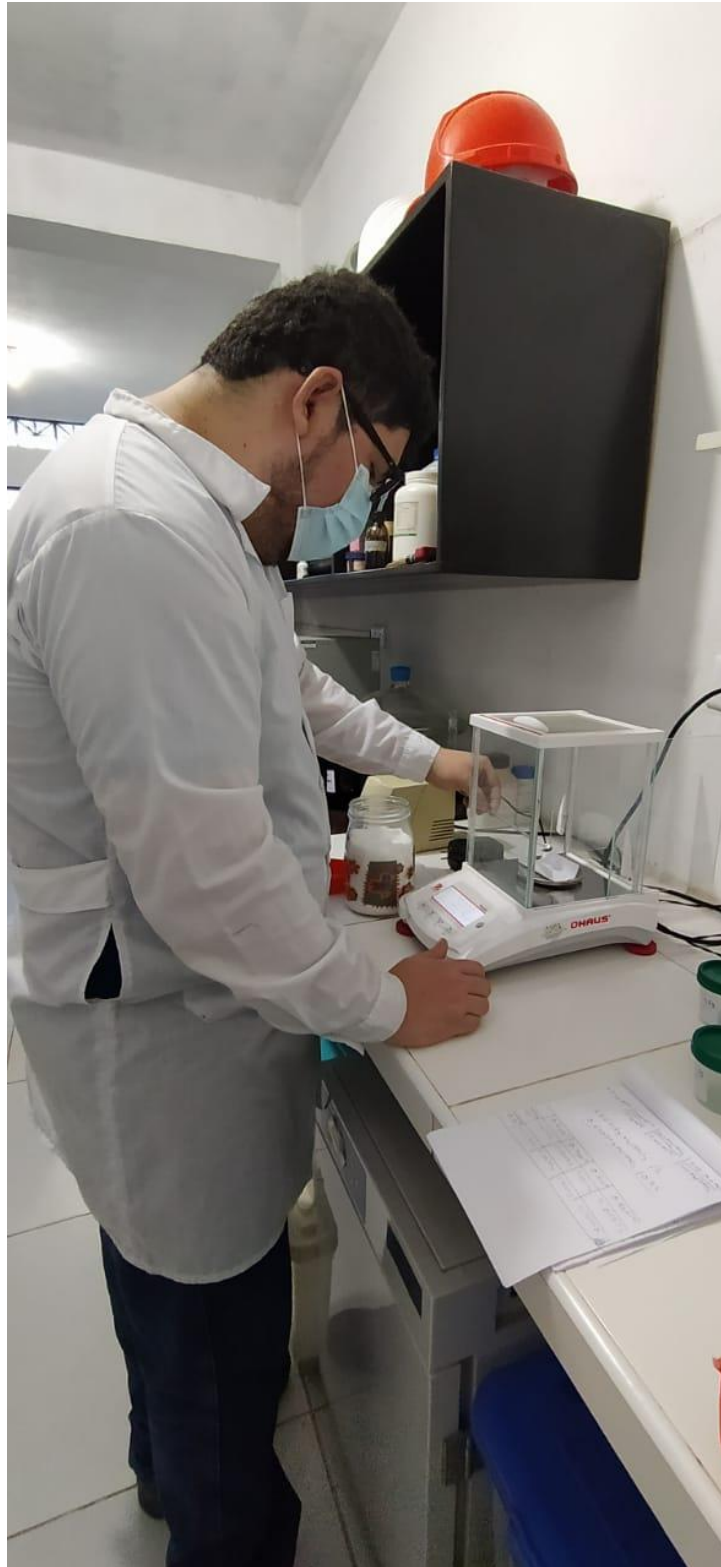


Figura 10

Proceso de coagulación-floculación utilizando el equipo Test de Jarras



Figura 11

Correlación de Spearman en SPSS 25

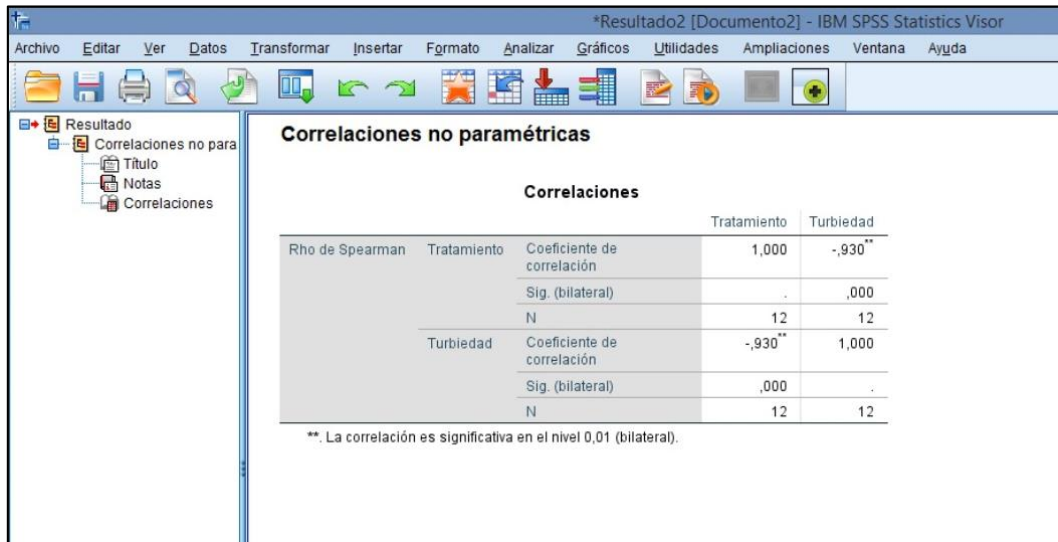


Figura 12

Prueba de normalidad – Shapiro – Wilk en SPSS 25

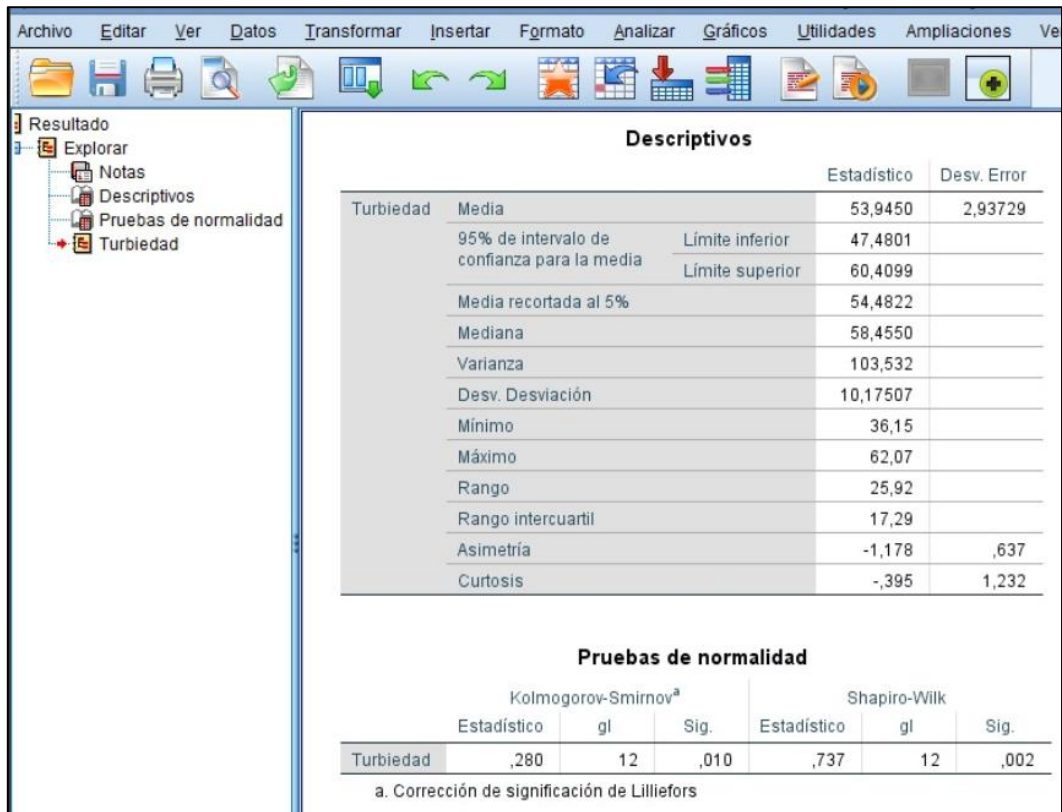


Figura 13

Prueba de hipótesis Kruskal-Walis en SPSS 25

