

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

TRATABILIDAD DE LIXIVIADOS

**TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO
“ROMERILLOS” DEL CANTÓN MEJÍA, PROVINCIA DE PICHINCHA,
MEDIANTE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN CON CLORURO
FÉRRICO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL**

JEOMARA IVANOBA CUICHÁN ANGO

jeomara.cuichan@epn.edu.ec

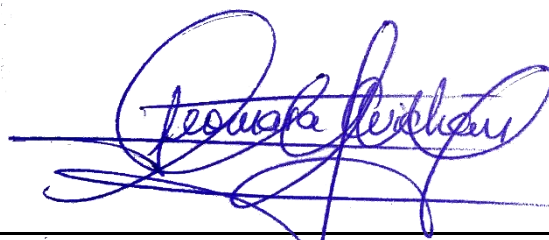
DIRECTOR: Ph. D. ANA LUCÍA BALAREZO AGUILAR

ana.balarezo@epn.edu.ec

Quito, septiembre 2022

CERTIFICACIONES

Yo, JEOMARA IVANOBA CUICHÁN ANGO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



JEOMARA IVANOBA CUICHÁN ANGO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JEOMARA IVANOBA CUICHÁN ANGO, bajo mi supervisión.

ANA LUCÍA BALAREZO AGUILAR
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JEOMARA IVANOBA CUICHÁN ANGO

Ph.D ANA LUCÍA BALAREZO AGUILAR

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía y consuelo en las diferentes etapas de mi vida. Su infinita bondad me ha permitido cumplir cada una de mis metas con mucha sabiduría y conocimiento. Además, gracias a él tengo la oportunidad de disfrutar junto a las personas que más amo.

A mis amados padres por su amor, apoyo incondicional y valores inculcados. A pesar de las adversidades han guiado mi camino con paso firme y han sido soporte de mis innumerables caídas.

A mi hermano por ser mi mejor amigo y confidente, además, de demostrarme su cariño incondicional.

A mis abuelitos por ser un ejemplo de lucha y perseverancia ante las adversidades.

A mis tíos y primos por su compañía, consejos y apoyo brindado.

Jeomara

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la fortaleza y sabiduría necesaria para cumplir cada una de mis metas a pesar de las diversas dificultades que se han presentado.

A mis padres Marcelo C. y Marcela A., me siento afortunada de tenerlos a mi lado, Dios no pudo escoger a mejores personas en el mundo. El hecho de que hoy me encuentre presentando este proyecto se lo debo a ustedes, quienes se han sacrificado y esforzado por darme siempre lo mejor. Agradezco su amor, apoyo y confianza incondicional, así como también, el respaldado en cada uno de mis aciertos y caídas.

A mi único y querido hermano David C., agradezco la paciencia y compañía en cada una de las diferentes etapas de nuestra vida.

A mi directora de TIC, la doctora Ana Lucía Balarezo, quien con sus valiosos conocimientos me ha apoyado y guiado en la ejecución de este trabajo, así como también, agradezco la paciencia y el respaldo constante para cumplir con los objetivos propuestos.

A la Escuela Politécnica Nacional, por abrirme las puertas y darme la oportunidad de estudiar mi carrera. También, agradezco a los diferentes docentes que componen la Carrera de Ingeniería Ambiental, gracias infinitas por cada una de sus enseñanzas, conocimientos y experiencias; de ustedes aprendí más de lo que pude esperar y estoy segura de que me servirá para desarrollarme en mi vida profesional.

A todas aquellas personas que colaboraron desinteresadamente para llevar a cabo este proyecto, en especial, al GAD Mejía quien permitió el acceso a los predios del relleno sanitario “Romerillos” para la recolección de muestras y ejecución de este proyecto. Además, quiero agradecer al inge Jairo J. del laboratorio LDIA, quien aportó con indicaciones valiosas para la ejecución de diferentes análisis que requería el proyecto.

A Cristian C., gracias por ser un excelente compañero de TIC, sin duda alguna fue una de las mejores experiencias que pude compartir contigo, tu ayuda fue fundamental para lograr concluir este trabajo. Además, agradezco tu amistad, paciencia y apoyo constante en las últimas facetas de nuestra carrera universitaria.

Finalmente, quiero agradecer a mis amigas: Verito y Glorita, con quienes he compartido buenos y malos momentos en el transcurso de nuestra carrera universitaria, gracias a ustedes conocí el verdadero valor de la amistad y espero que este lazo siga manteniéndose por mucho tiempo más.

A mis compañeros de clase, gracias por la oportunidad de conocerlos y deseo de todo corazón grandes éxitos en su vida profesional.

Jeomara

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XIII
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XVI
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Alcance	3
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Los Lixiviados	4
1.4.2 Formación de los lixiviados.....	5
1.4.3 Composición de los lixiviados	7
1.4.4 Tipos de lixiviados.....	11
1.4.5 Parámetros físicos-químicos de los lixiviados.....	12
1.4.5.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO)	12
1.4.5.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅).....	13
1.4.5.3 Índice de biodegradabilidad	13
1.4.5.4 Potencial de hidrógeno	13
1.4.5.5 Turbidez.....	14
1.4.5.6 Conductividad eléctrica	14
1.4.5.7 Sólidos	14
1.4.5.8 Metales pesados.....	15
1.4.5.9 Nitrógeno	17
1.4.6 Tratamiento de lixiviados	17
1.4.6.1 Recirculación de lixiviados.....	18
1.4.6.2 Evaporación de lixiviados.....	18
1.4.6.3 Tratamiento aeróbico	18
1.4.6.4 Tratamiento anaeróbico	19

1.4.6.5	Coagulación – floculación	20
1.4.6.5.1	Coagulantes y floculantes.....	21
1.4.6.6	Oxidación química.....	22
1.4.6.7	Intercambio iónico	22
1.4.6.8	Adsorción	22
1.4.6.9	Ósmosis inversa.....	23
1.4.7	Prueba de jarras (Jar Test)	23
1.4.8	Normativa con respecto a lixiviados.....	24
2	METODOLOGÍA	26
2.1	Área de Estudio.....	26
2.1.1	Ubicación geográfica y aspectos físicos del relleno sanitario “Romerillos”	26
2.1.2	Generalidades del área de estudio	27
2.2	Fase de campo	28
2.2.1	Visitas técnicas	28
2.3	Fase de laboratorio	29
2.3.1	Caracterización del lixiviado del relleno sanitario “Romerillos”	29
2.3.1.1	Determinación de pH	31
2.3.1.2	Determinación de turbidez	31
2.3.1.3	Determinación de conductividad	31
2.3.1.4	Determinación de dureza total	31
2.3.1.5	Determinación de dureza cálcica	32
2.3.1.6	Determinación de DQO	32
2.3.1.7	Determinación de DBO	33
2.3.1.8	Determinación de sólidos.....	34
2.3.1.9	Determinación de cloruros	35
2.3.1.10	Determinación de nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos.....	36
2.3.1.11	Determinación de fósforo total y fosfato.....	36
2.3.1.12	Determinación de metales pesados (Cu, Cr ⁶⁺ , Al, Zn y Fe) ..	37
2.3.2	Tratamiento de lixiviados	37
2.3.2.1	Parámetros para el monitoreo del tratamiento	37
2.3.2.2	Preparación de FeCl ₃ y PAC.....	37
2.3.2.3	Prueba de jarras – Proceso de coagulación y floculación.....	39
2.3.2.3.1	Determinación de pH óptimo	41
2.3.2.3.2	Determinación de dosis óptima de coagulante	41

2.3.2.3.3	Determinación de dosis óptima de floculante	42
2.3.2.3.4	Determinación de la velocidad óptima de coagulación ..	42
2.3.2.3.5	Determinación del gradiente y tiempo óptimo de velocidad de floculación	43
2.3.2.3.6	Determinación del tiempo de sedimentación	44
3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	45
3.1	Características iniciales del lixiviado crudo	45
3.2	Resultados del pH óptimo de coagulación	46
3.3	Resultados de dosis óptima de coagulante.....	47
3.4	Resultados de dosis óptima de floculante	48
3.5	Resultados para la velocidad óptima de coagulación	50
3.6	Resultados para el gradiente y tiempo óptimo de floculación	51
3.7	Resultados para el tiempo óptimo de sedimentación	53
3.8	Resultados de la eficiencia del tratamiento de coagulación-floculación	54
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
4.1	Conclusiones.....	58
4.2	Recomendaciones.....	59
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	ANEXOS	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características principales de lixiviados jóvenes y lixiviados viejos.....	12
Tabla 2. Relación de biodegradabilidad.....	13
Tabla 3. Descripción de los metales pesados más frecuentes en los lixiviados	16
Tabla 4. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público y cuerpos de agua dulce.....	25
Tabla 5. Coordenadas UTM del relleno sanitario “Romerillos”	26
Tabla 6. Métodos de ensayo para análisis de laboratorio.....	30
Tabla 7. Materiales y equipos para análisis de laboratorio	30
Tabla 8. Volumen de muestra en función de la DBO ₅ estimada	34
Tabla 9. Datos para la solución de FeCl ₃	38
Tabla 10. Datos para la solución de PAC	39
Tabla 11. Características iniciales del lixiviado para las pruebas de tratabilidad.....	45
Tabla 12. Valores obtenidos para la determinación de pH óptimo.....	46
Tabla 13. Valores obtenidos para la determinación de dosis óptima de coagulante	47
Tabla 14. Valores obtenidos para la determinación de dosis óptima de floculante..	49
Tabla 15. Valores obtenidos para la determinación de la velocidad óptima de coagulación.....	50
Tabla 16. Valores obtenidos para la determinación de la velocidad óptima de coagulación.....	52
Tabla 17. Valores obtenidos para la determinación de la velocidad óptima de coagulación.....	53
Tabla 18. Análisis físicos del lixiviado crudo y tratado	55
Tabla 19. Análisis químicos y biológicos del lixiviado crudo y tratado	56
Tabla 20. Análisis de metales en el lixiviado crudo y tratado.....	57
Tabla 21. Condiciones para la prueba de jarras N° 1	77
Tabla 22. Resultados obtenidos en la prueba de jarras N° 1 para pH óptimo de coagulación.....	77
Tabla 23. Condiciones para la prueba de jarras N° 2	78

Tabla 24. Resultados obtenidos en la prueba de jarras N° 2 para dosis óptima de coagulante.....	78
Tabla 25. Condiciones para la prueba de jarras N° 3	79
Tabla 26. Resultados obtenidos en la prueba de jarras N° 3 para dosis óptima de floculante.....	79
Tabla 27. Condiciones para la prueba de jarras N° 4	80
Tabla 28. Resultados obtenidos en la prueba de jarras N° 4 para velocidad de mezcla rápida	80
Tabla 29. Condiciones para la prueba de jarras N° 5	81
Tabla 30. Resultados obtenidos en la prueba de jarras N° 5 para G y t óptimo de floculación	81
Tabla 31. Condiciones para la prueba de jarras N° 6	82
Tabla 32. Resultados obtenidos en la prueba de jarras N° 6 para tiempo óptimo de sedimentación	82
Tabla 33. Parámetros físico - químicos y biológicos y su cumplimiento con el TULSMA	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formación de lixiviados	7
Figura 2. Desarrollo de la composición de lixiviado en un relleno sanitario.....	10
Figura 3. Equipo de prueba de jarras	24
Figura 4. Relleno sanitario "Romerillos" - Ubicación de coordenadas.....	26
Figura 5. Depósito de residuos sólidos urbanos en cubetos	27
Figura 6. Piscina de lixiviados y punto de muestreo.....	28
Figura 7. Recolección de lixiviados por muestreo simple	29
Figura 8. Depósito de basura	67
Figura 9. Recirculación de lixiviados	67
Figura 10. Vista panorámica de las piscinas de lixiviado.....	67
Figura 11. Vista en planta de la piscina N° 1 de lixiviado	68
Figura 12. Vista en planta de la piscina N° 2 de lixiviado	68
Figura 13. Planta de tratamiento de lixiviados.....	68
Figura 14. Caja de control de motor para agitación.....	69
Figura 15. Lixiviado crudo y lixiviado tratado.....	69
Figura 16. Recolección de lixiviados	69
Figura 17. Transporte de lixiviado en bidones de plástico.....	69
Figura 18. Medición de pH	71
Figura 19. Medición de la conductividad	71
Figura 20. Análisis de sólidos.....	71
Figura 21. Preparación de diluciones para los análisis.....	72
Figura 22. Análisis de DQO.....	72
Figura 23. Análisis de nutrientes en el lixiviado.....	72
Figura 24. Análisis de dureza total, dureza cálcica y cloruros	73
Figura 25. Análisis de metales	73
Figura 26. Análisis de DBO ₅	73
Figura 27. Pesaje de FeCl ₃ y PAC para soluciones al 5% y 4%, respectivamente.	74

Figura 28. Primera prueba de tratabilidad (pH óptimo de coagulación)	74
Figura 29. Segunda prueba de tratabilidad (Dosis óptima de coagulante)	75
Figura 30. Tercera prueba de tratabilidad (Dosis óptima de floculante)	75
Figura 31. Valores finales de pH y turbiedad.....	75

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1. Valores de pH vs. Turbiedad.....	47
Gráfica 2. Dosis de FeCl ₃ vs. Turbiedad	48
Gráfica 3. Dosis de PAC vs. Turbiedad	50
Gráfica 4. Mezcla rápida vs. Turbiedad	51
Gráfica 5. G. floculación vs. Turbiedad.....	52
Gráfica 6. Tiempo de sedimentación vs. Volumen sedimentado	54

RESUMEN

Los lixiviados son uno de los problemas ambientales que derivan de la acumulación de residuos sólidos almacenados en rellenos sanitarios o botaderos a cielo abierto. Este contaminante es un líquido desagradable y de olor penetrante, que se genera principalmente por la percolación de aguas lluvia a través de los residuos en proceso de degradación. En general, tienen una elevada carga contaminante y representan un riesgo al medio ambiente y la salud de las personas, si estos no son tratados adecuadamente previo a su destino final.

El presente trabajo de integración curricular tuvo como objetivo realizar el tratamiento de coagulación – floculación del lixiviado del relleno sanitario “Romerillos”, cantón Mejía, provincia de Pichincha, con el fin de determinar el grado de efectividad del uso de FeCl_3 como un coagulante sintético inorgánico alternativo al $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ que también se usa en el tratamiento de aguas residuales.

Se inició con la revisión bibliográfica para conocer el estado del arte en el tema. Posteriormente, se desarrollaron tres visitas técnicas al relleno sanitario “Romerillos” con la finalidad de conocer el proceso de recolección de los lixiviados crudos, su tratamiento en la planta y recolectar muestras del lixiviado.

Seguidamente, las muestras fueron transportadas hacia el laboratorio LDIA de la Escuela Politécnica Nacional y se procedió a realizar los análisis físicos, químicos y biológicos de acuerdo a los procedimientos establecidos en los manuales de *Standard Methods* y HACH para el análisis de agua y aguas residuales.

Para el tratamiento del lixiviado, se realizaron soluciones de FeCl_3 y PAC al 5% y 4%, respectivamente. Posteriormente, en el equipo de prueba de jarras se desarrolló la tratabilidad del lixiviado para determinar: (a) las dosis óptimas del FeCl_3 y PAC, (b) el pH óptimo de coagulación, (c) la velocidad de mezcla rápida, (d) el gradiente y tiempo óptimo de floculación y (e) la velocidad de sedimentación.

Los resultados obtenidos en el ensayo, dieron como resultado, dosis óptimas de 1800 mg/l de FeCl_3 y 1200 mg/l de PAC, un pH óptimo de coagulación de 6.5, velocidad óptima de mezcla rápida de 150 rpm por 60 segundos; un gradiente y tiempo óptimo de floculación de 50 rpm y 20 minutos, respectivamente; y un tiempo de sedimentación de 20 minutos. Los parámetros antes mencionados, presentaron una eficiencia de remoción de la turbiedad del agua superior al 80% y en los demás parámetros de calidad analizados, en promedio sobre el 75 %.

Palabras clave: lixiviado, tratabilidad, contaminación, coagulación-floculación, cloruro férrico.

ABSTRACT

Leachate is one of the environmental problems that derive from the accumulation of solid waste stored in landfills or open-air dumps. This pollutant is an unpleasant liquid with a pungent odor, which is generated mainly by the percolation of rainwater through the waste in the process of degradation. In general, they have a high contaminant load and represent a risk to the environment and people's health, if they are not properly treated prior to their final destination.

The objective of this curricular integration work was to carry out the coagulation - flocculation treatment of the leachate from the "Romerillos" landfill, Mejía canton, Pichincha province, in order to determine the degree of effectiveness of the use of FeCl_3 as an inorganic synthetic coagulant. alternative to $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ which is also used in wastewater treatment.

It began with the bibliographic review to know the state of the art on the subject. Subsequently, three technical visits to the "Romerillos" sanitary landfill were carried out in order to learn about the raw leachate collection process, its treatment at the plant and collect leachate samples.

Next, the samples were transported to the LDIA laboratory of the National Polytechnic School and the physical, chemical and biological analyzes were carried out according to the procedures established in the Standard Methods and HACH manuals for the analysis of water and wastewater.

For the treatment of the leachate, solutions of FeCl_3 and PAC at 5% and 4%, respectively, were made. Subsequently, in the jar test equipment, the treatability of the leachate was developed to determine the optimal doses of FeCl_3 and PAC, the optimal coagulation pH, the fast mixing speed, the gradient and optimal flocculation time, and the sedimentation speed.

The results obtained in the test, gave as a result, optimal doses of 1800 mg/l of FeCl_3 and 1200 mg/l of PAC, an optimal coagulation pH of 6.5, optimal fast mixing speed of 150 rpm for 60 seconds; a gradient and optimal flocculation time of 50 rpm and 20

minutes, respectively; and a settling time of 20 minutes. The parameters mentioned above, presented an efficiency of water turbidity removal higher than 80% and in the other quality parameters analyzed, on average over 75%.

Keywords: leachate, treatability, contamination, coagulation-flocculation, ferric chloride.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, muchas de las actividades que se realizan en el planeta conllevan la generación de residuos sólidos y debido al crecimiento exponencial de la población el problema se ha agravado a tal punto de llegar a ser una de las principales amenazas a la salud y seguridad ambiental, puesto que se ha ido incrementando los volúmenes de generación de residuos y no existen espacios o áreas libres en donde se puedan almacenar correctamente.

En Ecuador, las formas de disposición final de los residuos sólidos son en rellenos sanitarios (35 %) y botaderos a cielo abierto (65%); en las dos opciones la gestión de estas infraestructuras no es apropiada, y periódicamente se generan impactos ambientales al suelo, aguas superficiales y subterráneas, al aire y la salud de las poblaciones ubicadas dentro y fuera de las áreas de influencia.

El problema de los residuos sólidos urbanos no termina con la disposición final en los rellenos sanitarios o botaderos a cielo abierto. La degradación de la basura y la exposición a diferentes factores ambientales, generan otros tipos de problemas que pueden ser igual o peor que los mismos residuos, que en este caso son los lixiviados y la emisión de gas metano, que al no ser controlados, aprovechados o tratados generan un alto impacto en la salud y el ambiente.

Los lixiviados según el TULSMA (2018), son “líquidos que percolan a través de los residuos sólidos y está compuesto por el agua proveniente de precipitaciones pluviales, escorrentías, la humedad de la basura y la descomposición de la materia orgánica que arrastra materiales disueltos y suspendidos”. Por lo tanto, la composición y los efectos nocivos que poseen los lixiviados puede ser variada y el tipo de tratamiento es único y diferente en cada caso, es decir, el tratamiento realizado para un lixiviado joven no va a ser el mismo para un lixiviado maduro puesto que poseen características físico-químicas y contaminantes que los hace diferentes. Además, en el tren de tratamiento de lixiviados puede implementarse uno o varios tratamientos a la vez con la finalidad de disminuir su carga contaminante. Al tratar los lixiviados se pueden reducir impactos significativos en el

ambiente o en la salud de las personas y de esta forma cumplir con los límites máximos permisibles de descarga establecidos en las normativas ambientales de cada país.

Al disminuir la carga contaminante de un lixiviado, facilita que exista un control adecuado de los mismos, evitando que se contaminen recursos como el suelo, el agua y el aire. Por ello, la elección de un esquema de tratamiento de lixiviados ambientalmente óptimo determina la carga sobre los ecosistemas existentes alrededor del vertedero, es decir, las instalaciones de tratamiento de lixiviados son un factor determinante.

Los ensayos de tratabilidad físico-químicos son una alternativa sencilla para determinar las variables óptimas y lograr la mejor calidad del afluente, en términos de remoción de sólidos suspendidos mediante la adición de sustancias químicas conocidas como coagulantes y floculantes, que en este caso de estudio corresponden a FeCl_3 y PAC, respectivamente.

El propósito de este trabajo de integración curricular fue realizar el tratamiento físico-químico (coagulación-floculación), mediante el uso de FeCl_3 como coagulante inorgánico sintético para reducir la turbiedad y otros contaminantes del lixiviado del relleno sanitario, y de esta forma determinar el grado de cumplimiento con los límites máximos permisibles para descargas a cuerpos de agua y redes de alcantarillado establecidos en el Anexo I del Libro VI del TULSMA.

1.1 Objetivo general

Realizar el tratamiento de coagulación – floculación del lixiviado del relleno sanitario Romerillos, cantón Mejía, mediante el ensayo de prueba de jarras, usando FeCl_3 como coagulante inorgánico sintético, para la remoción de turbiedad y otros parámetros físicos, químicos y biológicos que ayuden a determinar el grado de cumplimiento con la normativa ambiental.

1.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar el lixiviado del relleno sanitario Romerillos para determinar los parámetros físicos químicos y biológicos iniciales, previo a los ensayos de tratabilidad
2. Ejecutar los ensayos de tratabilidad físico – químicos, utilizando FeCl_3 como coagulante y PAC como ayudante de coagulación, hasta optimizar el proceso.
3. Determinar el máximo porcentaje de remoción de carga contaminante y el grado de cumplimiento con la normativa ambiental.

1.3 Alcance

En lo que va del siglo XXI, se ha observado cambios significativos en los hábitos de consumo de la población y con ello la generación de cantidades excesivas de residuos sólidos presenta un desafío al necesitar una disposición final adecuada debido a que puede generar daños a la población y al ambiente. La forma más segura que se aplica a nivel mundial es depositando los residuos en un relleno sanitario, por lo que, en el proceso de disposición final, los residuos tienden a generar olores ofensivos, gases tóxicos y lixiviados o sustancias líquidas que son producto de la degradación de la materia orgánica presente en los residuos. Sin embargo, se conoce que los lixiviados generados en los rellenos sanitarios deben ser tratados y eliminados continuamente, pues resultan ser afluentes que contienen una variedad de contaminantes que al no ser eliminados correctamente pueden causar impactos ambientales significativos sobre los ecosistemas del planeta y los seres humanos.

En el presente trabajo de integración curricular, se enfoca en realizar la tratabilidad de lixiviados provenientes del relleno sanitario “Romerillos” del cantón Mejía, utilizando un coagulante alternativo al $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, que también sirve para el tratamiento de aguas residuales, esto con la finalidad de determinar si existe una buena remoción de la carga contaminante y la posibilidad de cumplir con la normativa ambiental para descargas establecido en el TULSMA.

Se inició con una investigación bibliográfica acerca de los lixiviados y las opciones actuales de tratamiento, en la que se incluye el tratamiento por coagulación-floculación. Posteriormente, se realizó un acercamiento, por escrito, con la autoridad competente del área de estudio, en este caso hacia el Alcalde del cantón Mejía, quien mediante el Departamento de Servicios Públicos, autorizó el acceso a los predios del relleno sanitario “Romerillos”. Se realizó por tres ocasiones, las visitas técnicas y de reconocimiento del área de estudio para recolectar muestras del lixiviado y recopilar información técnica, de lo cual, se incluye un registro fotográfico.

Con las muestras de lixiviado, en el laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental de la Facultad, se procedió con su caracterización físico, química y biológica de parámetros importantes en la evaluación del proceso de tratabilidad. Los ensayos de prueba de jarras fueron ejecutados en base a la metodología recomendada por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, CEPIS, y utilizando como coagulante y floculante, FeCl_3 y policloruro de aluminio (PAC), respectivamente. Los ensayos fueron ejecutados hasta alcanzar las condiciones óptimas en dosis, pH, y gradientes de coagulación, floculación y tiempo de sedimentación. Los resultados obtenidos en el tratamiento, reflejan la eficiencia de remoción de carga contaminante y da una apreciación de la efectividad de usar un coagulante alternativo en la planta, así como también las falencias que puede presentar.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Los Lixiviados

Los lixiviados son líquidos residuales que se desprenden de los residuos sólidos urbanos y se acumulan al fondo de los rellenos sanitarios (Röben, 2002; Yao, 2013). Por lo general, los residuos sólidos tienen cierto grado de humedad, sin embargo, el elevado volumen de lixiviados viene dado por la percolación de agua proveniente de la humedad del suelo o agua lluvia y que termina por mezclarse con los residuos en estado de descomposición (Yao, 2013).

La descomposición de los residuos sólidos es gracias a la acción del tiempo, las condiciones climáticas y una multitud de reacciones químicas (disolución, evaporación, sorción, etc) y biológicas (descomposición aerobia y descomposición anaerobia) que ocurre en los rellenos sanitarios (Giraldo, 2014; Yao, 2013).

En consecuencia, los lixiviados poseen características fisicoquímicas y microbiológicas contaminantes de gran relevancia como: metales pesados, materia orgánica, materia biológica infecciosa, nitrógeno, fósforo, entre otros (Gómez, 2018). Así pues, los lixiviados contienen varias clases de contaminantes que hacen que sea un agua residual de elevada resistencia.

1.4.2 Formación de los lixiviados

La formación de lixiviados es resultado de la degradación de los residuos sólidos urbanos y la percolación de agua y que tiene componentes solubles presentes en los propios residuos (Youcai, 2019). Por lo general, en los rellenos sanitarios existe una percolación no uniforme e intermitente de agua a través de los residuos sólidos aportándole componentes disueltos y suspendidos de los residuos biodegradables que sufren una serie de reacciones físicas y químicas (Saleh & Aglan, 2018). En consecuencia, se genera un líquido de aspecto oscuro y olor penetrante, con contaminantes de gran relevancia que superan los umbrales de descarga (López, 2011).

Por otra parte, el comportamiento de producción de lixiviado es elevada durante los dos primeros años, sin embargo, a partir del tercer año hasta el quinto año existe un decrecimiento progresivo de la tasa de descomposición hasta alcanzar un valor de cero en el decimoquinto año (Salazar & Saavedra, 2009).

Según (Christensen, 2012; Morling, 2007), los principales factores que influyen en la formación de lixiviados en un relleno sanitario, son los siguientes:

- Infiltración de aguas superficiales, aguas subterráneas y precipitaciones;
- Composición, humedad y densidad de los residuos depositados;

- Material de cubierta impermeable;
- Edad del relleno sanitario;
- Evaporación del sitio.

El principal contribuyente para la formación de lixiviados es la lluvia (Youcai, 2019). Dependiendo de la duración, la cantidad, la frecuencia y la intensidad de la lluvia; la cantidad de lixiviado que se produce es variable. Además, la variabilidad de estaciones influye en la producción máxima y mínima de lixiviados, es decir, en épocas de invierno debido a la presencia de lluvia o nieve se observa una producción mayor a las épocas de verano donde existe una reducción de la producción de lixiviado que viene dada por la evaporación (Christensen, 2012).

La infiltración de aguas superficiales también contribuyen a la formación de lixiviados, sin embargo, durante eventos de precipitación es posible que exista contaminación del agua superficial (Saleh & Aglan, 2018). Asimismo, los residuos sólidos abarcan fracciones líquidas dadas por su contenido de humedad y la descomposición aeróbica y anaeróbica, que genera una parte importante de los lixiviados, y esta relacionado con la composición de los residuos, el pH, la temperatura, las bacterias, etc (Youcai, 2019).

El material de cobertura es otro factor importante para la formación de lixiviados, pues existe una retención de lixiviados dependiendo el tipo de suelo, por ejemplo, para suelos arenosos y suelos arcillosos, la retención es de 6-12% y 23-31%, respectivamente (Youcai, 2019).

El grado de compactación de los residuos sólidos en el relleno sanitario tiene gran influencia en la generación de lixiviados, es decir, mientras menos compactados estén los residuos sólidos, la cantidad de lixiviado es mayor (Abbas et al., 2009).

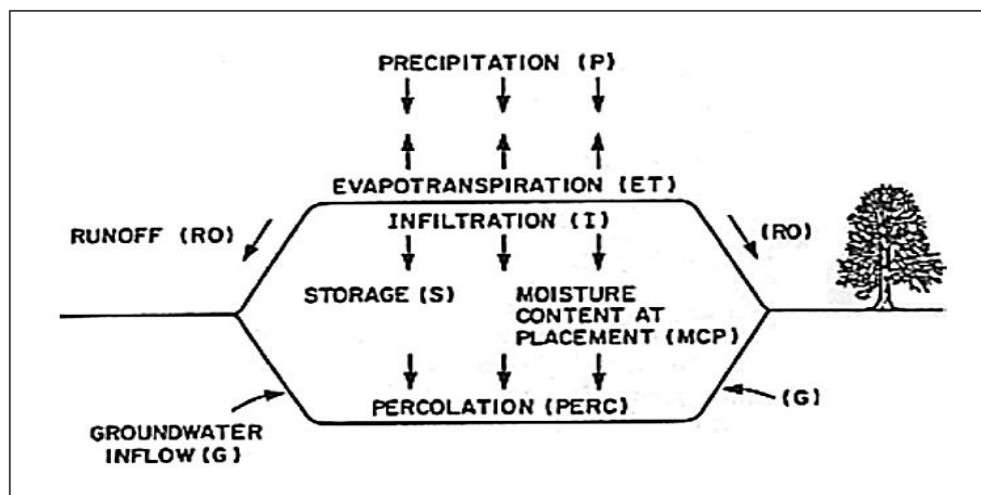


Figura 1. Formación de lixiviados

Fuente: (Abbas et al., 2009)

1.4.3 Composición de los lixiviados

El agua percola a través de los residuos sólidos urbanos en proceso de descomposición, atribuyendo una concentración de diversos contaminantes en el lixiviado (Serdarevic, 2018; Tchobanoglous & Kreith, 2002). La composición de los lixiviados es variable en los rellenos sanitarios, y depende de factores como la edad del relleno sanitario, la composición y cantidad de residuos, entre otros (Lozada et al., 2014).

Generalmente, los parámetros de DBO₅, DQO y COT son utilizados para medir la calidad del lixiviado, puesto que están presentes en las etapas de degradación de los residuos sólidos e indican la presencia de contenido orgánico en los lixiviados (Serdarevic, 2018). La degradación de residuos sólidos es parte fundamental de la composición de lixiviados, y es un proceso complejo que tiene infinidad de reacciones químicas y bioquímicas que dan como resultado la generación de gases y líquidos en el relleno sanitario (Tchobanoglous & Kreith, 2002). Las primeras reacciones de degradación se presentan uno o dos años después de la disposición de los residuos sólidos en el relleno sanitario, las condiciones iniciales son aeróbicas (presencia de oxígeno) y conforme pasa el tiempo, existe ausencia de oxígeno haciendo que la descomposición de los residuos sólidos se de en condiciones anaerobias (Serdarevic, 2018). Según varios autores (Christensen,

2012; Ghosh & Hasan, 2010; Tchobanoglous & Kreith, 2002), el proceso de degradación de los residuos sólidos consta de cinco etapas sucesivas que se detallan a continuación:

➤ **Fase I: Ajuste inicial**

Es una fase aeróbica de periodo corto y es donde los compuestos orgánicos biodegradables de los residuos sólidos empiezan a descomponerse gracias a la actividad microbiana que actúa en presencia de oxígeno (Christensen, 2012; Ghosh & Hasan, 2010). El oxígeno utilizado para la descomposición, proviene del aire atrapado al momento de depositar los residuos sólidos en el relleno sanitario (Tchobanoglous & Kreith, 2002). La procedencia de los microorganismos aerobios y anaerobios para la descomposición de los residuos sólidos generalmente suele ser del suelo que se utiliza para la cobertura diaria, sin embargo, existen otras fuentes como la recirculación de lixiviados y/o lodos del tratamiento de aguas residuales (Ghosh & Hasan, 2010). Los gases que se generan durante esta fase son nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2).

➤ **Fase II: Fase de transición**

Es la fase donde se registra un descenso de oxígeno, y abre paso a las condiciones anaerobias en el relleno sanitario. El nitrato y el sulfato, en ausencia de oxígeno pueden reducirse en gas nitrógeno y ácido sulfúrico puesto que en las reacciones biológicas sirven como aceptores de electrones (Ghosh & Hasan, 2010). Además, los compuestos orgánicos complejos (CH_4 y CO_2) se convierte en ácidos orgánicos y otros productos intermedios gracias a los microorganismos (Tchobanoglous & Kreith, 2002). Si existe formación de lixiviado, el pH del mismo es bajo (6 - 7 aproximadamente) por la presencia de ácidos orgánicos y altas concentraciones de dióxido de carbono (Ghosh & Hasan, 2010).

➤ **Fase III: Fase ácida**

Es una fase de condiciones anaerobias (Röben, 2002). Existe un crecimiento de microorganismos que aceleran la actividad de descomposición de los residuos sólidos. Los tres procesos fundamentales en esta etapa son:

- a) Hidrólisis: transforma los compuestos de elevado peso molecular (lípidos, proteínas, etc), en compuestos que son utilizados como fuente de energía (glucosa, aminoácidos y ácidos grasos) para los microorganismos (Ghosh & Hasan, 2010).
- b) Acidogénesis: los compuestos de elevado peso molecular resultantes en la hidrólisis, se transforman en ácido acético (CH_3COOH), ácidos fúlvicos y otros ácidos orgánicos complejos (Tchobanoglous & Kreith, 2002).
- c) Los compuestos intermedios se transforman a metano y CO_2 alcanzando su punto máximo en la Fase IV (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

El lixiviado formado en esta etapa, tendrá un pH alrededor de 5 por la presencia de ácidos orgánicos y altas concentraciones de CO_2 (Ghosh & Hasan, 2010). Además, la conductividad, DQO y DBO_5 incrementan significativamente por la presencia de ácidos orgánicos (Chávez, 2011). En esta fase se atribuye la presencia de componentes inorgánicos y metales pesados debido al pH ácido que permite su dilución (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

➤ **Fase IV: Fase metanogénica**

Esta fase funciona en condiciones anaerobias y se enfoca en la formación de metano bastante estable en una concentración de 50-65% en volumen (Christensen, 2012). El ácido acético (CH_3COOH) e hidrogeno (H_2) obtenidos en la fase III, son transformados en metano y CO_2 , sin embargo, la formación de ácidos orgánicos empieza a descender (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

Por otra parte, el pH del lixiviado empieza a ascender a valores más neutros (6.8 – 8 aproximadamente), debido a la disminución de ácidos orgánicos en el relleno sanitario (Tchobanoglous & Kreith, 2002). Además, las concentraciones de DBO_5 ,

DQO, la conductividad y la presencia de compuestos inorgánicos y metales pesados se reducen (Chávez, 2011).

➤ **Fase V: Fase de maduración**

La producción de metano comienza a decrecer pues la mayor cantidad de nutrientes presentes en los residuos fueron retirados en conjunto con el gas y el lixiviado que se estaban generando. El lixiviado que se genera, va a ser de un volumen reducido y con presencia de ácidos fúlvicos y húmicos de difícil degradación.

En la Figura 2, se muestra la composición del lixiviado en las distintas fases de degradación que se presenta en un relleno sanitario.

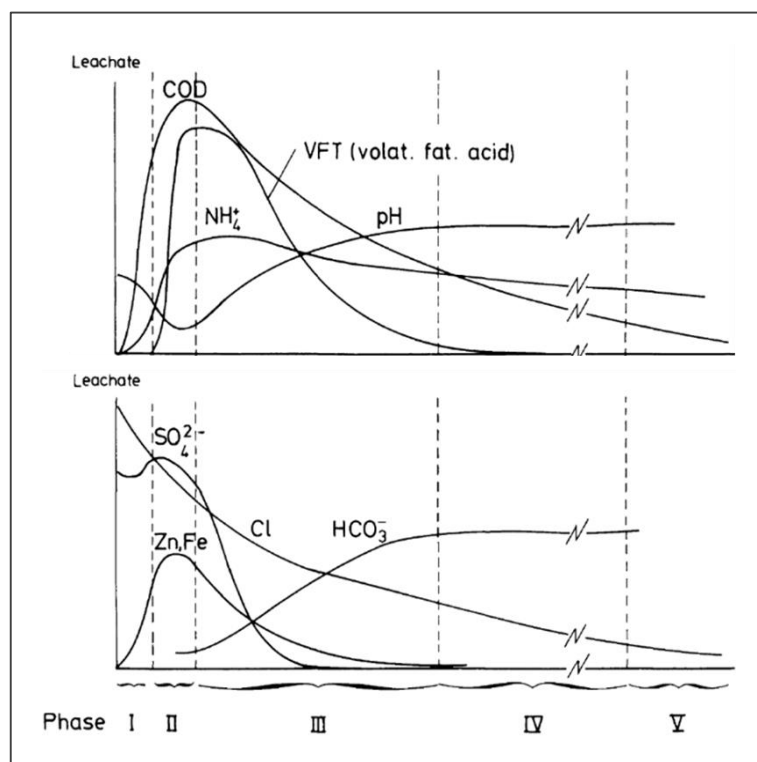


Figura 2. Desarrollo de la composición de lixiviado en un relleno sanitario

Fuente: (Christensen, 2012)

1.4.4 Tipos de lixiviados

La composición de los lixiviados es variable, puesto que depende fundamentalmente de la edad del relleno sanitario y las fases de degradación de los residuos sólidos (Tchobanoglous & Kreith, 2002). Los rellenos sanitarios que almacenan los residuos sólidos en un tiempo no mayor a dos años, producen lixiviado altamente contaminante conocido como “lixiviado joven” (Giraldo, 2014). Inmediatamente, la concentración de las diferentes sustancias contaminantes en el lixiviado empieza disminuir conforme aumenta la edad del relleno sanitario.

La relación DBO_5/DQO indica una diferencia significativa entre los lixiviados jóvenes y viejos (Morling, 2007). Una relación de DBO_5/DQO entre 0.4 – 0.6, indica una buena biodegradabilidad de la materia orgánica en los lixiviados. Para rellenos sanitarios que inician su funcionamiento, las relaciones de DBO_5/DQO tendrán un valor aproximado de 0.5 o más. Caso contrario, para rellenos sanitarios antiguos la biodegradabilidad es baja en los lixiviados, pues refleja una relación DBO_5/DQO de 0.05 – 0.2, debido a la presencia de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos que son difíciles de biodegradar (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

Un lixiviado joven, tendrá un rango de pH de 5 – 7.5 y las concentraciones de DBO_5 , DQO, COT, nutrientes y metales pesados van a ser altas. Caso contrario, a medida que aumenta la edad del relleno, las concentraciones de DBO_5 , DQO, COT, nutrientes y metales pesados en el lixiviado, reducen significativamente, dando lugar a un lixiviado viejo con un pH relativamente neutro (6.5 – 7.5).

En general, los lixiviados contienen cantidades variables de materia orgánica biodegradable y refractaria, donde los ácidos fúlvicos y húmicos son un grupo importante, así como nitrógeno amoniacal, metales pesados, sustancias orgánicas e inorgánicas (Abbas et al., 2009). Además, se debe considerar que un relleno sanitario siempre va a generar lixiviado joven, por lo que siempre va a existir una mezcla con el lixiviado viejo contenido en otras partes del relleno sanitario. La Tabla 1 presenta las características principales que diferencian a los lixiviados jóvenes y lixiviados viejos.

Tabla 1. Características principales de lixiviados jóvenes y lixiviados viejos

Componente	Unidad	Lixiviado joven (menor a 2 años)	Lixiviado viejo (mayor a 10 años)
Alcalinidad como CaCO ₃	mg/l	1.000 – 10.000	200 – 1.000
Cloruro	mg/l	200 – 3.000	100 – 400
DBO ₅	mg/l	2.000 – 30.000	100 – 200
DQO	mg/l	3.000 – 60.000	100 – 500
Dureza total como CaCO ₃	mg/l	300 – 10.000	200 – 500
Fósforo total	mg/l	5 – 100	5 – 10
Hierro total	mg/l	50 – 1.200	20 – 200
Nitrato	mg/l	5 – 40	5 – 10
Nitrógeno amoniacal	mg/l	10 – 800	20 – 40
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/l	20 – 1600	100 – 160
pH	mg/l	4.5 – 7.5	6.6 - 7.5
Sólidos totales en suspensión	mg/l	200 – 2.000	100 – 400
Sulfato	mg/l	50 – 1.000	20 – 50

Fuente: (Tchobanoglous & Kreith, 2002)

Elaboración propia

1.4.5 Parámetros físicos-químicos de los lixiviados

Para realizar cualquier tipo de tratamiento a aguas que poseen una elevada carga contaminante, es necesario caracterizarlas antes y después del tratamiento, puesto que permitirá verificar la eficacia de remoción de los contaminantes. A continuación, se presenta los parámetros físico – químicos y biológicos que deben ser analizados en los lixiviados de un relleno sanitario.

1.4.5.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO es un parámetro analítico de polución que mide la cantidad de oxígeno consumido por la materia orgánica presente en la muestra (Romero Rojas, 2009). Además, no depende de la capacidad de microorganismos que degradan la materia orgánica ni del conocimiento de la cantidad de oxígeno en el agua (Metcalf & Eddy, 1997).

1.4.5.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La DBO₅ es ampliamente utilizado para determinar la contaminación orgánica en aguas residuales como en aguas superficiales (Metcalf & Eddy, 1997). Este parámetro determina la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos (bacterias principalmente), para oxidar, degradar y estabilizar la materia orgánica (Sierra Ramírez, 2011). Para su determinación, la muestra de agua debe estar incubada con microorganismos, por 5 días a 20 °C.

1.4.5.3 Índice de biodegradabilidad

Es un indicador de la proporción de materia orgánica biológicamente degradable con respecto a la materia orgánica total (Shah et al., 2021). Básicamente es la relación entre el contenido en DBO₅ y DQO, el cual va a ser de fundamental importancia a la hora de determinar el tratamiento que se va a utilizar con las aguas residuales, básicamente en la decisión de aplicar un tratamiento biológico o no (Ramis Cirujeda, 2019). La Tabla 2 muestra los valores correspondientes a tres índices de biodegradabilidad, basados en la relación DBO₅/DQO.

Tabla 2. *Relación de biodegradabilidad*

Relación DBO ₅ /DQO	Biodegradabilidad
> 0.4	Alta
0.2 – 0.4	Media
< 0.2	Baja

Fuente: (Ramis Cirujeda, 2019)

De esta forma, un lixiviado con alta biodegradabilidad, tendrá potencial de ser tratado biológicamente para remover la carga contaminante y otros compuestos susceptibles.

1.4.5.4 Potencial de hidrógeno

El pH es una medida de la alcalinidad o acidez del agua (Orozco Jaramillo, 2014). La acidez en el agua puede considerarse desde un pH inferior a 7 y puede darse

por la presencia de CO₂, proveniente de la descomposición de la materia orgánica o de la absorción de la atmósfera (Sierra Ramírez, 2011). Mientras tanto, la alcalinidad puede definirse como la capacidad de neutralizar los ácidos, debido a la presencia de sustancias básicas (sales de ácidos débiles o bases) (Romero Rojas, 2009).

1.4.5.5 Turbidez

La turbiedad es la capacidad que tiene el material suspendido para obstaculizar el paso de la luz (Sierra Ramírez, 2011). La turbiedad puede deberse a la presencia de materiales que varían de tamaño como coloides, materia orgánica e inorgánica, microorganismos, entre otros (Romero Rojas, 2009).

1.4.5.6 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) de un agua es una medida indirecta de la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) (Sierra Ramírez, 2011). También, se define como la capacidad que tiene un líquido para conducir corriente eléctrica por la presencia de iones (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, entre otros) o átomos metálicos, y se puede expresar en microsiemens por centímetro (μS/cm). La importancia de este parámetro es porque en los lixiviados se puede relacionar con la remoción de iones o metales en el proceso de tratamiento.

1.4.5.7 Sólidos

Para un control de la eficiencia del tratamiento de lixiviados, es indispensable monitorear o conocer la presencia de sólidos en el agua. Los sólidos pueden ser tanto orgánicos e inorgánicos, dependiendo de la fuente (natural o antrópica) que los suministren. Generalmente, suelen clasificarse en sólidos totales, sólidos sedimentables, sólidos disueltos (influyen en el olor, sabor y color) y sólidos suspendidos; los cuales influyen en la turbidez del agua.

1.4.5.8 Metales pesados

La fuente potencial de metales pesados en el lixiviado, proviene de la variedad de residuos sólidos que se generan en cada uno de los hogares, los cuales son depositados en el relleno sanitario (Gálvez Pérez, 2008). Un metal pesado se considera una sustancia tóxica que presenta riesgos en la salud y el medio ambiente, sin embargo, también suelen ser considerados una fuente importante de nutrientes para el desarrollo de plantas y animales a concentraciones muy bajas (C. Baird & Cann, 2014; Manahan, 2007).

En los lixiviados, los metales pesados suelen encontrarse en concentraciones relativamente bajas, pero no cabe duda que una elevada concentración puede generar daños en los organismos y el ambiente. Los metales pesados más importantes que se pueden encontrar en un lixiviado son: cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn) (Angadi et al., 2015; Gálvez Pérez, 2008). La Tabla 3, muestra una breve descripción de la procedencia de los metales pesados en los rellenos sanitarios, así como también los síntomas o enfermedades que pueden generar en el organismo al estar en contacto con altas concentraciones.

Tabla 3. Descripción de los metales pesados más frecuentes en los lixiviados

Parámetro	Problemas asociados y procedencia
Aluminio (Al)	En concentraciones altas genera afectaciones en la salud, como tos y bajo rendimiento del sistema nervioso. Puede provenir de antenas para televisores, piezas de carrocería, marcos de ventanas y puertas, envases, etc.
Arsénico (As)	Al estar en grandes concentraciones en el ambiente, genera una acumulación en los tejidos de los organismos, por lo que puede ser mortal. Además, se considera una sustancia carcinógena, pues puede provocar cáncer de piel o cáncer de pulmón. Puede provenir de residuos electrónicos como televisores, radios, computadoras etc; y también de productos utilizados para herbicidas o pesticidas.
Cadmio (Cd)	Se puede combinar con otras sustancias tóxicas, por lo que resulta ser peligroso. Además, el contacto con esta sustancia genera enfermedades cardiovasculares y gastrointestinales. Generalmente, se puede encontrar en pilas recargables de níquel-cadmio, plásticos, electrodomésticos, pigmentos, cerámicas, etc.
Cobre (Cu),	En las personas, puede provocar síntomas relacionados a la parte gastrointestinal (vómitos, diarrea, etc). Comúnmente puede encontrarse en los residuos electrónicos, cables eléctricos, tuberías, etc.
Cromo (Cr)	Su estado más nocivo es el Cr ⁶⁺ . En altas concentraciones puede producir cáncer, anemia o generar daños gastrointestinales. Se encuentra presente en pinturas, pigmentos, recubrimientos plásticos, conservadores de madera, etc.
Hierro (Fe)	Un exceso de hierro en el organismo puede producir daño hepático e incluso la muerte. Puede encontrarse en algunas partes de electrodomésticos, piezas automotrices y utensilios de cocina, latas de conserva, material de construcción, etc.
Níquel (Ni)	Se considera una sustancia carcinógena, por lo que una exposición continua de níquel, puede desarrollar cáncer de próstata, cáncer de pulmón, etc. Se puede hallar en residuos como baterías recargables, cerámicas y materiales niquelados.
Plomo (Pb)	Es tóxico por ingestión o inhalación. A largo plazo genera daños al cerebro y a los riñones. Puede encontrarse en baterías de coches, plásticos, pinturas a base de plomo, cerámica, etc.
Zinc (Zn)	En cantidades elevadas puede provocar vómitos, diarrea y daños en el sistema nerviosos. Se encuentra presente en baterías y tubos fluorescentes.

Fuente: (Gálvez Pérez, 2008; Metcalf & Eddy, 1997; Sierra Ramírez, 2011)

Elaboración propia

1.4.5.9 Nitrógeno

Se considera un nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas que intervienen en el tratamiento de aguas contaminadas (Romero Rojas, 2009). Según varios autores (Orozco Jaramillo, 2014; Romero Rojas, 2009; Sierra Ramírez, 2011), la composición del nitrógeno puede presentarse 4 formas principales que son: nitrógeno orgánico (forma parte de las proteínas), nitrógeno amoniacal (producto de la descomposición del orgánico), nitritos y nitratos (resultados de la oxidación biológica del nitrógeno amoniacal).

En los lixiviados, la presencia significativa de nitrógeno amoniacal indica un proceso de contaminación que puede ser muy tóxico para diversos organismos (Tamires et al., 2020). Además, las altas concentraciones de nitratos y nitritos contribuyen a la eutrofización lo que atribuye una continua contaminación del lixiviado.

1.4.6 Tratamiento de lixiviados

Los lixiviados poseen una variedad de grupos contaminantes como los patógenos, materia orgánica, nutrientes, y sustancias tóxicas como los metales. Esta variedad de contaminantes pueden interferir en los diferentes procesos de depuración, por ello se puede optar por la remoción de uno o varios grupos contaminantes a través de diferentes formas de tratamiento.

Según Serdarevic (2018), el tratamiento de lixiviados puede optarse en cinco tipos específicos que se presentan a continuación:

- a) Tratamiento de lixiviados en el relleno: recirculación de lixiviados
- b) Tratamientos térmicos: evaporación de lixiviados
- c) Tratamientos biológicos: aerobios o anaerobios
- d) Tratamientos físico – químicos: oxidación química, adsorción, coagulación – floculación, intercambio iónico.
- e) Tratamientos de membrana: ósmosis inversa, etc.

1.4.6.1 Recirculación de lixiviados

La recirculación de lixiviados, consta en emplear el relleno sanitario como un reactor anaerobio, en donde los residuos son humedecidos con el lixiviado que se genera en el relleno sanitario, aportándoles nutrientes y enzimas que favorecen su proceso de degradación (Abbas et al., 2009; Giraldo, 2014).

El reciclaje de lixiviado abre paso a la producción elevada de gas metano y en especial bajos volúmenes de lixiviado que posee bajas concentraciones de DQO y metales, esto es debido al aumento significativo de pH, el cual inhibe la solubilidad de metales que son transportados en el lixiviado. Según Serdarevic (2018), se recomienda que la cantidad de lixiviado recirculado oscile entre 0.5 – 2 mm/día, puesto que una elevada cantidad de lixiviado puede inhibir la degradación de los residuos y, además, llegar a encharcarse en los cubetos. Además, tomando en cuenta las consideraciones indicadas, el reciclaje de lixiviados puede acortar la estabilización del relleno sanitario en 2 o 3 años y disminuye la carga contaminante previniendo el riesgo de contaminación del recurso agua (Abbas et al., 2009).

1.4.6.2 Evaporación de lixiviados

La luz solar o el biogás generado en los rellenos sanitarios, se utilizan como fuente de energía para facilitar la evaporación del lixiviado. El objetivo de este tratamiento es reducir el volumen de lixiviado a través de la evaporación, quedando un lodo residual rico en sales y otros contaminantes. Se considera un tratamiento efectivo que se puede ejecutar de tres formas: (a) evaporación al aire libre, (b) evaporación a través de invernaderos y (c) evaporación mediante inducción de calor (Gómez Blasco, 2016).

1.4.6.3 Tratamiento aeróbico

Un tratamiento aeróbico permite la reducción de contaminantes orgánicos biodegradables y la nitrificación del nitrógeno amoniacal (Abbas et al., 2009). Los tratamientos biológicos para los lixiviados, son variables, los cuales pueden ser

tradicionales y modernos. Según Gómez (2018), los procesos más destacables para este tratamiento, son los siguientes:

- **Lagunas aireadas:** son depósitos o estanques poco profundos donde se inyecta aire al agua a tratar, mediante aireadores o difusores. Este tipo de tratamientos resultan ser un método efectivo y de bajo costo para eliminar patógenos, materias orgánicas e inorgánicas. Sin embargo, su proceso es limitado por el área para su construcción y las épocas de invierno con bajas temperaturas (Gómez, 2018).
- **Lodos activados:** su fundamento es utilizar microorganismos para depurar el agua contaminada, los cuales transforman la materia orgánica en sustancias simples como CO₂, agua e incluso nuevos microorganismos. Este tratamiento puede reducir grandes concentraciones de carbono orgánico, nutrientes y nitrógeno amoniacal. La desventaja es que requiere un constante manejo y mantenimiento de equipos (Abbas et al., 2009; Serdarevic, 2018).
- **Reactores biológicos secuenciales (SBR):** es un proceso donde el agua contaminada se mezcla con lodos biológicos en condiciones aireadas. Este tratamiento puede remover hasta un 75% de DQO, sin embargo, la desventaja es que requiere una exigente demanda de energía para los sistemas de aireación (Abbas et al., 2009).

1.4.6.4 Tratamiento anaeróbico

Un tratamiento anaeróbico puede tratar eficientemente aguas contaminadas con concentraciones elevadas de materia orgánica, como por ejemplo los lixiviados jóvenes de un relleno sanitario (Renou et al., 2008). Según Gómez (2018), los procesos más destacables para este tratamiento, son los siguientes:

- **Digestores anaerobios:** es un proceso biológico donde un conjunto de bacterias anaeróbicas, descompone y transforma la materia orgánica en compuestos gaseosos como CO₂, H₂, CH₄, entre otros. Este tratamiento puede reducir la DQO en un 80 – 90%, además de eliminar na mayor

cantidad de sólidos sin la necesidad de utilizar un clarificador. La desventaja es que requiere de fuertes inversiones para su funcionamiento (Abbas et al., 2009).

- **Lagunas anaerobias:** al igual que las lagunas aerobias, requieren de poca profundidad, pero funcionan sin la necesidad de suministrar oxígeno al agua contaminada. Este tratamiento, reduce las concentraciones de materia orgánica e inorgánica, pero requieren de una temperatura constante (Gómez, 2018).
- **Filtros anaerobios:** es un reactor biológico, donde el agua contaminada atraviesa una o varias cámaras de filtración que degradan la materia orgánica mediante microorganismos. Este tratamiento puede reducir la DQO en un 90%, requiere de personal capacitado y una limpieza constante de los filtros (Abbas et al., 2009).

1.4.6.5 Coagulación – floculación

La coagulación – floculación puede utilizarse en el tratamiento de lixiviados viejos y estabilizados; el cual puede ser utilizado previo al tratamiento biológico o al final del tren de tratamiento para remover la materia orgánica no biodegradable (Abbas et al., 2009). Además, se considera un proceso bastante económico, sin embargo, trae consigo desventajas como la adición de sulfato y cloruro al agua tratada, así como también, el tratamiento del lodo generado (Serdarevic, 2018).

El proceso de coagulación es rápido (mezcla rápida) y depende de las características físico – químicas del agua, en el cual, se lleva a cabo con la adición de coagulantes tradicionales (sales de aluminio y de hierro), los cuales reaccionan con el agua contaminada para formar especies hidrolizadas que retiren las impurezas mediante la desestabilización de estas partículas. Posteriormente, en el proceso de floculación, las partículas desestabilizadas colisionan entre sí, para formar partículas de mayor peso y tamaño (flóculos) que terminan por sedimentarse, y para ello requiere una agitación relativamente lenta (Barrenechea Martel, 2004).

1.4.6.5.1 Coagulantes y floculantes

Los coagulantes más utilizados para el tratamiento de aguas suelen ser sales de aluminio y sales de hierro. Las sustancias químicas más empleadas son:

➤ **Sulfato de aluminio**

El sulfato de aluminio puede encontrarse en forma líquida o sólida, y deriva del hidróxido de aluminio y ácido sulfúrico, por lo que posee un pH en un rango de 2 – 3.8 (Barrenechea Martel, 2004).

Según (Angadi et al., 2015), menciona que el sulfato de aluminio puede remover hasta un 40% la DQO de lixiviado fuertemente contaminado, además de remover un 90% de metales pesados (Cd, Ni, Cr, Cu y Zn) y otros contaminantes. La dosis empleada para este caso, fue de 1400 mg/l en un pH de 6.5.

➤ **Cloruro férrico**

El cloruro férrico es el coagulante frecuentemente utilizado para el tratamiento de aguas contaminadas. Su presentación puede ser en fase líquida o sólida ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y funciona en intervalos de pH de 5 – 11.

Según diferentes autores (Abbas et al., 2009; Angadi et al., 2015), la coagulación – floculación con cloruro férrico en lixiviados, es más eficiente que el sulfato de aluminio, puesto que presenta reducciones superiores al 50% en DQO, además de remover sólidos en suspensión, nitrógeno amoniacal y color; con una dosis de 1400 mg/l en un pH de 7.

➤ **Policloruro de aluminio (PAC)**

El PAC puede presentarse en fase líquida o sólida, y funciona como coagulante – floculante para el tratamiento de agua potable y residual. El pH óptimo de trabajo oscila entre 5 – 9.

Según (Angadi et al., 2015), el PAC como ayudante de coagulación en dosis de 500 mg/l, puede presentar reducciones superiores al 70% en DQO, además de remover sólidos en suspensión.

1.4.6.6 Oxidación química

La oxidación química puede remover sustancias no biodegradables y/o tóxicos orgánicos en las aguas residuales. Este tratamiento, resulta ser una alternativa eficaz para la mineralización de compuestos orgánicos en los lixiviados (Renou et al., 2008).

Entre los oxidantes más usados para remover un 20 – 50% de DQO en los lixiviados, son el cloro, el ozono, el permanganato potásico o el clorhidrato de calcio, sin embargo, muchos de estos agentes de oxidación son muy caros. Además, en la oxidación química existen compuestos orgánicos que no se oxidan por completo y requiere su reducción mediante un tratamiento biológico (Serdarevic, 2018).

Entre las principales desventajas de este proceso es que requieren altos costos de operación y una alta producción de lodos químicos que deben ser tratados.

1.4.6.7 Intercambio iónico

El intercambio iónico requiere de un polímero esférico que es capaz de intercambiar iones entre las fases sólida y líquida. A partir de este proceso se puede remover metales que superen los umbrales de descarga, sin embargo, para el tratamiento de lixiviados puede resultar un poco eficaz, para ello es necesario realizar un tratamiento biológico que retire la mayor cantidad de materia orgánica para posteriormente pasar al tratamiento con osmosis inversa (Renou et al., 2008).

1.4.6.8 Adsorción

El proceso de adsorción se puede utilizar en conjunto con un proceso biológico. Se estima que un compuesto eficiente para el proceso, es el uso de carbón activado

puesto que puede remover entre un 50 – 70% de DQO y nitrógeno amoniacal. Otros compuestos que también han dado buenas eficiencias son cenizas de incineradores, illita, caolinita y zeolita (Renou et al., 2008).

1.4.6.9 Ósmosis inversa

El proceso de osmosis inversa retira la mayor cantidad de solidos disueltos y suspendidos mediante membranas semipermeables. Este sistema funciona a elevada presión, con el fin de atravesar el agua contaminada por las membranas. Además, en el tratamiento de lixiviados se estima que existe una remoción del 98 y 99% para DQO y metales pesados, respectivamente. Sin embargo, las principales desventajas de utilizar este tratamiento es que los filtros o membranas deben ser limpiados o sustituidos frecuentemente, lo que provoca una generación de costos adicionales. Además, los lodos obtenidos poseen características contaminantes que deben ser tratados (Renou et al., 2008).

1.4.7 Prueba de jarras (Jar Test)

El equipo de prueba de jarras es un ensayo a escala laboratorio, el cual simula el proceso de coagulación – floculación que sucede en las plantas de tratamiento de agua potable y agua residual. Este equipo permite realizar varios ensayos para determinar las dosis óptimas de coagulante y floculante, pH óptimo de floculación, los gradientes de mezcla rápida y mezcla lenta, y el tiempo de sedimentación requerido para que los flóculos se ubiquen en el fondo del recipiente (Barrenechea Martel, 2004).

Generalmente, el equipo de prueba de jarras consta de los siguientes tres elementos fundamentales, que son:

- **Sistema de agitación:** consta de 4 a 6 paletas que operan a velocidades variables.
- **Sistema de Iluminación:** para localizar los flóculos formados en la base de los recipientes.

- **Jarras o vasos de precipitación de 2L:** se utilizan para verter el agua a tratar en el equipo de prueba de jarras.

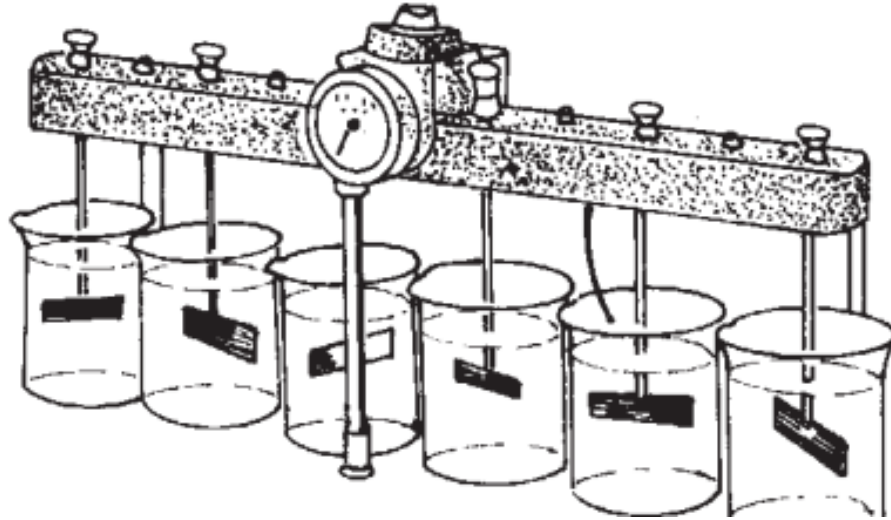


Figura 3. Equipo de prueba de jarras

Fuente: (Barrenechea Martel, 2004)

1.4.8 Normativa con respecto a lixiviados

Los lixiviados generados deben ser tratados, de tal manera que cumplan con lo establecido en el Anexo I del Libro VI del TULSMA, en lo referente a los parámetros establecidos para descarga de los afluentes a los sistemas de alcantarillado y/o un cuerpo de agua dulce. La Tabla 4, presenta los límites máximos permisibles, de los parámetros físicos, químicos y biológicos, para descargas a cuerpos de agua dulce y al alcantarillado.

Tabla 4. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público y cuerpos de agua dulce

Parámetros	Expresado como	Unidad	Agua Dulce	Alcantarillado
			Límite máximo permisible	Límite máximo permisible
Aluminio	Al	mg/l	5	5
Arsénico total	As	mg/l	0,1	0,1
Bario	Ba	mg/l	2	----
Cadmio	Cd	mg/l	0,02	0,02
Cinc	Zn	mg/l	5	10
Cloruros	Cl	mg/l	1 000	----
Cobre	Cu	mg/l	1	1
Color real	Color real	unidades de color	Inapreciable en dilución: 1/200	----
Cromo hexavalente	Cr ⁶⁺	mg/l	0,5	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	100	250
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200	500
Fluoruros	F	mg/l	5	----
Fósforo Total	P	mg/l	10	15
Hierro total	Fe	mg/l	10	25
Manganeso total	Mn	mg/l	2	10
Mercurio (total)	Hg	mg/l	0,005	0,01
Níquel	Ni	mg/l	2	2
Nitrógeno amoniacal	N	mg/l	30	----
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	50	60
Plomo	Pb	mg/l	0,2	0,5
Potencial de hidrógeno	pH		6-9	6-9
Selenio	Se	mg/l	0,1	0,5
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	130	220
Sólidos totales	ST	mg/l	1 600	1 600
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	1000	400
Sulfuros	S	mg/l	0,5	1
Temperatura	°C	----	Condición natural ± 3	< 40,0

Fuente: (TULSMA, 2018)

Elaboración propia

2 METODOLOGÍA

2.1 Área de Estudio

2.1.1 Ubicación geográfica y aspectos físicos del relleno sanitario "Romerillos"

El área de estudio se consideró a los predios del relleno sanitario "Romerillos", ubicado en el cantón Mejía, al suroriente de la provincia de Pichincha, entre los límites provinciales de Pichincha y Cotopaxi a una altitud de 2945 msnm. La temperatura del lugar está entre los 13°C y 22°C. La Tabla 5 y Figura 3, muestran las coordenadas de ubicación del relleno y una vista panorámica del mismo.

Tabla 5. *Coordenadas UTM del relleno sanitario "Romerillos"*

Punto	Zona	X	Y
1	17 S	766847 m	9933629 m
2		766757 m	9933151 m
3		766849 m	9933092 m
4		766830 m	9933050 m
5		767064 m	9932913 m
6		767007 m	9933169 m
7		766961 m	9933529 m
8		766901 m	9933553 m
9		766909 m	9933600 m

Fuente: (Google Earth, s/f)

Elaboración propia



Figura 4. Relleno sanitario "Romerillos" - Ubicación de coordenadas

Fuente: (Google Earth, s/f)

Elaboración propia

2.1.2 Generalidades del área de estudio

El relleno sanitario “Romerillos” recibe y gestiona los desechos sólidos que se generan en el cantón Mejía. La recolección de desechos se realiza de forma separada, puesto que existen días específicos para recolectar desechos inorgánicos (lunes, miércoles y viernes) y desechos orgánicos (martes y jueves). Las actividades de recolección abren paso a un manejo eficiente de desechos sólidos puesto que existe una separación desde la fuente y facilita la clasificación y aprovechamiento de los desechos. La Figura 4, presenta una vista panorámica de los residuos depositados en el relleno.



Figura 5. Depósito de residuos sólidos urbanos en cubetos

Fuente: Elaboración propia

Los residuos sólidos urbanos no aprovechables terminan depositados en los cubetos, desde los cuales se generan lixiviados, que por medio de tuberías son recolectados en 2 piscinas interconectadas. Cierta cantidad del lixiviado es bombeada hacia la planta de tratamiento para su depuración y el resto es recirculado al relleno. La Figura 5, presenta una vista en planta de la piscina de lixiviados, desde la que se tomó las muestras para los ensayos de tratabilidad.



Figura 6. Piscina de lixiviados y punto de muestreo

Fuente: Elaboración propia

2.2 Fase de campo

2.2.1 Visitas técnicas

Se desarrollaron tres visitas técnicas de campo, las cuales fueron guiadas por el personal administrativo del relleno sanitario. La primera fue en enero del 2022 para conocer el proceso de recolección de lixiviados crudos hasta las piscinas para su posterior tratamiento. Además, durante el recorrido en la planta de tratamiento de lixiviados, se detallaba información relevante acerca del tratamiento físico-químico que se realiza para disminuir la carga contaminante del lixiviado.

La segunda visita técnica, se llevó a cabo en junio de 2022, para la recolección de 15 galones de muestras de lixiviado, de la piscina N° 1. La Figura 6 presenta los garrafones de plástico en los que el lixiviado fue transportado hasta el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA), de la Escuela Politécnica Nacional para su respectiva caracterización físico-química y biológica, inicial; así como también, realizar las pruebas de tratabilidad con FeCl_3 y PAC.



Figura 7. Recolección de lixiviados por muestreo simple

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la tercera visita técnica se realizó en agosto de 2022. La finalidad del mismo, corresponde a la recolección de muestras finales de lixiviado crudo para realizar el correspondiente análisis físico-químico y biológico, después de las pruebas de tratabilidad, bajo las condiciones óptimas determinadas de: dosis, pH, y gradientes de coagulación – floculación y tiempo de sedimentación.

2.3 Fase de laboratorio

2.3.1 Caracterización del lixiviado del relleno sanitario “Romerillos”

En el laboratorio, LDIA, los análisis físico-químicos y biológicos del lixiviado se realizaron antes y después de los ensayos de tratabilidad físico-química. Las Tablas 6 y 7, presentan los métodos de ensayo, materiales y equipos utilizados en la determinación de los parámetros analizados, los cuales se basaron en los procedimientos establecidos en los manuales de Standard Methods y HACH. Cabe recalcar que, previo al análisis de cada uno de los parámetros, el lixiviado fue homogenizado. Además, se realizaron duplicados por cada parámetro con la finalidad de obtener resultados confiables.

Tabla 6. Métodos de ensayo para análisis de laboratorio

Parámetro	Método
pH	pH-metro, APHA/AWWA Standard Methods No.4500-H+
Turbidez	Análisis nefelométrico, APHA/AWWA Standard Methods No. 2130
Conductividad	Conductivímetro, APHA/AWWA Standard Methods No. 2510
Dureza cálcica	Análisis volumétrico, APHA/AWWA Standard Methods No. 2340
Dureza total	Análisis volumétrico, APHA/AWWA Standard Methods No. 2340
Demanda química de oxígeno	Análisis colorimétrico, APHA/AWWA Standard Methods No. 5220D
Demanda bioquímica de oxígeno	Análisis respirométrico, APHA/AWWA Standard Methods No. 5210D
Sólidos	Análisis gravimétrico, APHA/AWWA Standard Methods No.2540
Cloruros	Análisis volumétrico, APHA/AWWA Standard Methods No. 4500-Cl-
Nitrógeno amoniacal	Análisis colorimétrico, Método HACH No.10031
Nitritos	Análisis colorimétrico, Método HACH No.8507
Nitratos	Análisis colorimétrico, Método HACH No.8039
Fosfato	Análisis colorimétrico, Método HACH No.8506
Fósforo total	Análisis colorimétrico, Método HACH No.8506
Sulfato	Análisis colorimétrico, Método HACH No.8051
Cobre	Análisis colorimétrico, Método HACH No.8506
Cromo hexavalente	Análisis colorimétrico, Método HACH No.8023
Aluminio	Análisis colorimétrico, Método HACH No.8012
Zinc	Análisis colorimétrico, Método HACH No.8009
Hierro	Análisis colorimétrico, Método HACH No.8008

Fuente: (R. Baird et al., 2017; HACH, 2000)

Elaboración propia

Tabla 7. Materiales y equipos para análisis de laboratorio

Materiales y Equipos		
Agitador	Equipo de filtración	Pinzas
Agitador magnético	Equipo OxyTop	Pinzas para buretas
Balanza digital	Espectrofotómetro HACH	Pipetas
Balones aforados	Estufa	Piseta
Barras magnéticas para agitación	Filtros	Probetas
Bomba de vacío	Goteros	Propipetas
Botellas ámbar para DQO	Incubadora	Soporte universal
Buretas	Matraces Erlenmeyer	Turbidímetro HACH
Crisoles	Mufla	Varillas de vidrio
Desecador	Multiparámetro	Vasos de precipitación
Digestor de DQO HACH	pH-metro	

Fuente: Elaboración propia

2.3.1.1 Determinación de pH

Se utilizó un pH-metro de la marca HACH para determinar el pH del lixiviado. Para el uso del equipo, fue necesario calibrarlo con buffers de pH 4, 7 y 10. Posteriormente, el lixiviado fue trasvasado a un vaso de precipitación de 250 ml y se colocó un volumen aproximado de 150 ml. Se introdujo la sonda en el vaso de precipitación que contenía el lixiviado y se procedió a anotar los valores reportados.

2.3.1.2 Determinación de turbidez

La turbidez se determinó usando un turbidímetro de la marca HACH, el mismo fue previamente calibrado con soluciones de 10, 20, 100 y 800 NTU. El lixiviado fue recogido en un vaso de precipitación de 250 ml, para posteriormente trasvasarlo en las celdas de 20 ml. Una vez llenas las celdas, se procedió a limpiarlas moderadamente con un pañuelo sosteniéndolas de la parte superior. Finalmente, se coloca la celda en el turbidímetro y se registra la lectura de la turbidez del lixiviado.

2.3.1.3 Determinación de conductividad

En este caso, se usó un equipo multiparámetro de la marca OAKTON. El lixiviado fue recogido en un vaso de precipitación limpio y se introdujo la sonda correspondiente a la medición de conductividad. El resultado esperado se dio en unidades de mS.

2.3.1.4 Determinación de dureza total

Para la determinación de la dureza, se colocó 5 ml de muestra de lixiviado en 50 ml de agua destilada en un matraz Erlenmeyer. Se añadieron 3 gotas de cloruro de amonio (NH_4Cl) y una pequeña cantidad de negro de eriocromo con la punta de la espátula.

Acto seguido, en una bureta se colocó una solución de EDTA 0.01N. Se retiró la burbuja de aire que se genera y se encero nuevamente con la solución de EDTA. La bureta se colocó en un soporte universal para un fácil manejo durante la

titulación. Una vez armado el equipo, se procedió a titular la muestra contenida en el matraz Erlenmeyer hasta que exista un vire de color rojo a un color azul. El volumen utilizado de EDTA para la titulación, es el que refleja la concentración de dureza total en el lixiviado y se determinó utilizando la ecuación (Ec.1).

$$Dureza\ total\ \left(\frac{mg}{l}\ CaCO_3\right) = \frac{V_{EDTA} \times C_{EDTA} \times 50000}{V_{muestra}} \quad (Ec.1)$$

2.3.1.5 Determinación de dureza cálcica

Se realizó el mismo procedimiento que la dureza total. La diferencia es que se añadieron 3 gotas de NaOH 0.4M y una pequeña cantidad de cristales de murexida con la punta de la espátula. Al homogenizar la muestra, esta se torna de un color rosado, y al ser titulado, vira a un color violeta.

El volumen utilizado de EDTA para la titulación, es el que refleja la concentración de dureza cálcica en el lixiviado y se determinó utilizando la ecuación (Ec.2).

$$Dureza\ cálcica\ \left(\frac{mg}{l}\ CaCO_3\right) = \frac{V_{EDTA} \times C_{EDTA} \times 50000}{V_{muestra}} \quad (Ec.2)$$

2.3.1.6 Determinación de DQO

La determinación de este parámetro requiere que la muestra a ensayarse se encuentre totalmente homogenizada. Además, el digestor para viales de DQO debe estar previamente precalentado a 150°C.

Para iniciar con el ensayo, se emplearon 3 viales de digestión para DQO. En el primer vial, se colocaron 2 ml de agua destilada (blanco) con ayuda de una pipeta, y en los viales restantes se colocaron 2 ml del lixiviado previamente homogenizado (muestras). Los viales fueron tapados y agitados cuidadosamente debido a la

reacción exotérmica que se da entre la muestra y la solución del vial. Posteriormente, se aflojaron las tapas de los viales para expulsar los gases generados en la reacción exotérmica y se volvieron a sellar.

En el digestor ya precalentado, se colocaron los 3 viales que contienen las muestras de agua destilada y lixiviado. Los viales fueron calentados durante 2 horas y al finalizar, se dejó enfriar las muestras hasta una temperatura de 120°C para posteriormente retirarlas.

Con los viales totalmente fríos, se midió la DQO de las muestras en el espectrofotómetro HACH. El vial con la muestra de agua destilada sirvió como blanco para encerrar el equipo y determinar los valores de DQO de los viales de las muestras de lixiviado que posteriormente fueron registrados.

2.3.1.7 Determinación de DBO

Se realizó un cultivo de microorganismos para la muestra de lixiviados, puesto que no existe certeza de que la muestra se encuentre plagada de organismos.

Con los valores obtenidos de DQO, se procede a calcular la DBO_5 esperada en la muestra de lixiviado y para ello se utilizó la ecuación (Ec.3).

$$DBO_{5\text{esperado}} = 80\% \times DQO \quad (\text{Ec.3})$$

El valor obtenido permitió conocer el volumen de muestra que debe ser colocado en las botellas ámbar para DBO. La Tabla 7, refleja el volumen de muestra en función a la medida de DBO_5 esperada.

Tabla 8. *Volumen de muestra en función de la DBO₅ estimada*

Volumen de la muestra [ml]	Rango de medida [mg/l]	Factor
432	0 – 40	1
365	0 – 80	2
250	0 – 200	5
164	0 – 400	10
97	0 – 800	20
43.5	0 – 2000	50

Fuente: (WTW,2017)

El volumen requerido para el análisis de DBO₅ se midió utilizando los matraces volumétricos provistos en el equipo. Las botellas se llenaron con el volumen determinado y el cultivo de microorganismos, añadiéndole una barra de agitación magnética. Posteriormente, se ubicó los capuchones de caucho en el cuello de las botellas y se agregó dos pastillas de NaOH en su interior. Se atornilló cuidadosamente el cabezal del Oxitop en la botella ámbar y para su funcionamiento se enceró el equipo. Finalmente, las botellas ámbar fueron colocadas en la bandeja de agitación a una temperatura de 20°C durante 5 días y se registraron los valores obtenidos en ese periodo.

2.3.1.8 Determinación de sólidos

En el análisis de sólidos, los filtros y crisoles a ser utilizados fueron previamente tarados a 105°C en la estufa. Además, los ensayos se realizaron sin dilución del lixiviado.

- a) Para los sólidos totales, se registró el peso del crisol tarado (P0) y se colocó 10 ml de muestra de lixiviado (V1). Posteriormente, el crisol se trasladó con ayuda de pinzas hacia la estufa a 105°C por 24 horas; y se dejó enfriar en el desecador hasta temperatura ambiente.
- b) Para los sólidos suspendidos, se registró el peso del filtro sobre el crisol tarado (P0'). Se armó el equipo de filtración al vacío en conjunto con el filtro tarado y se filtraron 10 ml de muestra de lixiviado (V2). El filtro ya utilizado, se recuperó con ayuda de pinzas y se colocó sobre el crisol antes usado. Posteriormente, el crisol en conjunto con el filtro se trasladó hacia la estufa a

105°C por 24 horas; y se dejó enfriar en el desecador hasta temperatura ambiente. Se registró el nuevo peso del filtro y crisol (P1').

- c) Para los sólidos disueltos, se registró el peso del crisol tarado (P0''). El volumen de lixiviado filtrado para los sólidos suspendidos (V3), se colocó en el crisol y se trasladó hacia la estufa a 105°C por 24 horas. Se dejó enfriar en el desecador hasta temperatura ambiente y se registró el nuevo peso del crisol (P1'').

Las concentraciones para los diferentes tipos de sólidos, se calcularon utilizando los pesos y volúmenes utilizados en cada ensayo con las ecuaciones (Ec.4), (Ec.5) y (Ec.6).

$$\text{Sólidos totales } \left(\frac{mg}{l}\right) = \frac{P1 - P0}{V1} \quad (\text{Ec.4})$$

$$\text{Sólidos suspendidos } \left(\frac{mg}{l}\right) = \frac{P1' - P0'}{V2} \quad (\text{Ec.5})$$

$$\text{Sólidos disueltos } \left(\frac{mg}{l}\right) = \frac{P1'' - P0''}{V3} \quad (\text{Ec.6})$$

2.3.1.9 Determinación de cloruros

El análisis se realizó colocando 1 ml de la muestra de lixiviado en 5 ml de agua destilada en un matraz Erlenmeyer. Posteriormente, se añadió 3 gotas de la disolución indicadora de K₂CrO₄, atribuyéndole a la solución una coloración amarillenta.

Acto seguido, en una bureta se colocó una solución de AgNO₃ 0.01N. Se retiró la burbuja de aire que se generó y se encero nuevamente con la solución. La bureta se colocó en un soporte universal para un fácil manejo durante la titulación.

Una vez armado el equipo, se procedió a titular la muestra contenida en el matraz Erlenmeyer hasta que exista un vire de color amarillo a un color naranja rojizo. El volumen utilizado de nitrato de plata para la titulación, es el que refleja la concentración de cloruros en el lixiviado y se puede determinar utilizando la ecuación (Ec.7).

$$\text{Cloruros } \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{Cl}^- \right) = \frac{V_{\text{AgNO}_3} \times C_{\text{AgNO}_3} \times 35.45}{V_{\text{muestra}}} \quad (\text{Ec.7})$$

2.3.1.10 Determinación de nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos

Los aniones nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos se analizaron realizando diluciones de 1:1000 y 1:5 de la muestra de lixiviado. Cada uno de estos ensayos, se basaron en el Manual de análisis de agua de HACH, y se requirió reactivos como: estabilizador mineral y reactivo Nessler para nitrógeno amoniacal, reactivo NitriVer3 para nitritos y reactivo NitraVer5 para nitratos. Para cada uno de los ensayos se ubicó los programas almacenados en el espectrofotómetro y se tomó como blanco la muestra diluida a analizarse. Posteriormente, se procedió analizar las muestras y se obtuvo las concentraciones de las sustancias en el lixiviado.

2.3.1.11 Determinación de fósforo total y fosfato

Para el análisis de estos 2 componentes, se realizó una dilución 1:5 de la muestra de lixiviado. Los ensayos de fósforo total y fosfato, al igual que las formas del nitrógeno, se basaron en el Manual de análisis de agua de HACH, en los cuales se requirió reactivos como: los reactivos Test 'N Tube para fósforo total y reactivo PhosVer3 para fosfatos. Para cada uno de los ensayos se tomó como blanco la muestra diluida a analizarse y en el espectrofotómetro se ubicó los programas para las sustancias.

2.3.1.12 Determinación de metales pesados (Cu, Cr⁶⁺, Al, Zn y Fe)

El análisis de metales pesados se basó en los procedimientos establecidos en el manual de análisis de agua de HACH. Todos los ensayos requirieron diluciones de la muestra de lixiviado que van de 1:5 a 1:100. En la manipulación de reactivos se utilizó las correspondientes medidas de seguridad, debido a la toxicidad que presentaban.

2.3.2 Tratamiento de lixiviados

El tratamiento físico-químico de lixiviados se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDIA). El procedimiento se realizó en base a la metodología recomendada por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS) y se utilizó como coagulante y floculante, FeCl₃ (cloruro férrico) y PAC (policloruro de aluminio), respectivamente.

2.3.2.1 Parámetros para el monitoreo del tratamiento

Se estableció el pH y turbiedad como parámetros a medir en cada una de las fases de tratabilidad. Se realizó la medición de pH, porque es de importancia básica e indica cuan alcalina o ácida es la muestra, lo que permite conocer la eficiencia del tratamiento. Por otra parte, se seleccionó la turbiedad con el fin de verificar la remoción del material suspendido como coloides, materia orgánica, etc;

2.3.2.2 Preparación de FeCl₃ y PAC

a) FeCl₃

Se utilizó cloruro férrico hexahidratado (FeCl₃.6H₂O) para preparar 1000 ml de FeCl₃, al 5 % m/v. El reactivo FeCl₃.6H₂O para preparar la solución se encuentra en estado sólido, y el detalle de los datos para el cálculo de su pesaje, se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Datos para la solución de $FeCl_3$

Parámetro	Unidad	Valor
Volumen de solución $FeCl_3$	ml	1000
Concentración de $FeCl_3$	% m/v	5
Peso molecular $FeCl_3$	g/mol	162,2
Peso molecular $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	g/mol	270,3

Fuente: Elaboración propia

Con los datos presentados, se realizaron los respectivos cálculos dando por resultado un peso de 83.32 g $FeCl_3 \cdot 6H_2O$.

$$\% \frac{m}{v} = \frac{\text{masa } FeCl_3 \text{ (g)}}{\text{volumen solución (ml)}} \times 100\% \quad (\text{Ec.8})$$

$$\text{masa } FeCl_3 = 50 \text{ g } FeCl_3$$

$$\text{masa } FeCl_3 \cdot 6H_2O = 50 \text{ g } FeCl_3 \times \frac{1 \text{ mol } FeCl_3}{162,2 \text{ g } FeCl_3} \times \frac{270,3 \text{ g } FeCl_3 \cdot 6H_2O}{1 \text{ mol } FeCl_3}$$

$$\text{masa } FeCl_3 \cdot 6H_2O = 83,32 \text{ g } FeCl_3 \cdot 6H_2O$$

Utilizando una balanza analítica, previamente calibrada, se procedió a pesar 83.32 g de $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ y se solubilizó con agua destilada en un vaso de precipitación de 500 ml hasta retirar la mayor cantidad de grumos. Posteriormente, la solución se vertió en un balón aforado de 1000 ml y se aforó. La solución se etiquetó y almacenó en botellas ámbar, para evitar el contacto con la luz.

a) PAC (Policloruro de aluminio)

Se preparó 500 ml de solución acuosa de PAC, al 4% m/v. El reactivo utilizado se encontraba en estado sólido, por tanto, el detalle de los datos para el cálculo de su pesaje, se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Datos para la solución de PAC

Parámetro	Unidad	Valor
Volumen de solución PAC	ml	500
Concentración de PAC	% m/v	4

Fuente: Elaboración propia

Con los datos presentados, se realizaron los respectivos cálculos dando por resultado un peso de 20 g PAC.

$$\% \frac{m}{v} = \frac{\text{masa PAC (g)}}{\text{volumen solución (ml)}} \times 100\% \quad (\text{Ec.9})$$

$$\text{masa PAC} = 20 \text{ gramos PAC}$$

En una balanza analítica se pesó 20.00 g de PAC, y se solubilizó con agua destilada en un vaso de precipitación de 100 ml hasta retirar la mayor cantidad de grumos. Posteriormente, la solución se vertió en un balón aforado de 500 ml y se aforo.

2.3.2.3 Prueba de jarras – Proceso de coagulación y floculación

En el proceso de coagulación-floculación se utilizó un equipo de prueba de jarras de la marca OVAN modelo JT60E. El equipo cuenta con la capacidad de trabajar con 6 jarras, un rango de velocidad de 20 – 250 rpm y un temporizador de 0 – 240 minutos.

Para iniciar con los ensayos de coagulación – floculación, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las muestras de lixiviado se homogenizaron antes de ser vertidas en las jarras, pues esto asegura una distribución uniforme de los contaminantes en solución.

- Las pruebas se realizaron en 4 jarras circulares de 1000 ml cada una y al culminar los ensayos, se realizaba la limpieza de las paletas y las jarras utilizadas para su posterior uso.
- La dosificación del coagulante y floculante se calculó empleando la ecuación (Ec.10), donde dicho volumen se midió en probetas de 25 y 50 ml, para luego colocar en vasos de precipitación de 50 ml. El ingreso de las dosis en la prueba de jarras se realizó de forma rápida y en dirección al eje de las paletas.

$$D_1 \times V_1 = D_2 \times V_2 \quad (\text{Ec.10})$$

Donde:

- a) D1 = concentración final de coagulante, (mg/l)
 - b) D2 = concentración inicial de coagulante, (mg/l)
 - c) V1 = Volumen de la jarra, (ml)
 - d) V2 = Volumen de coagulante a suministrar en la jarra, (ml)
- Al finalizar cada ensayo, se procedió a filtrar las muestras en matraces Erlenmeyer con ayuda de embudos y papeles filtro. De las muestras filtradas se midió el pH y turbiedad residuales, para luego calcular los porcentajes de remoción.
 - Los ensayos se realizaron en vasos de precipitación de 1000 ml, utilizando 500 ml de lixiviado debido a la generación de espuma que desbordaba por el recipiente.

A continuación, se detalla el proceso realizado para determinar las condiciones óptimas en dosis, pH, gradientes de coagulación y floculación y tiempo de sedimentación.

2.3.2.3.1 Determinación de pH óptimo

Al iniciar la prueba de jarras, existió inconvenientes en determinar la dosis óptima de coagulante, por lo que se procedió en primera instancia a realizar la determinación de pH óptimo.

Para determinar el pH óptimo de coagulación se añadió 500 ml de lixiviado en cada una de las jarras. Posteriormente, se ajustó el pH a valores aproximados de 6.5, 7.0, 7.5 y 8.0 y para ello se adiciono H_2SO_4 concentrado.

Con los pH modificados, se añadió una dosis de 1800 mg/l de $FeCl_3$ y 1200 mg/l PAC en todas las jarras. Seguidamente, se programó una velocidad de 100 rpm para la mezcla rápida y 40 rpm para la mezcla lenta, en un tiempo de 60 segundos y 20 minutos, respectivamente.

Al finalizar el ensayo, se filtraron las muestras y se realizaron las pruebas de turbidez y pH residuales. La Tabla 22 del Anexo III muestra los resultados registrados en este ensayo.

2.3.2.3.2 Determinación de dosis óptima de coagulante

Una vez obtenido el pH óptimo de coagulación, se procedió a determinar la dosis óptima de coagulante. Por tanto, se añadió 500 ml de lixiviado en cada una de las jarras y se modificó el pH al valor óptimo obtenido.

Posteriormente, se programó una velocidad de 100 rpm para la mezcla rápida y 40 rpm para la mezcla lenta, en un tiempo de 60 segundos y 20 minutos, respectivamente. Seguidamente, se añadieron dosis de 1500, 1800, 2100 y 2400 mg/l de $FeCl_3$ en las jarras respectivas, y para la fase de floculación se mantuvo un valor de 1200 mg/l de PAC en todas las jarras.

Al finalizar el tiempo de mezcla lenta, se dejó sedimentar los coágulos formados por un tiempo de 10 minutos y se filtraron las muestras para realizar las pruebas de

turbidez y pH residuales, respectivas. La Tabla 24 del Anexo III reporta los resultados registrados en este ensayo.

2.3.2.3.3 Determinación de dosis óptima de floculante

Con los valores óptimos de pH y dosis de coagulante, se procedió a determinar la dosis óptima de floculante. Por tanto, se modificó el pH para 500 ml de lixiviado en cada una de las jarras. Las velocidades de mezcla rápida y mezcla lenta se mantuvieron al igual que los anteriores ensayos, así como también, los tiempos de agitación.

La dosificación de coagulante se realizó con la dosis óptima en todas las jarras. Posteriormente, en la fase de mezcla lenta se añadieron dosis de 1200, 1800, 2400 y 3000 mg/l de floculante en las jarras respectivas.

Al finalizar el tiempo de mezcla lenta, se dejó sedimentar los coágulos formados por un tiempo de 10 minutos y se filtraron las muestras para realizar las pruebas de turbidez y pH residuales, respectivas. La Tabla 26 del Anexo III reporta los resultados registrados en este ensayo.

2.3.2.3.4 Determinación de la velocidad óptima de coagulación

Para determinar la velocidad óptima de coagulación, se optó por usar velocidades de 100, 150 y 200 rpm. Para ello, se realizó el mismo procedimiento de los ensayos anteriores. En este caso se llenaron 3 jarras con 500 ml de lixiviado y se modificó su pH.

Para una sola jarra, se programó una velocidad de 100 rpm para la mezcla rápida y 40 rpm para la mezcla lenta, en un tiempo de 60 segundos y 20 minutos, respectivamente. Seguidamente, se añadieron las dosis óptimas de coagulante y floculante obtenidas.

Finalizado el tiempo de mezcla lenta, se dejó sedimentar los coágulos formados por un tiempo de 10 minutos y se filtraron las muestras para realizar las pruebas de turbidez y pH residuales, respectivas.

Se realizó el mismo procedimiento para las velocidades de 150 rpm y 200 rpm. La Tabla 28 del Anexo III reporta los resultados registrados en este ensayo.

2.3.2.3.5 Determinación del gradiente y tiempo óptimo de velocidad de floculación

Las dosis de coagulante y floculante se mantuvieron constantes y se usó la velocidad de mezcla óptima. Para la mezcla lenta, se realizó a 30 rpm, 40 rpm y 50 rpm, correspondientes a los gradientes de velocidad de 28, 42 y 56 s⁻¹, respectivamente. Además, para el ensayo se establecieron tiempos de floculación de 15, 20 y 25 minutos.

La prueba de jarras para los tres gradientes en los tiempos mencionados, se realizó con el mismo procedimiento de las fases anteriores y en este caso se necesitaron un total de 9 jarras con 500 ml de lixiviado.

Para la mezcla lenta a 30 rpm se utilizaron 3 jarras con 500 ml de lixiviado. El proceso inició de forma igualitaria en todas las jarras y en la fase de floculación se dejó agitar la primera jarra por 15 minutos y posteriormente se levantó la paleta. Para las jarras restantes, la agitación se mantuvo hasta cumplir los 20 y 25 minutos, respectivamente, y de la misma manera se levantaron las paletas. El proceso descrito, se repitió para 40 rpm y 50 rpm.

Al finalizar el tiempo de mezcla lenta, se dejó sedimentar los coágulos formados por un tiempo de 10 minutos y se filtraron las muestras para realizar las pruebas de turbidez y pH residuales, respectivas. La Tabla 30 del Anexo III reporta los resultados registrados en este ensayo.

2.3.2.3.6 Determinación del tiempo de sedimentación

El ensayo se realizó llenando 1 jarra con 500 ml de lixiviado y se aplicó las condiciones óptimas de pH, dosis de coagulante y dosis de floculante. Seguidamente, las jarras se sometieron a mezcla rápida de 150 rpm por 60 segundos y luego a mezcla lenta de 50 rpm por 20 minutos.

Al finalizar el tiempo de floculación (mezcla lenta), se dejó sedimentar los coágulos formados y se registró los volúmenes de sedimentos depositados en el fondo de cada una de las jarras. Los tiempos de sedimentación investigados fueron 5, 10, 15 y 20 minutos. La Tabla 32 del Anexo III reporta los resultados registrados en este ensayo.

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Características iniciales del lixiviado crudo

La Tabla 11 presenta las principales características físico-químicas del lixiviado crudo del relleno sanitario “Romerillos” para ejecutar los ensayos de tratabilidad.

Tabla 11. *Características iniciales del lixiviado para las pruebas de tratabilidad*

Parámetro	Unidad	Valor
Conductividad	mS/cm	25.9
Dureza cálcica	mg/l CaCO ₃	210.0
Dureza total	mg/l CaCO ₃	2210.0
pH	-	8.6
Turbiedad	NTU	240.0

Fuente: Elaboración propia

El valor de conductividad indica una elevada presencia de sólidos disueltos que provienen principalmente de sales o iones metálicos en la solución. En este caso, una fracción de la conductividad obtenida puede darse principalmente por la concentración de carbonato de calcio (CaCO₃) determinado en la dureza total.

Las concentraciones superiores a 420 mg/L CaCO₃, indican una dureza muy elevada, de acuerdo a Infoagro (2017); considerándose un agua fuertemente contaminada que puede generar incrustaciones en la tubería de la planta de tratamiento.

Con respecto al valor de pH, el lixiviado se puede caracterizar como un agua alcalina puesto que su valor es 40 veces superior al correspondiente a la neutralidad (pH=7). Además, una turbiedad de 240 NTU indica la presencia de sólidos en suspensión que inhiben el paso de luz al agua. Estas partículas en suspensión, principalmente puede deberse a la materia orgánica que se desprende de la descomposición de los residuos.

3.2 Resultados del pH óptimo de coagulación

La Tabla 12 muestra los valores obtenidos durante este ensayo, donde se emplearon dosis constantes de coagulante y floculante. La remoción de turbiedad se vio influenciada con la modificación de pH, como se muestra en la Gráfica 1. Para valores de pH menores a 6.5 se visualiza una remoción de turbiedad de aproximadamente el 90%, caso contrario, para valores mayores a 6.5 de pH la remoción es cerca del 50%.

Tabla 12. Valores obtenidos para la determinación de pH óptimo

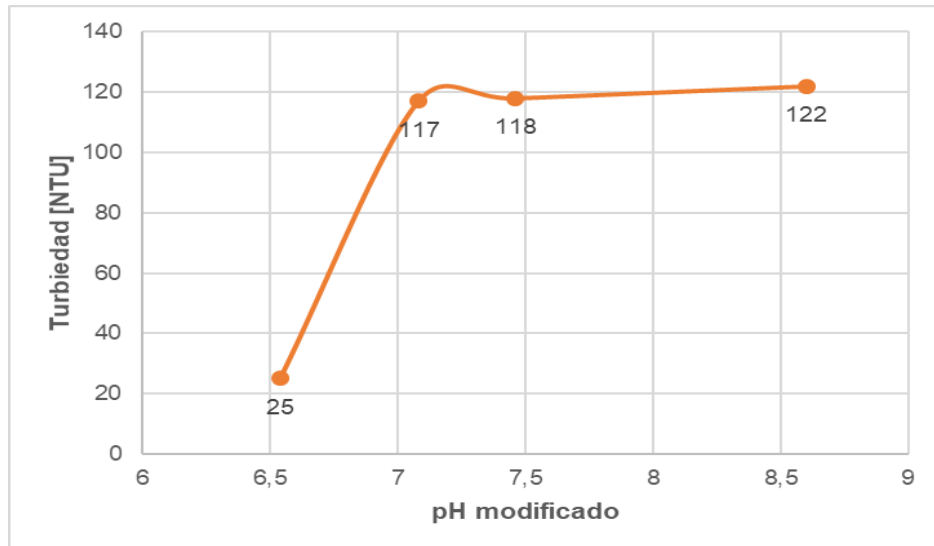
Jarra	1	2	3	4
pH modificado	6.54	7.08	7.46	8.6
Dosis FeCl₃ [mg/l]	1800	1800	1800	1800
Dosis PAC [mg/l]	1200	1200	1200	1200
Turbiedad inicial [NTU]	240	240	240	240
Turbiedad final [NTU]	25.1	117	118	122
pH final	6.4	7.19	7.84	8.19
% remoción	89.6	51.3	50.8	49.2

Fuente: Elaboración propia

Para un pH de 6.5, el valor de la turbiedad bajó 9.6 veces al valor inicial (240 NTU), resultando una eficiencia de remoción de 89.6%. Además, al realizar las respectivas dosificaciones se evidenció un ligero descenso del pH del lixiviado tratado, sin embargo, se puede considerar esta condición para realizar las siguientes fases del tratamiento, puesto que, para la descarga de aguas residuales en la red de alcantarillado y/o cuerpos de agua dulce, el límite máximo permisible es de 6 unidades.

Para los pH de 7 y 7.5, hubo un ligero ascenso del pH en la prueba de jarras. Asimismo, la turbiedad en estas condiciones se redujo a la mitad, 117 NTU y 118 NTU, respectivamente. Además, se observa que a pH mayores de 7.5 la remoción de turbiedad va decreciendo y en este caso a un pH de 8.6 se tuvo una eficiencia de remoción del 49.2%.

Por tanto, el pH óptimo para este ensayo se encuentra en un valor cercano a 6.5, esto se comprobó con las eficiencias de remoción obtenidas, así como también, el pH residual al final del ensayo.



Gráfica 1. Valores de pH vs. Turbiedad

Fuente: Elaboración propia

3.3 Resultados de dosis óptima de coagulante

Después de haber determinado el pH óptimo de coagulación, en la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos con las diferentes dosis de coagulante, estudiadas.

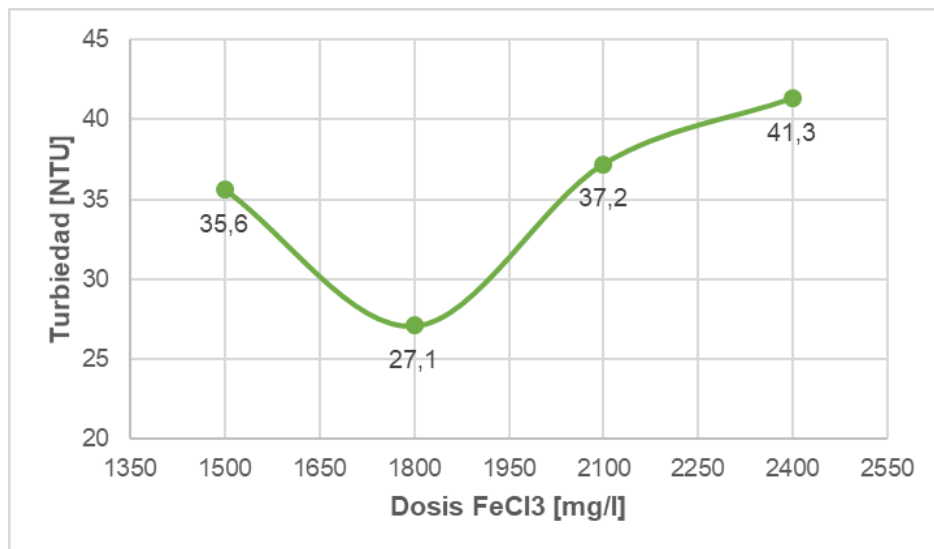
Tabla 13. Valores obtenidos para la determinación de dosis óptima de coagulante

Jarra	1	2	3	4
pH modificado	6,52	6,49	6,51	6,52
Dosis FeCl₃ [mg/l]	1500	1800	2100	2400
Dosis PAC [mg/l]	1200	1200	1200	1200
Turbiedad inicial [NTU]	240	240	240	240
Turbiedad final [NTU]	35,6	27,1	37,2	41,3
pH final	6,34	6,22	5,74	4,78
% remoción	95,3	96,4	98,8	98,5

Fuente: Elaboración propia

La Gráfica 2 presenta las diferentes dosis de coagulante con las turbiedades obtenidas al finalizar el ensayo de prueba de jarras. Se refleja que a una dosis de 1800 mg/l de FeCl_3 , se remueve el 96,4% de turbiedad, generando un valor residual de 27.1 NTU. Además, el pH se vio ligeramente reducido a un valor de 6.22, y hasta el momento se encuentra dentro de los límites permisibles para descargas que establece el TULSMA.

Para las dosis de 2100 y 2400 mg/l, también se obtuvieron reducciones superiores al 95%, sin embargo, disminuyeron el pH del lixiviado de 6.5 a valores de 5.74 y 4.78, respectivamente. Por ello, las dosis fueron descartadas como dosis óptimas de coagulación.



Gráfica 2. Dosis de FeCl_3 vs. Turbiedad

Fuente: Elaboración propia

3.4 Resultados de dosis óptima de floculante

Los ensayos se realizaron para dosis de PAC que van en un rango de 1200 a 3000 mg/l. En la Tabla 14, se presentan los resultados obtenidos para este ensayo.

Tabla 14. Valores obtenidos para la determinación de dosis óptima de floculante

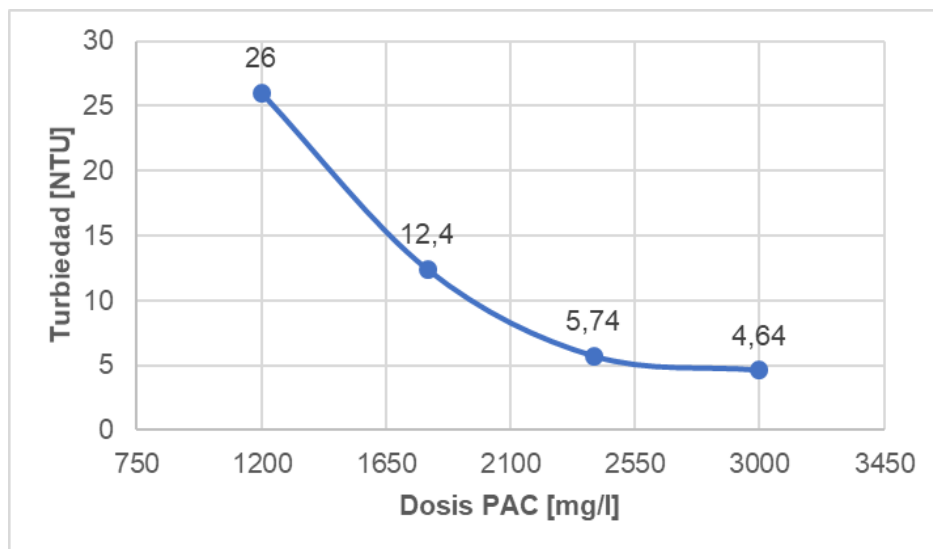
Jarra	1	2	3	4
pH modificado	6.5	6.5	6.5	6.5
Dosis FeCl ₃ [mg/l]	1800	1800	1800	1800
Dosis PAC [mg/l]	1200	1800	2400	3000
Turbiedad inicial [NTU]	240	240	240	240
Turbiedad final [NTU]	26	12.4	5.74	4.64
pH final	6.22	5.26	4.37	4.13
% remoción	89.17	94.83	97.61	98.07

Fuente: Elaboración propia

La Gráfica 3 presenta las diferentes dosis de floculante con las turbiedades obtenidas al finalizar el ensayo de prueba de jarras. La dosis que presenta una excelente remoción de turbiedad corresponde a 3000 mg/l de PAC, sin embargo, el pH se redujo de 6.5 a un valor de 4.13, siendo una reducción de 234 veces, por lo que el lixiviado tratado posee un carácter ácido, que requerirá una corrección antes de su descarga.

En el caso de las dosis de 1800 y 2400 mg/l también se obtuvieron eficiencias de remoción de 94.8% y 97.6%, respectivamente. A pesar de ello, las dosificaciones se descartaron debido a que cuando aumenta la dosis de PAC se produce un descenso del pH residual en un rango de 4 – 5.5.

A una dosis de 1200 mg/l de PAC, se tiene una remoción de turbiedad del 89.2% en el lixiviado, y está representado por 26 NTU. Además, el pH se vio ligeramente reducido a un valor de 6.22, el cual se encuentra dentro de los límites permisibles para descargas que establece el TULSMA. Por tanto, la dosis óptima de floculante se establece en base a la remoción de la turbiedad y al pH residual al final del ensayo de prueba de jarras, dando por resultado una dosis de 1200 mg/l de PAC.



Gráfica 3. Dosis de PAC vs. Turbiedad

Fuente: Elaboración propia

3.5 Resultados para la velocidad óptima de coagulación

La Tabla 15 muestra los resultados obtenidos para diferentes velocidades de coagulación, empleando una modificación de pH de 6.5 y dosis de coagulante y floculante de 1800 y 1200 mg/L, respectivamente.

Tabla 15. Valores obtenidos para la determinación de la velocidad óptima de coagulación

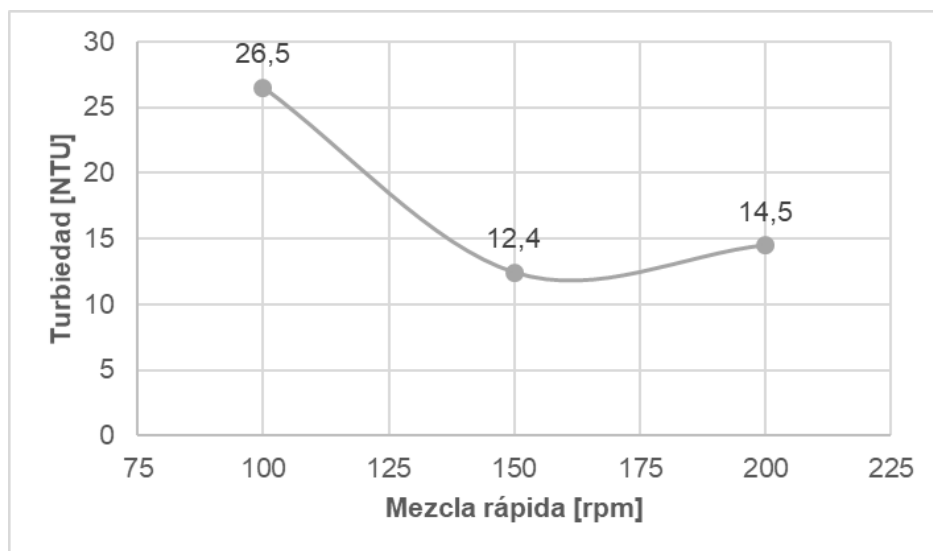
Jarra	1	2	3
Velocidad de mezcla rápida [rpm]	100	150	200
Turbiedad inicial [NTU]	240	240	240
Turbiedad final [NTU]	26.5	12.4	14.5
pH final	6.2	6.09	6.1
% remoción	89.2	94.8	97.6

Fuente: Elaboración propia

La Gráfica 4 presenta las diferentes velocidades de coagulación con las turbiedades obtenidas al finalizar el ensayo de prueba de jarras. Se refleja que, a una velocidad de 150 rpm la remoción de turbiedad es del 94.8% en el lixiviado,

con un pH residual de 6.09. Para las velocidades de mezcla de 100 y 200 rpm, también se obtuvieron reducciones de turbiedad superiores al 89%, las cuales al final del ensayo indicaron pH residuales de 6.2 y 6.1, respectivamente.

Hasta el momento todos los ensayos a diferentes velocidades de mezcla rápida, cumplen con remover un buen porcentaje de la turbiedad del lixiviado y además el pH residual se encuentra dentro de los límites permisibles para descargas que establece el TULSMA. Por tanto, en base a los resultados obtenidos la velocidad óptima de mezcla es de 150 rpm por un tiempo de 60 segundos.



Gráfica 4. Mezcla rápida vs. Turbiedad

Fuente: Elaboración propia

3.6 Resultados para el gradiente y tiempo óptima de floculación

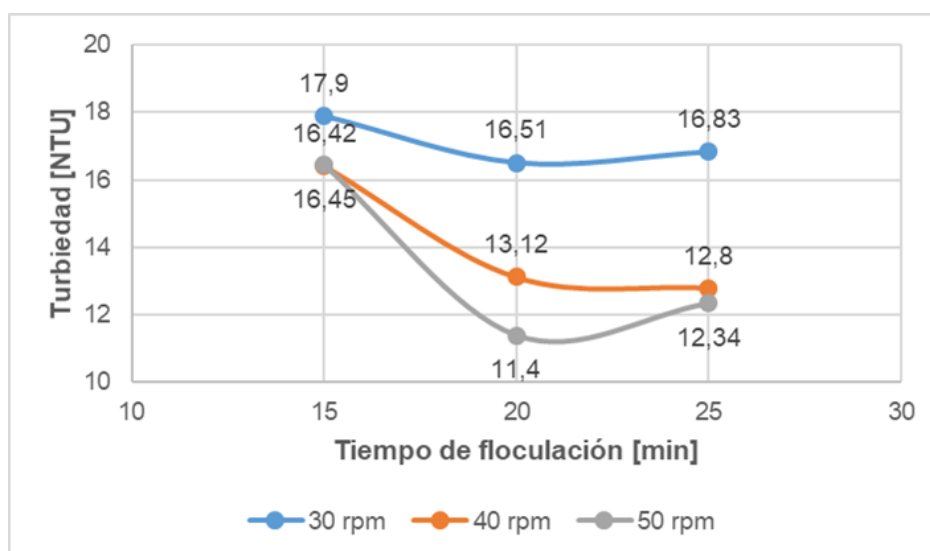
La Tabla 16 muestra los resultados obtenidos para diferentes velocidades y tiempos de floculación, empleando corrección del pH a un valor de 6.5, velocidad de mezcla rápida de 1500 rpm y dosis de coagulante y floculante de 1800 y 1200 mg/L, respectivamente.

Tabla 16. Valores obtenidos para la determinación de la velocidad óptima de coagulación

Gradientes de floculación	Turbiedad final [NTU]		
	Tiempo de floculación [min]		
	15	20	25
30 rpm (28 s ⁻¹)	17.9	16.51	16.83
40 rpm (32 s ⁻¹)	16.42	13.12	12.8
50 rpm (56 s ⁻¹)	16.45	11.4	12.34

Fuente: Elaboración propia

La Gráfica 5 permite observar que el tiempo de floculación, que produce la menor turbiedad residual (11.4 NTU), corresponde a 20 minutos, con una velocidad de agitación de las paletas de 50 rpm y un gradiente de velocidad de 56 s⁻¹. Además, se evidencia que conforme pasa el tiempo existe reducciones significativas de turbiedad en los diferentes gradientes de floculación.



Gráfica 5. G. floculación vs. Turbiedad

Fuente: Elaboración propia

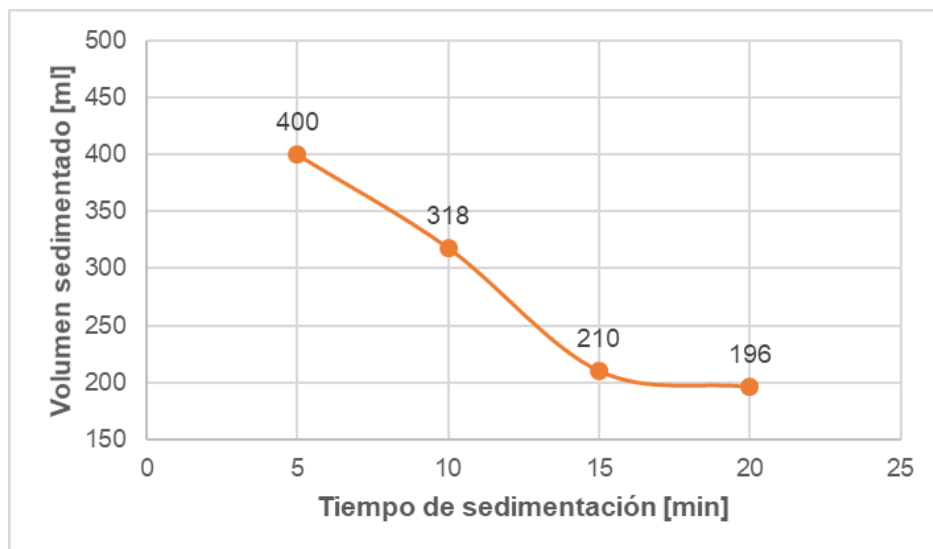
3.7 Resultados para el tiempo óptimo de sedimentación

La Tabla 16 presenta los resultados obtenidos para determinar el tiempo de sedimentación en el ensayo de prueba de jarras.

Tabla 17. *Valores obtenidos para la determinación de la velocidad óptima de coagulación*

Tiempo de sedimentación [min]	Volumen de sedimentación [ml]
5 min	400
10 min	318
15 min	210
20 min	196

El tiempo óptimo de sedimentación corresponde al tiempo en el que la mayor parte de flóculos se sedimentaron en la parte inferior del recipiente, y en el que se pudo visualizar el sobrenadante tratado, con mínima turbidez. En la Gráfica 6 se puede apreciar que inicialmente los flóculos se encuentran en suspensión ocupando un volumen de 400 ml. Posteriormente el volumen disminuye significativamente en los tiempos de 10 y 15 minutos de sedimentación, con volúmenes de 318 y 210 ml, respectivamente. Los flóculos se iban haciendo pesados y se depositaban en el fondo y a los 20 minutos, se visualizó un volumen de sedimento de 196 ml, que a partir del mismo no se observó un volumen inferior. Por tanto, el tiempo de sedimentación considerado para el tratamiento de lixiviados es de 15 – 20 minutos.



Gráfica 6. Tiempo de sedimentación vs. Volumen sedimentado

Fuente: Elaboración propia

3.8 Resultados de la eficiencia del tratamiento de coagulación-floculación

Las Tablas 18, 19 y 20 reflejan los resultados obtenidos en los análisis físicos – químicos, biológicos y de metales en el lixiviado, antes y después de su tratabilidad. En total se analizaron 22 parámetros para determinar la eficiencia de remoción de contaminantes y comparar con respecto a los límites máximos permisibles de descarga establecidos en el Anexo I del Libro VI del TULSMA.

De los 22 parámetros analizados solo el 68% (15), tuvo reducciones en su concentración al finalizar la tratabilidad. Cabe recalcar, que en algunos casos la remoción de contaminantes supera el 75%, en otros se visualiza remociones que van en un rango del 0 – 25% y en parámetros como el cloruro, sulfato, conductividad, sólidos disueltos y sólidos totales incrementaron sus valores iniciales.

La Tabla 18 refleja que los valores iniciales de cada parámetro superan los límites permisibles para descargas establecidos en el TULSMA. Sin embargo, al

finalizar el tratamiento del lixiviado, los parámetros físicos que cumplen con los límites permisibles son el pH y los sólidos suspendidos.

Tabla 18. Análisis físicos del lixiviado crudo y tratado

Parámetro	Unidades	LC	LT	% remoción	LPA	LPD
Conductividad	mS/cm	25.90	27.70	–	–	–
Sólidos Disueltos	mg/l	8210	13430	–	–	–
Sólidos suspendidos	mg/l	750	110	85.3	130	120
Sólidos Totales	mg/l	10320	16540	–	1600	1600
Turbidez	NTU	240	11.40	95.3	–	–
Potencial hidrógeno (pH)	–	8.57	6.20	27.7	6 – 9	6 – 9

Fuente: Elaboración propia

Nota: LC – lixiviado crudo; LT – lixiviado tratado; LPA – límites máximos permisibles para descargas en cuerpos de agua y LPD – límites máximos permisibles para descargas en alcantarillado.

Al finalizar el tratamiento, se tubo remociones de un 85 y 95% para los sólidos suspendidos y la turbidez, respectivamente. Esto se evidencio al notar un cambio en el aspecto inicial del lixiviado, siendo un color muy oscuro que limitaba el paso de la luz, contrario al lixiviado tratado, que presentaba alta transparencia.

Para sólidos totales es entendible que su valor incrementara a 16540 mg/l, puesto que el análisis se realizó sin haber filtrado la muestra del lixiviado tratado y además se debe a la formación de flóculos, caso contrario, para los sólidos suspendidos en donde sí se filtró la muestra se tuvo una remoción del 85.3%. Por otra parte, la concentración de solidos disueltos también incrementó al finalizar el ensayo, y puede deberse a la dosificación del coagulante y floculante que formaron sales disueltas que no se removieron de forma correcta y que a su vez también contribuyeron al incremento de la conductividad en un valor de 27.7 mS/cm.

La Tabla 19 refleja que los valores iniciales de los parámetros químicos y biológicos superan los límites permisibles para descargas establecidos en el

TULSMA. Sin embargo, al finalizar el tratamiento del lixiviado, los parámetros físicos que cumplen con los límites permisibles son sulfatos y fósforo total.

Tabla 19. Análisis químicos y biológicos del lixiviado crudo y tratado

Parámetro	Unidades	LC	LT	% remoción	LPA	LPD
Cloruros	mg/l	1595	2659	–	1000	–
DBO	mg/l	3120.30	450.90	85.6	100	200
DQO	mg/l	6540	1120	82.9	200	500
Dureza cálcica	mg/l CaCO ₃	210	160	23.8	–	–
Dureza total	mg/l CaCO ₃	2210	340	84.6	–	–
Fosfato	mg/l	104.5	14.50	86.1	–	–
Fósforo total	mg/l	34	4.50	86.8	10	15
Nitrato	mg/l	175	4.00	97.7	–	–
Nitrito	mg/l	0.20	0.02	92.5	–	–
Nitrógeno amoniacal	mg/l	1910	2100	9.5	30	–
Sulfato	mg/l	66.50	143.50	-	1000	400

Fuente: Elaboración propia

Nota: LC – lixiviado crudo; LT – lixiviado tratado; LPA – límites máximos permisibles para descargas en cuerpos de agua y LPD – límites máximos permisibles para descargas en alcantarillado.

La DQO y DBO residuales obtuvieron valores de 1120 y 450.9 mg/l, respectivamente. Los porcentajes de remoción de estos parámetros fueron en un rango del 80 – 90%, indicando que se removió gran cantidad de materia orgánica, materia suspendida, microorganismos y coloides presentes en el lixiviado. Sin embargo, no cumplen con los límites permisibles del TULSMA, pues requiere valores de 100 y 200 mg/l para DQO y DBO en cuerpos de agua; y valores de 200 y 500 mg/l para DQO y DBO en sistemas de alcantarillado.

Para el resto de parámetros también se obtuvieron buenas remociones que van en un rango de 85 – 98%, a excepción de la dureza cálcica y nitrógeno amoniacal que tuvieron remociones de 23.8% y 9.5%, respectivamente.

La Tabla 20 refleja que las concentraciones iniciales de 2 de los 5 metales pesados cumplen con los límites permisibles para descargas establecidos en el

TULSMA tanto para cuerpos de agua como para el alcantarillado, siendo aluminio y zinc con concentraciones de 0.35 y 0.45 mg/l, respectivamente. Por otra parte, el lixiviado con una concentración de 12.5 mg/l de hierro no cumple los límites permisibles de descarga en cuerpos de agua, pero si en descargas a la red de alcantarillado pues posee un valor límite de 25 mg/l.

Tabla 20. *Análisis de metales en el lixiviado crudo y tratado*

Parámetro	Unidades	LC	LT	% remoción	LPA	LPD
Aluminio	mg/l	0.35	2.76	–	5	5
Cobre	mg/l	2.66	2.00	24.8	1	1
Cromo hexavalente	mg/l	0.60	< 0.001	99.8	0.5	0.5
Hierro	mg/l	12.50	18.50	–	10	25
Zinc	mg/l	0.75	0.60	20.0	5	10

Fuente: Elaboración propia

Nota: LC – lixiviado crudo; LT – lixiviado tratado; LPA – límites máximos permisibles para descargas en cuerpos de agua y LPD – límites máximos permisibles para descargas en alcantarillado.

Posterior al tratamiento, se evidenció un incremento en las concentraciones de hierro y aluminio, los cuales puede deberse al suministro del coagulante y floculante que tienen sales de hierro y aluminio, en su composición. A pesar que el aluminio incrementó su valor inicial a 2.16 mg/l, este parámetro cumple con los límites permisibles, tanto en la descarga para cuerpos de agua dulce como para las descargas en redes de alcantarillado, con una concentración máxima de 5 mg/l. Caso contrario, como se mencionó anteriormente el hierro no cumple con los límites de descarga en cuerpos de agua dulce y al incrementarse su concentración a 18.5 mg/l, únicamente cumple con el límite permisible de descargas a la red de alcantarillado.

Además, el cromo hexavalente al final del tratamiento se redujo a < 0.001 mg/l, con una eficiencia de remoción del 99.8%. Para el zinc, también se obtuvo una disminución de su concentración a un valor de 0.60 mg/l siendo menor a 5 o 10 mg/l que establece el TULSMA.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El análisis de los 22 parámetros físicos, químicos y biológicos, previo a los ensayos de tratabilidad del lixiviado de Romerillos, indicaron una concentración elevada de los diferentes contaminantes superando en su mayoría los límites máximos permisibles para descargas en cuerpos de agua dulce y/o alcantarillado. Las excepciones en este caso, fueron el pH y metales como aluminio, hierro (para alcantarillado) y zinc.
- Los contaminantes con mayor concentración en el lixiviado crudo son sólidos totales (10320 mg/l), sólidos disueltos (8210 mg/l), DQO (6540 mg/l), DBO (3120 mg/l) y dureza total (2210 mg/l); mostrando que la carga contaminante es elevada en materia orgánica, material suspendido, coloides, sales disueltas y iones metálicos, atribuible a un lixiviado joven.
- En las pruebas preliminares del ensayo de jarras, se registró remociones de la turbiedad, del orden del 40%, a dosis de 1500 – 3000 mg/l de FeCl_3 y 1200 – 3000 mg/l de PAC. Con este resultado, en los ensayos finales de tratabilidad del lixiviado, se procedió a modificar el pH como primera variable a ser estudiada y optimizada, en los ensayos.
- Para la modificación del pH óptimo del lixiviado se utilizó H_2SO_4 concentrado, el cual, no es viable para realizar el tratamiento en la planta, puesto que al suministrar este ácido al lixiviado se genera gran cantidad de espuma que puede derramarse por los bordes del recipiente. Se deberá buscar una opción viable de uso para aplicar en una situación real.
- De los ensayos de tratabilidad se determinó que las dosis óptimas de coagulante y floculante son de 1800 y 1200 mg/l para FeCl_3 y PAC, respectivamente, y la remoción de turbiedad fue de 92.3% con un pH residual de 6.2. Las condiciones óptimas para el tratamiento fueron un pH de 6.5, velocidad de mezcla rápida de 150 rpm por 60 seg, gradiente y tiempo de floculación de 50 rpm y 20 min; y tiempo de sedimentación de 20 min.

- Al finalizar la tratabilidad, 15 de los 22 parámetros analizados mostraron reducciones en su concentración. Para parámetros físicos como sólidos suspendidos y turbidez, se obtuvieron remociones entre el 85 y 95%. Para parámetros químicos y biológicos se obtuvieron remociones de DQO y DBO₅ del 82.9% y 85.6%, respectivamente. En cuanto a fosfatos y fósforo total, se registró reducciones del 86.1% y 86.8%, respectivamente. Los otros 9 elementos registraron reducciones, en promedio, del 80%. Para metales pesados como cobre, cromo (VI) y zinc, las remociones fueron 24.81%, 99.83% y 20%, respectivamente.
- El tratamiento físico – químico del lixiviado, no cumple con los límites máximos permisibles para realizar descargas en cuerpos de agua dulce y/o alcantarillado, puesto que solo 7 parámetros son los que cumplen los valores establecidos y estos son: aluminio, conductividad, cromo hexavalente, fósforo total, sulfato, zinc y pH. Sin embargo, son muy buenas las remociones logradas en los principales índices de contaminación: DQO, DBO y turbidez.

4.2 Recomendaciones

- Optimizar el tratamiento del lixiviado, hasta obtener un grado de cumplimiento adecuado de la norma ambiental. Como segundo tratamiento a realizarse después del tratamiento físico – químico, pueden ser los tratamientos biológicos pues el índice de biodegradabilidad refleja buenas posibilidades de investigación.
- Evaluar las características físico – químicas y biodegradabilidad de los lodos producidos en el tratamiento, con el fin de realizar un tratamiento adecuado para su disposición final.
- Realizar un análisis de costos del FeCl₃ y PAC, con respecto a otros coagulantes y floculantes disponibles en el mercado.
- En una situación real, en caso de emplearse el tratamiento físico – químico con las condiciones óptimas establecidas, es primordial que la planta cuente con personal técnico adecuadamente capacitado para manejar sustancias peligrosas como el H₂SO₄, así como también, condiciones óptimas para el almacenamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, A., Jingsong, G., Zhi Ping, L., Ying-Ya, P., & Al-Rekabi, W. (2009). Review on Landfill Leachate Treatments. *Science Publications*, 13.
- Angadi, S., Shetty, R., & Manjunath, N. (2015). Coagulation study to remove heavy metals from leachate. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 04(06), 4095–4099.
<https://doi.org/10.15680/IJRSET.2015.0406037>
- Baird, C., & Cann, M. (2014). *Química ambiental* (2ª ed.). Editorial Reverte.
- Baird, R., Rice, E., & Eaton, A. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* B. , *Water Environment Federation, Chair Eugene W. Rice, American Public Health Association Andrew D. Eaton, American Water Works Association* (23ª ed.). American Public Health Association.
- Barrenechea Martel, A. (2004). Coagulación. En *Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida* (Vol. 1, p. 597). Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Chávez, W. (2011). *Tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario de la Cd. De Chihuahua, México* [Tesis de pregrado, Centro de Investigación en Materiales Avanzados].
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/858/1/Wendy%20Margarita%20Chávez%20Montes%20MCTA.pdf>
- Christensen, T. (2012). *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*. Elsevier.

- Gálvez Pérez, A. (2008). *Aplicabilidad de procesos de coagulación-floculación y de sistema de biopelícula en el tratamiento de lixiviados de vertederos de residuos urbanos* [Tesis de doctorado, Universidad de Granada].
<https://digibug.ugr.es/handle/10481/1886>
- Ghosh, S., & Hasan, S. (2010). Sanitary Landfill. *Encyclopedia of Life Support Systems*, 3, 10.
- Giraldo, E. (2014). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances recientes. *Revista de Ingeniería*, 14.
- Gómez Blasco, A. L. (2016). *Análisis de un sistema de tratamiento de lixiviados mediante evaporación; caso estudio: Rellenos sanitarios RESA, S.A. de C.V., en Puebla, Pue* [Tesis de postgrado, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla].
<https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/2265>
- Gómez, E. (2018). *Afectaciones ambientales de los lixiviados generados en los rellenos sanitarios sobre el recurso agua* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander].
<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/173184.pdf>
- Google Earth. (s/f). *[Relleno sanitario Romerillos]*. Recuperado el 2 de septiembre de 2022, de <https://earth.google.com/>
- HACH. (2000). *Manual de Análisis de agua* (2ª ed.). HACH COMPANY.
- Infoagro. (2017). ¿Qué es la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos? *Revista InfoAgro México*. <https://mexico.infoagro.com/que-es-la-conductividad-electrica-y-los-solidos-totales-disueltos/>

- López, L. (2011). *Diagnóstico, caracterización y propuesta de tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de la ciudad de Ambato* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional].
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3952/1/CD-3713.pdf>
- Lozada, P. T., Barba-Ho, L. E., Ojeda, C., Martínez, J., & Castaño, Y. (2014). Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico-química y su potencial de toxicidad. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(1), 245–255. <https://doi.org/10.31910/rudca.v17.n1.2014.960>
- Manahan, S. (2007). *Introducción a la química ambiental* (M. Durán, Ed.; I. Mora, Trad.; 1ª ed.). Editorial Reverte.
- Metcalf & Eddy. (1997). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización* (Vols. 1–2). McGraw-Hill.
- Morling, S. (2007). Landfill leachate, generation, composition, and some findings from leachate treatment at Swedish plants. *Vannforeningen*, 13.
- Orozco Jaramillo, A. (2014). *Bioingeniería de aguas residuales: Teoría y diseño* (2ª ed.). Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Ramis Cirujeda, J. (2019). *Aguas residuales urbanas* (1ª ed.). Editorial Elearning S.L.
- Renou, S., Givaudan, J., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity. *Elsevier*, 150, 468–493.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>
- Röben, E. (2002). *Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales*. DED/Ilustre Municipalidad de Loja.
<https://www.accionecologica.org/wp-content/uploads/loja.pdf>

- Romero Rojas, J. (2009). *Calidad del agua* (3ª ed.). Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Salazar, L., & Saavedra, I. (2009). *Tratamiento de lixiviados: Casos prácticos en diferentes temperaturas*. Universidad del Norte & REDISA.
- Saleh, H., & Aglan, R. (2018). *Heavy Metals* (1ª ed.). IntechOpen.
- Serdarevic, A. (2018). Landfill Leachate Management—Control and Treatment. En *Advanced Technologies, Systems, and Applications II* (pp. 618–632).
https://doi.org/10.1007/978-3-319-71321-2_54
- Shah, M., Sarkar, A., & Mandal, S. (2021). *Wastewater Treatment: Cutting-Edge Molecular Tools, Techniques and Applied Aspects* (1ª ed.). Editorial ELSEVIER.
- Sierra Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico* (1ª ed.). Universidad de Medellín.
- Tamires, C., Trindade, D., & Droste, A. (2020). Eliminación del nitrógeno amoniacal del lixiviado de vertedero municipal con *Typha domingensis* (TYPHACEAE) en flotación. *Acta Biológica Colombiana*, 25(1), 5–13.
<https://doi.org/10.15446/abc.v25n1.74749>
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2002). *Handbook of Solid Waste Management* (2ª ed.). McGraw-Hill.
- TULSMA. (2018). *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de efluentes: Recurso Agua*. <https://maeorellana.files.wordpress.com/2015/11/anexo-1-agua.pdf>
- Yao, R. (2013). *Design and Management of Sustainable Built Environments* (1ª ed.). Springer Science & Business Media.

Youcai, Z. (2019). *Pollution Control Technology for Leachate from Municipal Solid Waste: Landfills, incineration Plants, and Transfer Stations* (1^a ed.). Butterworth-Heinemann.

ANEXOS

ANEXO I

REGISTRO FOTOGRÁFICO DE VISITA TÉCNICA EN EL RELLENO SANITARIO “ROMERILLOS” Y RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS



Figura 8. Depósito de basura

Fuente: Elaboración propia



Figura 9. Recirculación de lixiviados

Fuente: Elaboración propia



Figura 10. Vista panorámica de las piscinas de lixiviado

Fuente: Elaboración propia



Figura 11. Vista en planta de la piscina N° 1 de lixiviado

Fuente: Elaboración propia



Figura 12. Vista en planta de la piscina N° 2 de lixiviado

Fuente: Elaboración propia



Figura 13. Planta de tratamiento de lixivados

Fuente: Elaboración propia



Figura 14. Caja de control de motor para agitación

Fuente: Elaboración propia



Figura 15. Lixiviado crudo y lixiviado tratado

Fuente: Elaboración propia



Figura 16. Recolección de lixiviados

Fuente: Elaboración propia



Figura 17. Transporte de lixiviado en bidones de plástico

Fuente: Elaboración propia

ANEXO II

REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO Y BIOLÓGICO Y PRUEBAS DE TRATABILIDAD DEL LIVIVIADO



Figura 18. Medición de pH

Fuente: Elaboración propia



Figura 19. Medición de la conductividad

Fuente: Elaboración propia



Figura 20. Análisis de sólidos

Fuente: Elaboración propia



Figura 21. Preparación de diluciones para los análisis.

Fuente: Elaboración propia

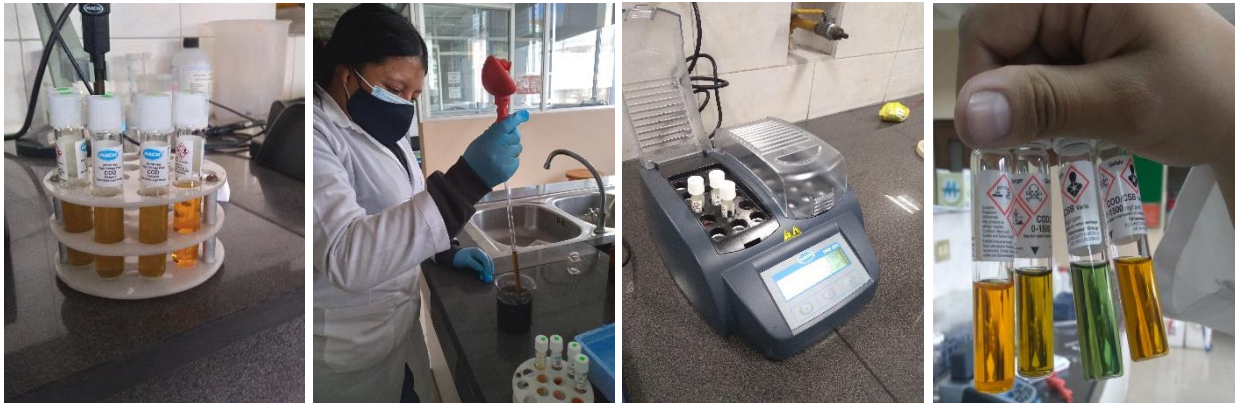


Figura 22. Análisis de DQO

Fuente: Elaboración propia



Figura 23. Análisis de nutrientes en el lixiviado

Fuente: Elaboración propia

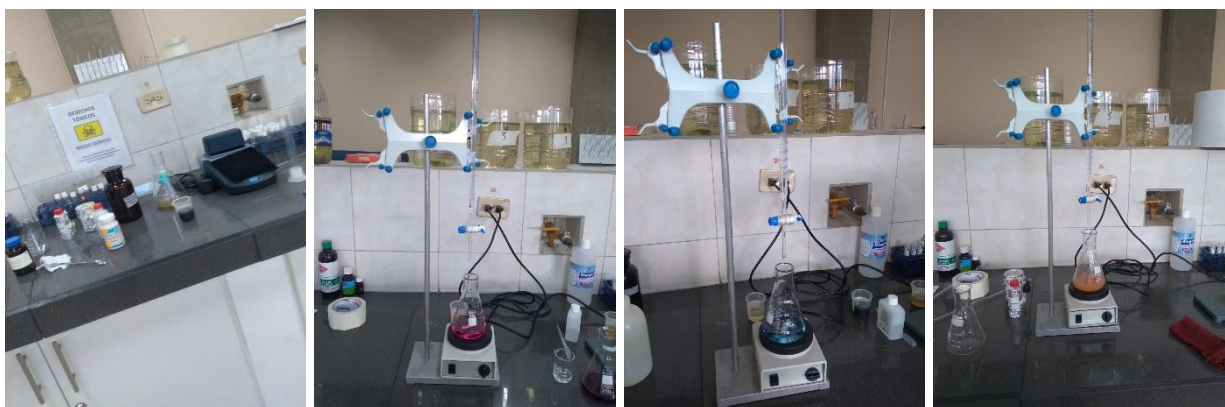


Figura 24. Análisis de dureza total, dureza cálcica y cloruros

Fuente: Elaboración propia



Figura 25. Análisis de metales

Fuente: Elaboración propia



Figura 26. Análisis de DBO_5

Fuente: Elaboración propia



Figura 27. Pesaje de FeCl_3 y PAC para soluciones al 5% y 4%, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia

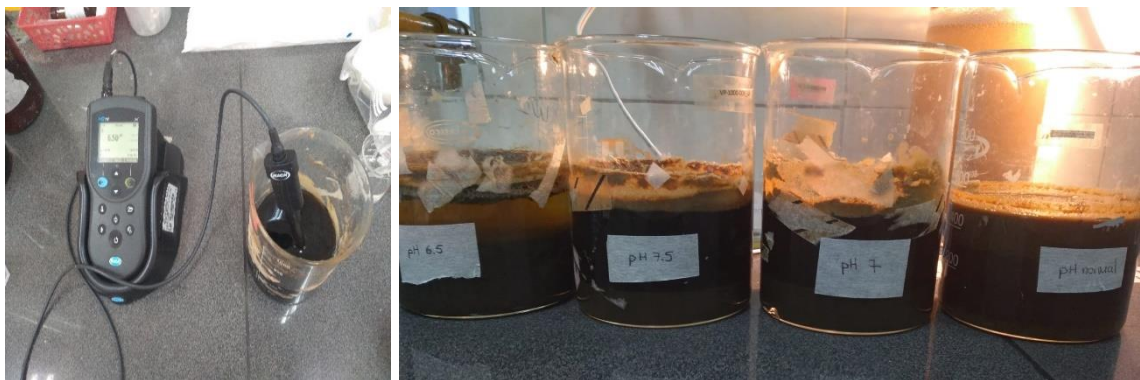


Figura 28. Primera prueba de tratabilidad (pH óptimo de coagulación)

Fuente: Elaboración propia



Figura 29. Segunda prueba de tratabilidad (Dosis óptima de coagulante)

Fuente: Elaboración propia



Figura 30. Tercera prueba de tratabilidad (Dosis óptima de floculante)

Fuente: Elaboración propia



Figura 31. Valores finales de pH y turbiedad

Fuente: Elaboración propia

ANEXO III

**DATOS EXPERIMENTALES DE LOS ENSAYOS DE PRUEBAS DE JARRAS
PARA EL TRATAMIENTO DE COAGULACIÓN FLOCULACIÓN CON FeCl_3 Y
RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO- QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS.**



Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental
Carrera de Ingeniería Ambiental

Lugar: Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDÍA)

Prueba N°: 1

Volumen de muestra: 2 L

Tabla 21. Condiciones para la prueba de jarras N° 1

Parámetro	Velocidad [rpm]	Tiempo [min]
Mezcla rápida	100	1
Mezcla lenta	40	20
Sedimentación	-	10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Resultados obtenidos en la prueba de jarras N° 1 para pH óptimo de coagulación

Jarra	1	2	3	4
pH inicial del lixiviado	8,6	8,6	8,6	8,6
Turbiedad inicial [NTU]	240	240	240	240
Volumen de lixiviado [ml]	500	500	500	500
Volumen de H ₂ SO ₄ [ml]	3	2,1	1,5	0
pH modificado	6,54	7,08	7,46	8,6
Dosis FeCl ₃ [mg/l]	1800	1800	1800	1800
Dosis PAC [mg/l]	1200	1200	1200	1200
Índice de Willcomb [W]	4	4	4	4
Turbiedad final [NTU]	25.1	117	118	122
pH final	6.4	7.19	7,84	8.19
% remoción	89,58	51,25	50,83	49,17

Fuente: Elaboración propia



Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental
Carrera de Ingeniería Ambiental

Lugar: Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDÍA)
Prueba N°: 2
Volumen de muestra: 2 L

Tabla 23. Condiciones para la prueba de jarras N° 2

Parámetro	Velocidad [rpm]	Tiempo [min]
Mezcla rápida	100	1
Mezcla lenta	40	20
Sedimentación	-	10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Resultados obtenidos en la prueba de jarras N° 2 para dosis óptima de coagulante

Jarra	1	2	3	4
pH inicial	6,52	6,49	6,51	6,52
Turbiedad inicial [NTU]	240	240	240	240
Volumen de lixiviado [ml]	500	500	500	500
Dosis FeCl ₃ [mg/l]	1500	1800	2100	2400
Dosis PAC [mg/l]	1200	1200	1200	1200
Índice de Willcomb [W]	4	4	4	4
Turbiedad final [NTU]	35,6	27,1	37,2	41,3
pH final	6,34	6,22	5,74	4,78
% remoción	95,29	96,42	98,83	98,52

Fuente: Elaboración propia



Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental
Carrera de Ingeniería Ambiental

Lugar: Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDÍA)

Prueba N°: 3

Volumen de muestra: 2 L

Tabla 25. Condiciones para la prueba de jarras N° 3

Parámetro	Velocidad [rpm]	Tiempo [min]
Mezcla rápida	100	1
Mezcla lenta	40	20
Sedimentación	-	10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Resultados obtenidos en la prueba de jarras N° 3 para dosis óptima de floculante

Jarra	1	2	3	4
pH inicial	6,54	6,54	6,54	6,54
Turbiedad inicial [NTU]	240	240	240	240
Volumen de lixiviado [ml]	500	500	500	500
Dosis FeCl ₃ [mg/l]	1800	1800	1800	1800
Dosis PAC [mg/l]	1200	1800	2400	3000
Índice de Willcomb [W]	4	4	4	4
Turbiedad final [NTU]	26	12.4	5.74	4.64
pH final	6.22	5.26	4.37	4.13
% remoción	89.17	94.83	97.61	98.07

Fuente: Elaboración propia



Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental
Carrera de Ingeniería Ambiental

Lugar: Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDÍA)

Prueba N°: 4

Volumen de muestra: 1.5 L

Tabla 27. Condiciones para la prueba de jarras N° 4

Parámetro	Velocidad [rpm]	Tiempo [min]
Mezcla lenta	40	20
Sedimentación	-	10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Resultados obtenidos en la prueba de jarras N° 4 para velocidad de mezcla rápida

Jarra	1	2	3
pH inicial	6,54	6,54	6,54
Turbiedad inicial [NTU]	240	240	240
Volumen de lixiviado [ml]	500	500	500
Velocidad de mezcla rápida [rpm]	100	150	200
Tiempo de mezcla rápida [s]	60	60	60
Dosis FeCl ₃ [mg/l]	1800	1800	1800
Dosis PAC [mg/l]	1200	1200	1200
Índice de Willcomb [W]	4	4	4
Turbiedad final [NTU]	26.5	12.4	14.5
pH final	6.2	6.09	6.1
% remoción	89.17	94.83	97.61

Fuente: Elaboración propia



Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental
Carrera de Ingeniería Ambiental

Lugar: Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDÍA)

Prueba N°: 5

Volumen de muestra: 4.5 L

Tabla 29. *Condiciones para la prueba de jarras N° 5*

Parámetro	Condición
Turbiedad inicial	240 NTU
V. lixiviado	500 ml
pH inicial	6.5
V. mezcla rápida	150 rpm
T. mezcla rápida	60 s
T. sedimentación	10 min
Dosis FeCl ₃	1800 mg/l
Dosis PAC	1200 mg/l
pH final	6.2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. *Resultados obtenidos en la prueba de jarras N° 5 para G y t óptimo de floculación*

Mezcla lenta	Jarra 1 (15 min)	Jarra 2 (20 min)	Jarra 3 (25 min)
	Turb. final [NTU]	Turb. final [NTU]	Turb. final [NTU]
30 rpm (28 s ⁻¹)	17.9	16.51	16.83
40 rpm (32 s ⁻¹)	16.42	13.12	12.8
50 rpm (56 s ⁻¹)	16.45	11.4	12.34

Fuente: Elaboración propia



Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental
Carrera de Ingeniería Ambiental

Lugar: Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental (LDÍA)

Prueba N°: 6

Volumen de muestra: 0.5 L

Tabla 31. Condiciones para la prueba de jarras N° 6

Parámetro	Condición
Turbiedad inicial	240 NTU
V. lixiviado	500 ml
pH inicial	6.5
V. mezcla rápida	150 rpm
T. mezcla rápida	60 s
V. mezcla lenta	50 rpm
T. mezcla lenta	20 min
Dosis FeCl ₃	1800 mg/l
Dosis PAC	1200 mg/l

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Resultados obtenidos en la prueba de jarras N° 6 para tiempo óptimo de sedimentación

Jarra	Tiempo de sedimentación [min]	Volumen de lodo sedimentado [ml]
1	5	400
2	10	318
3	15	210
4	20	196

Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Parámetros físico - químicos y biológicos y su cumplimiento con el TULSMA

Parámetro	Unidades	LC	LT	% remoción	LPA	LPD	Cumple LC	Cumple LT
Aluminio	mg/l	0.345	2.755	No hay remoción	5	5	SI	SI
Cloruros	mg/l	1595.25	2658.75	No hay remoción	1000	Sin valor	NO	NO
Cobre	mg/l	2.66	2	24.8	1	1	NO	NO
Conductividad	mS/cm	25.9	24.7	4.6	Sin valor	Sin valor	-	-
Cromo hexavalente	mg/l	0.595	<0.001	99.8	0.5	0.5	NO	SI
DBO ₅	mg/l	3120.3	450.9	85.5	100	250	NO	NO
DQO	mg/l	6540	1120	82.9	200	500	NO	NO
Dureza cálcica	mg/l	210	160	23.8	Sin valor	Sin valor	-	-
Dureza total	mg/l	2210	340	84.6	Sin valor	Sin valor	-	-
Fosfato	mg/l	104.5	14.5	86.1	Sin valor	Sin valor	-	-
Fósforo total	mg/l	34	4.5	86.8	10	15	NO	SI
Hierro	mg/l	12.5	18.5	No hay remoción	10	25	SI (LPD)	SI (LPD)
I. biodegradabilidad	-	0.48	0.40	-	Sin valor	Sin valor	-	-
Nitrato	mg/l	175	4	97.7	Sin valor	Sin valor	-	-
Nitrito	mg/l	0.2	0.015	92.5	Sin valor	Sin valor	-	-
Nitrógeno amoniacal	mg/l	1910	2100	No hay remoción	30	Sin valor	NO	NO
pH	-	8.57	6.2	-	6	6	SI	SI
Sólidos disueltos	mg/l	8210	13430	No hay remoción	Sin valor	Sin valor	-	-
Sólidos suspendidos	mg/l	750	11.3	98.5	130	220	NO	SI
Sólidos totales	mg/l	10320	16540	No hay remoción	1600	1600	NO	NO
Sulfato	mg/l	66.5	143.5	No hay remoción	1000	400	SI	SI
Turbidez	NTU	240	110	54.2	Sin valor	Sin valor	-	-
Zinc	mg/l	0.75	0.6	20.0	5	10	SI	SI

Fuente: Elaboración propia

Nota: LC – lixiviado crudo; LT – lixiviado tratado; LPA – límites máximos permisibles para descargas en cuerpos de agua y LPD – límites máximos permisibles para descargas en alcantarillado

