Universidad Nacional Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

TRATAMIENTO POR OXIDACIÓN FENTON Y CAL PARA REMOCIÓN DE DQO Y NEUTRALIZACIÓN DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO "MODELO DEL CALLAO", 2025

Línea de investigación:

Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Román Salas, Juan Carlos

Asesor:

Vásquez Aranda, Ahuber Omar

ORCID: 0000-0002-2873-6752

Jurado:

Naupay Vega, Marlitt Florinda

Aparicio Ilazaca, Roxana Clara Yaquely

Paricoto Simon, María Mercedes

Lima - Perú

2025

RECONOCIMIENTO - NO COMERCIAL - SIN OBRA DERIVADA
(CC BY-NC-ND)

TRATAMIENTO POR OXIDACIÓN FENTON Y CAL PARA REMOCIÓN DE DQO Y NEUTRALIZACIÓN DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO “MODELO DEL CALLAO”, 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

27%	26%	4%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	11%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
3	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorio.upsc.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	zaloamati.azc.uam.mx Fuente de Internet	1%
6	repositorio.unesum.edu.ec Fuente de Internet	1%
7	repositorio.unfv.edu.pe:8080 Fuente de Internet	1%
8	repository.unad.edu.co Fuente de Internet	1%
9	documents.mx Fuente de Internet	<1%
10	doczz.com.br Fuente de Internet	<1%
11	Madrid Mendoza, Juan Antonio. "Synthesis of Pure Ca(OH)2 Nanoparticles and Superhydrophobic Suspensions: Consolidation and Waterproofing of	<1%

Universidad Nacional Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

TRATAMIENTO POR OXIDACIÓN FENTON Y CAL PARA REMOCIÓN DE DQO Y NEUTRALIZACIÓN DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO "MODELO DEL CALLAO", 2025

Línea de investigación:
Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación
Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor

Román Salas, Juan Carlos

Asesor

Vásquez Aranda, Ahuber Omar
ORCID: 0000-0002-2873-6752

Jurado

Naupay Vega, Marlitt Florinda
Aparicio Ilazaca, Roxana Clara Yaquely
Paricoto Simon, María Mercedes

Lima – Perú

2025

INDICE

RESUMEN 7
ABSTRACT 8
I. INTRODUCCIÓN 9
1.1. Descripción y formulación del problema 10
1.1.1. Descripción del problema 10
1.1.2. Formulación del Problema 12
1.2. Antecedentes 12
1.2.1. Antecedentes Internacionales 12
1.2.2. Antecedentes Nacionales 15
1.3. Objetivos 18
1.3.1. Objetivo General 18
1.3.2. Objetivos Específicos 18
1.4. Justificación 19
1.5. Hipótesis 20
1.5.1. Hipótesis General 20
1.5.2. Hipótesis Específicas 20
II. MARCO TEÓRICO 21
2.1. Bases Teóricas 21
2.1.1. Residuos Sólidos 21
2.1.2. Tipos de Residuos 21
2.1.3. Transformación Física, Química y Biológica de los Residuos Sólidos 23
2.1.4. Residuos Sólidos Municipales 24
2.1.5. Disposición de Residuos Sólidos Municipales y Generación de Lixiviados 25
2.1.6. Relleno Sanitario 26
2.1.7. Lixiviados 27
2.1.8. Composición de Lixiviados 28
2.1.9. Clasificación de Lixiviados 28
2.1.10. Características Fisicoquímicas de Lixiviados 29
2.1.11. Tratamiento de Lixiviados 30
2.1.12. Tratamiento de Lixiviados por Procesos de Oxidación Avanzada (POA) 32
2.1.13. Proceso FENTON 33
2.1.14. Dosificación en el proceso Fenton 35

2.1.15. Factores que influyen en el Proceso Fenton 35
2.1.16. Relleno Sanitario Modelo del Callao 36
2.2. Marco Conceptual 37
2.2.1. Definición de términos 37
2.3. Marco Legal Ambiental 38
III. MÉTODO 42
3.1. Tipo de investigación 42
3.2. Ámbito espacial y temporal 42
3.2.1. Ámbito temporal 42
3.2.2. Ámbito espacial 42
3.3. Variables 43
3.3.1. Variable Independiente 43
3.3.2. Variable Dependiente 43
3.4. Población y muestra 45
3.4.1. Población 45
3.4.2. Muestra 45
3.5. Instrumentos 45
3.5.1. Técnicas 45
3.5.2. Instrumentos 45
3.6. Procedimientos 45
3.6.1. Monitoreo de campo y caracterización inicial 46
3.6.2. Ensayos Experimentales con Jar Test 47
3.6.3. Determinación Final de DQO y pH 48
3.6.4. Análisis Final 49
3.7. Análisis de datos 49
IV. RESULTADOS 51
4.1. Caracterización Fisicoquímica del Lixiviado 51
4.2. Concentraciones Residuales de DQO y pH con FENTON e Hidróxido de Calcio 52
4.2.1. Concentraciones Residuales de DQO con FENTON 52
4.2.2. Concentraciones Residuales de pH por neutralización con Hidróxido de Calcio 58
4.3. Determinación de la eficiencia en el tratamiento del lixiviado 64
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 68
VI. CONCLUSIONES 71

VII. RECOMENDACIONES 72
VIII. REFERENCIAS 73
IX. ANEXOS 79
9.1. Anexo A. Matriz de consistencia 79
9.2. Anexo B: Ficha técnica para la recolección de datos de campo. 80
9.3. Anexo C. Ficha de recolección de datos de laboratorio 81
9.4. Anexo D Mapa de Ubicación 82
9.5. Anexo E. Panel fotográfico 83

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de residuos 22

Tabla 2. Tipos de residuos urbanos 22

Tabla 3. Procesos de transformación utilizados en gestión de residuos sólidos 23

Tabla 4. Clasificación de los Lixiviados en función a su edad 28

Tabla 5. Características Fisicoquímicas de los Lixiviados 29

Tabla 6. Factores que influyen en el proceso Fenton 35

Tabla 7. Marco Legal Ambiental 38

Tabla 8. Limites de lixiviados para vertidos en masas de agua superficial, Austria. 40

Tabla 9. Operacionalización de Variables de Investigación 44

Tabla 10. Características fisicoquímicas del Lixiviado 51

Tabla 11. Resultados de Demanda Química de Oxigeno (DQO) 52

Tabla 12. Resultado de los niveles de pH en el tratamiento con Hidróxido de Calcio 59

Tabla 13. Eficiencias del primer tratamiento para DQO con 200 mg/l de H_2O_2 65

Tabla 14. Eficiencias del segundo tratamiento para DQO con 400 mg/l de H_2O_2 65

Tabla 15. Eficiencias del tercer tratamiento para DQO con 600 mg/l de H_2O_2 66

Tabla 16. Eficiencias del cuarto tratamiento para DQO con 800 mg/l de H_2O_2 66

Tabla 17. Eficiencias del quinto tratamiento para DQO con 1000 mg/l de H_2O_2 67

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relleno sanitario 27

Figura 2. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada 33

Figura 3. Ubicación de los Rellenos Sanitarios de la provincia de Lima 38

Figura 4. Concentración de 200 mg/l de H2O2 y Comportamiento de DQO 54

Figura 5. Concentración de 400 mg/l de H2O2 y comportamiento de DQO 55

Figura 6. Concentración de 600 mg/l de H2O2 y comportamiento de DQO 56

Figura 7. Concentración de 800 mg/l de H2O2 y comportamiento de DQO 57

Figura 8. Concentración de 1000 mg/l de H2O2 y comportamiento de DQO 58

Figura 9. Niveles de pH obtenidos al 2.5% con $Ca(OH)_2$ 60

Figura 10. Niveles de pH obtenidos al 5% con $Ca(OH)_2$ 61

Figura 11. Niveles de pH obtenidos al 7.5% con $Ca(OH)_2$ 62

Figura 12. Niveles de pH obtenidos al 10% con Ca(OH)2 63

Figura 13. Niveles de pH obtenidos al 15% con Ca(OH)2 64

RESUMEN

El relleno sanitario Modelo del Callao, recibe residuos provenientes de varios distritos de Lima y Callao, los cuales generan lixiviados caracterizados por su alto nivel contaminante y composición química compleja que deben ser tratados antes de ser vertidos a los cuerpos receptores. En ese sentido, esta investigación plantea como **objetivo:** Evaluar el tratamiento por oxidación Fenton y Cal para la remoción de DQO y neutralización de pH en el lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao". La investigación fue de tipo experimental cuya finalidad fue la de mejorar la calidad del lixiviado (remoción de DQO). Para cumplir con esta finalidad, se aplicó un procedimiento basado en la prueba de jarras, utilizando H_2O_2 como oxidante y un catalizador a partir de $FeSO_4$, mientras que para la neutralización final se utilizó $Ca(OH)_2$. La muestra fue trabajada con un pH de 2.68, obteniéndose como **resultado**: La concentración residual de DQO fue de 96.1 mg/l, la cual fue obtenida con las dosis 800 mg/l de H_2O_2 y 500 mg/l de $FeSO_4$ y una remoción total de 1901.4 mg/l de DQO, teniendo como **Conclusión**: la eficiencia final del tratamiento es de 95.2%, mientras que para la neutralización final se consiguió alcanzar un valor de 6.65 de Ph, haciendo uso de una concentración de 15% en una dosis de 5ml de $Ca(OH)_2$, la cual fue comparada con la normativa austriaca para dichos parámetros fisicoquímicos.

Palabras clave: relleno sanitario, lixiviado, relleno sanitario, DQO, prueba de jarras.

ABSTRACT

The generation of municipal solid waste worldwide is a current environmental issue due to the high volumes produced for treatment and final disposal, which form leachates resulting from the degradation of organic matter. The model of Callao sanitary landfill receives waste from several districts of Lima and Callao, which will generate leachates characterized by their high contamination level and complex chemical composition that must be treated before being discharged into receiving bodies. Therefore, this research aims to evaluate the Fenton and Lime oxidation treatment for COD removal and pH neutralization in the leachate from the model of Callao sanitary landfill. The research was experimental and aimed at improving leachate quality (COD removal). To achieve this objective, a procedure based on the jar test was applied, using H2O2 as the oxidant and a FeSO4-based catalyst, while $Ca(OH)_2$ was used for the final neutralization. The sample was worked with a pH of 2.68, obtaining as a final result a residual concentration of 96.1 mg/l of COD, which was obtained with the doses 800 mg/l of H2O2 and 500 mg/l of FeSO4 and a total removal of 1901.4 mg/l of COD resulting in obtaining a final efficiency of 95.5%, while for the final neutralization it was possible to reach a value of 6.65 of Ph, making use of a concentration of 15% in a dose of 5 ml of $Ca(OH)_2$.

Keywords: Landfill, leachate, sanitary landfill, COD, jar test.

I. INTRODUCCIÓN

Los rellenos sanitarios o vertederos son el método principal actualmente utilizado para la eliminación de residuos sólidos municipales en muchos países, y en especial se presentan los lixiviados jóvenes quienes son generados a partir de los vertederos, los cuales son aguas residuales de alta persistencia que muestran una aguda y crónica toxicidad. Los lixiviados no tratados pueden infiltrar en las aguas subterráneas o combinarse con las aguas superficiales y aportar a la contaminación del suelo, aguas subterráneas y aguas superficiales (Deng y Englehardt, 2006).

El lixiviado de vertedero es un líquido coloreado formado principalmente por la filtración de la precipitación a través de espacios abiertos del vertedero o a través de la cubierta del sitio terminado y compactado de los residuos en el mismo relleno. Cabe indicar que, la descomposición de materia orgánica como el ácido húmico puede causar que el agua tienda a ser de una coloración amarilla, marrón o negra (Zouboulis y Katsoyiannis, 2004).

Los vertederos de residuos sólidos municipales a menudo se presentan como aguas residuales peligrosas y muy contaminadas. Estas aguas residuales se definen como tales porque los lixiviados contienen una gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos. compuestos cuyas concentraciones dependen del tipo de residuo, entorno del vertedero, técnica de llenado y antigüedad del vertedero (Chu y Wong, 1994; Renou et. al, 1994). Los procesos de tratamiento aplicados a los lixiviados de vertederos son muy complejos, costosos y generalmente requieren varias aplicaciones de proceso debido a la alta carga de lixiviados y composición química compleja y el volumen variable estacionalmente (Bu et. al, 2013).

El uso de procesos de oxidación avanzada (POA) se considera un método líder para el tratamiento de agua y aguas residuales que contienen contaminantes tóxicos y no biodegradables. Estos procesos utilizan combinaciones de oxidantes, radiación ultravioleta y

catalizadores para generar radicales hidroxilos (OH•) en soluciones y han despertado interés en la degradación de compuestos orgánicos biorrefractarios o peligrosos en aguas residuales. Los contaminantes orgánicos se oxidan mediante radicales libres y se mineralizan en agua, dióxido de carbono y sales minerales (Cheibub et. al, 2014).

Entre los AOP que se emplean, la reacción de Fenton es uno de los procesos más prometedores porque utiliza productos químicos económicos, es fácil de implementar y exhibe un alto rendimiento de oxidación (Chakinala et. al, 2008). El método por utilizar es considerado altamente efectivo por su elevado poder oxidante y de rápida acción, a diferencia de otros sistemas de tratamiento biológicos que requieren mucho mayor tiempo de actuación para alcanzar cierto grado de eficiencia

1.1. Descripción y formulación del problema

1.1.1. Descripción del problema

Los lixiviados son el producto que se obtiene cuando los fluidos líquidos atraviesan un proceso denominado infiltración o percolación, el cual se lleva a cabo cuando los residuos sólidos son sometidos a un proceso de estabilización, asi mismo, también señalan que el tratamiento de estos compuestos suele ser muy complejo, esto asociado a las propiedades de dichos elementos, tales como su elevado grado de toxicidad y variables inestables que pueden ser encontradas en el medio (Méndez et. al, 2010). En este sentido, se debe considerar que siempre existe la posibilidad que en la ejecución del uso de estos rellenos sanitarios se presenten problemas o irregularidades que pueden no converger con las normas ambientales.

La composición química de los lixiviados se debe principalmente al arrastre del material que puede encontrarse en diversas formas como material en suspensión, disuelto, volátil o fijo, en tal sentido, una de sus cualidades es su elevada carga orgánica contaminante. De igual forma por las mismas características, presentan elevadas concentraciones de

contenido de nitrógeno amoniacal (NH3-N), asi como otros compuestos sulfurados, o elementos como arseniato, litio, bario, borato, cobalto y mercurio (Orozco, 2018). A esto se suma el hecho de que los lixiviados generados por los vertederos contienen otras sustancias como producto de la descomposición de los residuos sólidos almacenados, los mismos que incluyen desde la presencia de patógenos, diversos nutrientes hasta elementos tóxicos como metales pesados, teniendo de esta forma en su composición general una mezcla de sustancias orgánicas en mayor orden e inorgánicas en menor orden.

Por ello, resulta importante estudiar el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario "Modelo del Callao"; puesto que, este alberga principalmente los residuos domésticos de la provincia constitucional del Callao y de otros distritos de la provincia de Lima. De los ríos más cercanos al área de estudio tenemos al Rímac y Chillón, cuyo último tramo, próximo al relleno sanitario vienen siendo afectados por la presencia de fuentes antropogénicas encargadas de realizar actividades de reciclaje informal en la ribera de estos, incrementando los problemas de contaminación en toda esta zona.

Puesto que los lixiviados son una especie múltiple de agua residual, las tecnologías que se emplean para tratar aguas residuales domésticas e industriales pueden ser utilizadas y mezcladas como medios para poder llevar a cabo el tratamiento para lograr que los parámetros que caracterizan los lixiviados cumplan con los estándares de su descarga (Chávez, 2011).

Teniendo en cuenta la información tratada en los párrafos previos y, a fin de sumar o coadyuvar con el mantenimiento o mejora de la calidad de las aguas subterráneas, superficiales y del suelo que se encuentran inmersas dentro del área de influencia del relleno sanitario, y que pueden verse impactadas por los lixiviados, se ha planteado desarrollar una investigación que permita un tratamiento práctico y efectivo que asegure su inocuidad a fin de poder ser vertido a un determinado cuerpo receptor. Investigaciones previas señalan que el principal componente

de los lixiviados es la materia orgánica y en menor grado la materia inorgánica, el uso de un agente oxidante como el peróxido de hidrogeno (FENTON), ayudará en que la materia orgánica pueda ser degradada y permita de esta forma, su completa transformación en sustancias y componentes más simples o sencillos como agua y dióxido de carbono, el mismo que deberá ser cuantificado a través de un indicador de presencia de materia orgánica como lo es la DQO, y poder apreciar la efectividad antes y después del tratamiento.

1.1.2. Formulación del Problema

De lo descrito en la descripción del problema se formula la pregunta de investigación en ¿Cómo es el tratamiento por oxidación fenton y cal para remover DQO y neutralizar los lixiviados del relleno sanitario "Modelo del Callao", 2025?, siendo los siguientes los problemas específicos:

- ¿Cómo es la característica de los parámetros fisicoquímicos del lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao"?
- ¿Cuáles son los niveles residuales de la DQO y pH terminado el tratamiento por oxidación fenton y neutralización con cal en el lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao"?
- ¿Cuál es la eficiencia del tratamiento por oxidación fenton para la remoción de DQO y neutralización con cal del pH en el lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao"?

1.2. Antecedentes

1.2.1. Antecedentes Internacionales

Suaibou et al. (2023), en su artículo plantea determinar la eficacia de la eliminación de DQO de los lixiviados de vertederos parcialmente tratados utilizando persulfato y peróxido de hidrógeno como agentes oxidantes en la eliminación de DQO de los lixiviados de vertederos. El efecto de los parámetros operativos: pH, dosis y tiempo de reacción, se evaluaron mediante experimentos de laboratorio en lotes utilizando matraces de 250 ml. En condiciones óptimas,

se obtuvo como resultado que la eliminación de DQO fue del 80.6, 80.4 y 83.5 % cuando se utilizó el tratamiento con persulfato, peróxido de hidrógeno y persulfato/peróxido de hidrógeno combinados, respectivamente. Se concluye que se prefiere el uso de peróxido de hidrógeno solo, ya que es capaz de cumplir con el límite de descarga en una dosis más baja en comparación con el tratamiento combinado de persulfato/peróxido de hidrógeno, lo que hace que el proceso sea económico.

El Mrabet et al. (2022), en su artículo científico planteó Caracterizar fisicoquímicamente el lixiviado del vertedero de la ciudad de Fez (Marruecos) y evaluar la viabilidad de aplicar un proceso Fenton. Dentro de la metodología se utilizó un diseño de experimentos basado en Box–Behnken combinado con un método de superficie de respuesta para evaluar el efecto de tres variables operativas (pH, dosis de Fe 2+ y H2O2) en dos respuestas de objetivo: remoción de DQO y eliminación de color. Los resultados del análisis de varianzas demuestran que ambas respuestas se ven afectadas significativamente por la dosis de Fe 2+ y el pH. Los análisis estadísticos y gráficos muestran que se obtienen eficiencias máximas del 85% y 96% en términos de DQO y eliminación de color, respectivamente, cuando las condiciones operativas se establecen en pH = 2,8, [Fe 2+] = 1621 mg/ L y [H2O2] = 2500 mg/L.

Wang et al. (2021), en su investigación aplicó una estrategia de dosificación dividida de peróxido de hidrógeno (H2O2) simple pero eficiente como parte de un proceso de hierro de valencia cero (Fe0) /H2O 2 para eliminar eficazmente los compuestos orgánicos refractarios del lixiviado de vertederos. Los resultados mostraron que tanto el proceso tradicional Fenton como el Fe0 /H2O2 mostraron resultados de tratamiento comparables, pero el proceso Fe0 /H2O2 (ventajosamente) produjo mucho menos lodo. Además, el proceso Fe0 /H2O2 que utiliza una estrategia de dosificación dividida de H2O2 eliminó los compuestos orgánicos refractarios del lixiviado de vertederos mejor que utilizando la misma dosis de oxidante en una

sola dosis. En condiciones de operación optimizadas (dosis de H2O2 = 12 mL/L) que incluyeron cuatro pequeñas subdosis de H2O2, las eficiencias de remoción de carbono orgánico total, absorbancia de luz a 254 nm y número de color fueron 56,76%, 58,59% y 94,56%, respectivamente. Además, las sustancias similares a húmicas como orgánicos refractarios en el lixiviado se eliminaron casi por completo mediante el proceso mejorado Fe 0 /H 2O2. Nuestros resultados demostraron que la estrategia de dosificación dividida mejoró sustancialmente la producción de radicales hidroxilos (• OH) en el proceso Fe 0 /H2O2. En general, el mecanismo catalítico del proceso único Fe 0 /H2O2 se puede asignar al efecto catalítico homogéneo de Fe 2+ de la lixiviación de Fe 0 y al efecto catalítico heterogéneo de los óxidos de hierro (hidro), los cuales actúan sobre H2O2 para producir • OH. Este estudio proporciona una estrategia eficiente que puede mejorar la eficiencia de eliminación de compuestos orgánicos refractarios para la aplicación práctica del proceso Fe2O3/H2O2.

Mahtab et al. (2021), en su artículo científico evaluaron estadísticamente la eficacia de la técnica de oxidación avanzada basada en Fenton para el tratamiento de lixiviados de vertederos y se determinaron las condiciones operativas óptimas. Este proceso fue optimizado utilizando metodología de superficie de respuesta (RSM) junto con un diseño compuesto central (CCD) de cuatro factores (cinco niveles). Las variables del proceso utilizadas fueron pH, tiempo de reacción, dosis de Fe2+ y H2O2 para estudiar la respuesta y la eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO). Se obtuvo un modelo de regresión cuadrática significativa para ajustar los datos experimentales y todos los factores fueron estadísticamente significativos. El modelo tuvo en cuenta la respuesta dentro del error permitido. Se encontró que el coeficiente de determinación el adecuado era igual a 0,95, la ratio de precisión se obtuvo como 22,133. La eliminación optimizada de DQO del 61 % se obtuvo a un pH de 3.1; el tiempo de reacción de 36 min, dosificación de Fe2+ de 0,04 mol/ L y dosificación de H2O2 de 0,075 mol/ L. Los gráficos de superficie de respuesta sugirieron que los valores de pH más altos no

son favorables y que aumentar la dosis química no siempre conduce a una mayor eficiencia de eliminación de DQO. Los resultados obtenidos estuvieron de acuerdo con los diversos estudios anteriores, aprobando así la precisión del modelo obtenido.

Díaz et al. (2021), en su artículo científico plantearon efectuar las oxidaciones de los lixiviados del relleno sanitario del Centro Ecológico de Manejo Integral de Residuos Querétaro (CEMIRQ), primero con el método de reacción Fenton y se completó la degradación combinándolo con Ozono-UV. Dentro de la metodología empelada las muestras fueron recolectadas en la laguna de lixiviados del Relleno Sanitario del CEMIRQ, se tomó 3 muestras por sitio en 4 sitios accesibles de la laguna se empleó un equipó Van Dorn a 1.50 m de profundidad siendo la laguna de una profundidad promedio de 2.5 metros, así mismo se midieron los parámetros en campo: pH, temperatura y conductividad. Se ajustó el pH entre 3 – 5, se agregó 5.11 gr de sal de Hierro FeSO4. 7H2O y se adicionó lentamente el H2O2 al 30% hasta completar 15 ml para lograr la relación Fe+2 /H2O2 de 0.125 a razón de 1 ml cada minuto para el tratamiento Fenton, luego se combinó con Ozono- UV a diferentes tiempos 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 y 180 minutos, con un flujo de 0.4 L/min y un voltaje de operación de 7kVolts con intervalos de pH entre 7 y 8, para la radiación UV se empleó la lámpara de luz ultravioleta de 365 mm de longitud de onda, intensidad 21000 micro –W/CM2, todos los análisis se realizaron por triplicado. Se obtuvo como resultados una reducción de 14,421.63 mg/L desde la oxidación del lixiviado crudo hasta la oxidación O_3-UV, obteniéndose un 96.05% de eficiencia de remoción de la DQO.

1.2.2. Antecedentes Nacionales

Alave (2024), en su investigación que desarrolló planteó como objetivo Optimizar el proceso Fenton para el tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario Itapalluni Puno, la investigación fue de tipo aplicada de diseño experimental y método hipotético deductivo. Dentro de la metodología la muestra fue tomada de las pozas de almacenamiento del relleno

sanitario Itapalluni, en un envase de 25 L y se llevaron a cabo 3 muestreos y se trabajó con tres reactivos (KOH, FeSO4 y H2O2) con diversas dosificaciones en tres (3) tiempos de medición (7, 14 y 28 días), obteniéndose 9 muestras totales y cada uno con 2 réplicas sumando 27 muestras tomadas en total. La técnica de recolección de datos fue la observación y el instrumento una guía de observación, mientras que el diseño estadístico fue hecho con el análisis ANOVA (Tukey) con el Software Minitab 18, obteniendo como resultados que la dosis óptima de los reactivos con el método "Fenton" fue 16 ml/L de KOH, sumado a 20 ml/L de FeSO4 y 53 ml/L de H2O2, logrando alcanzar con el indicador de biodegradación un valor de 0.4689. Concluyéndose que el método fenton para tratar lixiviados se optimizó con las dosis del tratamiento N° 3 en un tiempo de 28 días considerándose estos como factores idóneos u óptimos en el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario de la localidad Itapalluni – Puno.

Yaranga (2021), en su estudio que realizó planteó comparar la eficiencia de los procesos de oxidación Fenton y foto-Fenton en la remoción de la DQO en lixiviados del botadero El Porvenir, distrito de El Tambo - Huancayo, para lo cual dentro de la metodología primero determinó la caracterización fisicoquímica de los lixiviados, determinó la incidencia del pH y evalúo la relación del peróxido de hidrógeno (H2O2) y el sulfato ferroso (Fe+2) que maximizó la eficiencia en la comparación de los procesos de oxidación; así mismo recolectó 2 muestras de lixiviados para analizarlas; en la experimentación se empleó 2 relaciones molares de 2:1 y 4:1 entre Fe(II) : H2O2; así como valores de pH ácido de 3 y 4. Obteniéndose como resultados del análisis inicial de caracterización de la muestra (sin tratamiento) concentraciones de 55818,00 ppm de DQO y 9058,00 ppm de DBO, la remoción de carga orgánica se expresó en función a la DQO, se logró resultados óptimos para el pH 4 y para la relación molar de 2:1; los cuales se obtuvieron a partir de la adición de una solución de ácido sulfúrico de 2N y una concentración de 400 ppm de H2O2 con 200 ppm de FeSO4 alcanzando una eficiencia de

remoción de DQO de 53,66% para el tratamiento Fenton y 90,68% para el tratamiento foto-Fenton, en expresiones de partes por millón corresponde a un residuo de DQO de 5201,67 ppm y 25865,00 ppm para cada tratamiento respectivamente. Concluyéndose que el proceso foto-Fenton logró mejores remociones gracias a la radiación ultravioleta que aceleró la mineralización de los compuestos orgánicos.

Huaranga (2023), en su investigación planteó como objetivo: Aplicar un método por procesos de oxidación avanzada para el tratamiento de lixiviados generado por el relleno sanitario "El Zapallal"- Carabayllo, para lo cual desarrolló una prueba de jarras donde realizó el tratamiento de las muestras de lixiviado empleando distintas dosis de H2O2 al 25 y 50%, y un catalizador de Fe+2 de 10 g/l en dos medios: el primero medio alcalino con pH 7.6 y otro en medio ácido con pH 3.5, con la finalidad de lograr la eficiencia máxima en la remoción de la DQO, DBO y Turbiedad. Obteniéndose como resultados que las eficiencias máximas se lograron con el H2O2 al 50% y con un pH de 3.5 con una remoción del 91.8% para la DQO, 72.4% para la DBO, y 91.6% para la Turbidez mientras que en medio alcalino se lograron remociones máximas para la DQO, DBO y Turbidez del 62.4, 54.9 y 71.1% respectivamente.

Barrantes (2020), en su estudio planteó como objetivo remover 3 parámetros fisicoquímicos del lixiviado del botadero controlado "La Pushura", empleando el método de oxidación avanzada; la variable ensayada para el proceso Fenton fue la proporción de mezcla [H2O2]/[Fe2+] (0, 2, 4, 6 y 8) y el factor fijo de pH igual a 4. Obteniéndose como resultado que el mejor tratamiento se logró bajo las condiciones [H2O2]/[Fe2+] de 6, donde 20 minutos de reacción bastó para lograr una remoción del 73.29 % de la DQO y en 1 hora de reacción se alcanzó las remociones de 89 y 76.35 % para el color y la turbiedad, respectivamente. Concluyéndose que los procesos de Oxidación Avanzada representan una tecnología atractiva y prometedora en el tratamiento de lixiviados.

Aranivar (2016), en su investigación planteó como objetivo determinar la dosis óptima de reactivo Fenton para remover la DQO del lixiviado de un depósito de seguridad; dentro de la metodología empleada los ensayos experimentales se realizaron en 2 etapas, en la primera etapa se realizó la optimización de H2O2 y en la segunda etapa fue para la optimización de FeSO4; se procedió a acidificar las muestras empleando reactivos ácidos y se procedió a acidificar con los reactivos; después de 24 horas se neutralizó y luego se filtró; el producto obtenido se procedió a diluir para hacer el análisis de la DQO y realizar los ensayos de cromatografía iónica. Obteniéndose como resultado que la dosis óptima de reactivo Fenton que logró la máxima remoción de la DQO en el lixiviado fue de 12000 mg/l de H2O2 y 5000 mg/l de FeSO4, la relación óptima de Fe2+/H2O2 que alcanzó la mejor remoción de DQO fue 0.417. Concluyéndose que el proceso Fenton es una buena opción para tratar efluentes con elevada carga orgánica, así mismo se demostró la oxidación de los materiales orgánicos presente en los lixiviados mediante la minimización de la DQO en 77.79 % y de la DBO en 97.2%; y también se logró reducir las concentraciones de los metales totales.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el tratamiento por oxidación fenton y cal para la remoción y neutralización de DQO y pH en el lixiviado del relleno sanitario “Modelo del Callao”, 2025.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características de los parámetros fisicoquímicos del lixiviado en el relleno sanitario “Modelo del Callao”.
- Determinar los niveles residuales de la DQO y pH al término del tratamiento por oxidación fenton y neutralización con Cal en el lixiviado del relleno sanitario “Modelo del Callao.

- Estimar la eficiencia del tratamiento por oxidación fenton y cal para la remoción de la DQO y neutralización del pH en el lixiviado del relleno sanitario “Modelo del Callao”.

1.4. Justificación

La justificación teórica, se sustenta en la gran capacidad oxidante que presentan ciertos compuestos químicos como el peróxido de hidrógeno y el sulfato ferroso para degradar compuestos orgánicos presentes en los lixiviados. En este sentido el presente estudio plantea el uso de un método combinado de un oxidante más un neutralizante químico que aseguren la completa inocuidad del lixiviado tratado para ser vertido, con esta investigación se reafirma y complementa los conocimientos ya conocidos que han aportado al respecto otros investigadores sobre el tratamiento de lixiviados provenientes de los rellenos sanitarios mediante el uso de agentes fuertemente oxidantes.

La justificación practica se basa principalmente, en la aplicación que se podrá dar con el uso del tratamiento propuesto quien permitirá resolver un problema a diferencia de los métodos tradicionales, esto debido a que obtienen un alto nivel de eficiencia en la degradación de compuestos orgánicos alcanzando un bajo nivel de sales sedimentadas al final del proceso, de tal manera que podrá ser vertido a los cuerpos receptores sin ocasionar un impacto negativo sin ocasionar daño a los usuarios.

La justificación metodológica, se sustenta sobre la base técnica a utilizar, como es la prueba de jarras ampliamente conocida en muchos ensayos de laboratorio y aplicados para desarrollar experimentos pilotos sobre tratamiento de aguas. Los rellenos sanitarios al pasar por un proceso de descomposición generan lixiviados con un elevado grado de toxicidad. El uso de la técnica a utilizar permitirá asegurar una degradación completa de los compuestos más recalcitrantes que están presentes en los lixiviados, transformándolos en compuestos más

sencillos como agua y dióxido de carbono, inofensivos para el medio ambiente. Los reactivos químicos utilizados serán de mínima cantidad, ya que se desarrollará una prueba de jarras a fin de alcanzar su nivel óptimo en el tratamiento y no generar gastos excesivos, asimismo, la presente investigación pretende obtener un efluente que cumpla con los Límites Máximos Permisibles para vertimientos.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

La oxidación fenton y la Cal permitirán remover la DQO y neutralizar el pH eficientemente en el lixiviado del relleno sanitario “Modelo del Callao”, 2025.

1.5.2. Hipótesis Específicas

- Los parámetros fisicoquímicos están elevados excediendo los límites máximos permisibles en el lixiviado del relleno sanitario “Modelo del Callao”.
- La oxidación fenton y la Cal remueven y neutralizan eficientemente la DQO y el pH en el lixiviado del relleno sanitario “Modelo del Callao”.
- La oxidación fenton y la Cal son altamente eficientes para la remoción de la DQO y neutralización del pH en el lixiviado del relleno sanitario “Modelo del Callao”.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Bases Teóricas

2.1.1. Residuos Sólidos

Los residuos sólidos presentan una porción orgánica de naturaleza biodegradable y otra porción inorgánica de tipo no biodegradable, en éste último caso la desintegración natural es lenta gracias a sus características químicas; es por ello que su manejo y disposición final necesita contar con medidas de prevención en la contaminación ambiental; ya que un mal uso e inadecuada gestión de los desechos contribuye en la contaminación del suelo, agua y aire la cual aumenta la proliferación de agentes que transmiten enfermedades contagiosas. En este mismo sentido se tiene que un desecho es cualquier clase de material producido por la actividad humana y que tiene como finalidad desecharse; es así que los desechos sólidos están definidos como los desperdicios que no son transportados por agua y que son rechazados porque ya no usaran. Estos desechos incluyen diferentes residuos combustibles como vidrio, madera, textiles, plástico, papel, etc. y no combustibles como metales y otros.

Para los residuos sólidos de los municipios se usan casos específicos como residuos de alimentos sujetos a descomposición (biodegradables) denominados basura, y a los residuos sólidos no degradables que son simplemente denominados “desechos” (Ávila, 2022, pp. 4).

2.1.2. Tipos de Residuos

Hay diversas maneras de clasificar los tipos residuos, así tenemos una clasificación por su peligrosidad, naturaleza, por el tipo de material que los conforman, etc. Según el impacto potencial sobre el ambiente, podemos clasificarlos en orden de menor a mayor, según:

Tabla 1

Tipos de residuos

Tipos de residuos	Descripción
Residuos inertes	Son residuos de tipo escombro, material de derribo, relleno, gravas, determinadas escorias y cenizas, ciertos fangos desecados de tratamiento de minerales, etc.
Residuos asimilables a urbanos	Los más representativos son: madera, papel, cartón, embalajes, plásticos, gomas, pieles, tejidos, vidrios, metales, arcillas, etc
Residuos no peligrosos	Aquellos que no pueden asimilarse a los generados en los domicilios y que tampoco puedan ser englobados dentro de los inertes.
Residuos peligrosos	Son materiales que en cualquier estado físico o químico contienen elementos o sustancias que pueden representar un peligro para el medio ambiente, la salud humana o los recursos naturales

Nota. Adaptado de Ávila (2022, pp. 5 – 6)

Los residuos urbanos se dividen en 3 tipos: Residuos Orgánicos, residuos inorgánicos y residuos peligrosos

Tabla 2

Tipos de residuos urbanos

Tipos de residuos urbanos	Descripción
Residuos orgánicos	Proviene de fuentes animales o vegetales y se caracterizan por ser biodegradables, es considerado como el residuo que se produce en mayor cantidad.
Residuos inorgánicos	Todo desecho de origen no biológico, de origen industrial o de algún otro proceso no natural.
Residuos peligrosos	Todo desecho, ya sea de origen biológico o no, que constituye un peligro potencial y por lo cual debe ser tratado de forma especial.

Nota. Tomado de "Características generales de tecnologías para el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios" (pp.7) por Ávila, 2022, Universidad Estatal del Sur de Manabí.

2.1.3. Transformación Física, Química y Biológica de los Residuos Sólidos

Los residuos sólidos pueden transformase por medios físicos, químicos y biológicos, con la intervención del hombre o por fenómenos naturales.

Tabla 3

Procesos de transformación utilizados en gestión de residuos sólidos

Proceso de transformación	Medio o método de transformación	Productos principales de la conversión o transpiración
	Físico	
Separación de componentes	Separación manual y/o mecánica	Componentes individuales encontrados en los residuos urbanos no seleccionados
Reducción en volumen	Aplicación de energía en forma de fuerza o presión	Reducción del volumen de los residuos originales
Reducción de tamaño	Aplicación de energía en forma de trituración	Alteración de forma y reducción de tamaño de los componentes originales.
	Químico	
Combustión	Oxidación térmica	Dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2) y otros productos de oxidación.
Pirolisis	Destilación destructiva	Una corriente de gas que contiene una variedad de gases, alquitrán y/o aceite y un combustible carbono
Gasificación	Combustión de defecto del aire	Un gas bajo poder calorífico, un combustible que contiene carbono e inertes originalmente en el combustible, aceite pirolítico.

	Biológico	
Aerobio	Conversión biológica aerobia	Compost (material húmico utilizado como acondicionador de suelo)
Digestión anaerobia	Conversión biológica anaerobia	Metano (CH4), dióxido de carbono (CO2), trazas de otros gases, humus o fango digestivo.
Compostaje anaeróbico	Conversión biológica anaerobia	Metano (CH4), dióxido de carbono (CO2), residuos digestivos.

Nota. Tomado de "Características generales de tecnologías para el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios" (p.8) por Ávila, 2022, Universidad Estatal del Sur de Manabí.

2.1.4. Residuos Sólidos Municipales

Son aquellos residuos generados en los domicilios de una determinada población, pueden ser lugares privados y públicos, también son residuos que se generan en demoliciones, construcciones y de establecimientos comerciales, y aquellos lugares que brindan diversos servicios a dicha población. La generación y manejo de los residuos sólidos municipales ha evolucionado en el tiempo gracias a la urbanización, el crecimiento económico y la industrialización, por tales motivos la producción de residuos ha incrementado del mismo modo que su composición ha variado. Antes los residuos eran en su mayoría orgánicos, y actualmente la mayoría de los residuos pasó a ser no por lo cual esta clase de residuos hace más difícil su manejo. Existen botaderos a cielo abierto, donde la generación de malos olores demuestra la contaminación atmosférica; es por todo ello que la salud de la población es afectada por estos agentes químicos, físicos y biológicos presentes en los residuos sólidos municipales como consecuencia principal de una pobre gestión de los residuos en una población. Es así como los agentes relacionados a los residuos que alteran la salud de los

trabajadores son el olor, polvo y ruido; las cuales ocasionan problemas como cefalea, náuseas y estrés (Orihuela, 2022, pp. 25-26).

2.1.5. Disposición de Residuos Sólidos Municipales y Generación de Lixiviados

La disposición final de los residuos sólidos municipales consiste en depositarlos permanentemente en sitios y condiciones adecuados para evitar impactos ambientales, pero esto no siempre se cumple ya que generalmente los sitios no cumplen las características requeridas. Así tenemos como sitios de disposición final:

a) Rellenos Sanitarios
b) Rellenos de Tierra Controlados
c) Rellenos de Tierra no Controlados
d) Tiraderos o Botaderos a cielo abierto

Un relleno sanitario planificado, culmina su vida útil, ofrece propuestas de nuevo uso del sitio para otros fines como actividades silvoagropecuarias a largo plazo, recuperación de terrenos y mejora del paisaje; otros sitios de disposición final de residuos sólidos municipales son los rellenos de tierra controlados quienes cuentan con inspecciones, vigilancia y aplicación de las medidas de cumplimiento de la disposición establecida; por otro lado están los rellenos de tierra no controlados que son oquedades donde se disponen y mezclan diferentes residuos sólidos sin control alguno ni protección al ambiente; y finalmente están los botaderos a cielo abierto que son lugares donde de manera clandestina se disponen los desechos municipales sin control técnico, estos pueden ser barrancas, baldíos, ríos, arroyos, manglares u otros cuerpos de agua.

Sin embargo, en muchos países la disposición final más común de los residuos sólidos son los rellenos sanitarios, pero uno de los problemas ambientales más graves actualmente proviene de los residuos líquidos que producen, que son conocidos como lixiviados (Díaz, 2021, pp. 17).

2.1.6. Relleno Sanitario

Los rellenos sanitarios son infraestructuras diseñadas específicamente para el almacenamiento de los residuos, ya sean municipales, peligrosos o de cualquier tipo, esto se lleva a cabo de una forma controlada, de manera que no ocasione ningún riesgo para el ambiente o para la sociedad. En estos emplazamientos los residuos se confinan de forma permanente, asegurando así su correcto aislamiento de la intemperie. La cantidad de biogás generado en los rellenos sanitarios está en función a la composición de los residuos almacenados en éstos y es directamente proporcional a la cantidad de materia orgánica degradable disponible. En el proceso de descomposición se generan lixiviados y biogás que interactúan con el ambiente; es así que una inapropiada gestión ocasionaría un impacto a la salud pública del área de influencia del relleno sanitario.

Las investigaciones tanto teóricas y experimentales demuestran que las biodegradaciones anaeróbicas completas de los RSU originan aprox. 200 Nm3 de metano por tonelada seca de biomasa contenida, pero la tasa de generación de metano reportada en los reactores anaeróbicos industriales varia de 40 a 80 Nm3 por tonelada de residuos orgánicos.

Los impactos ambientales significativos para considerar en rellenos sanitarios son los que se relacionan con los gases de la descomposición anaerobia y el lixiviado generado (Ávila, 2022, pp. 11-12).

Figura 1

Relleno sanitario

Nota. Tomado de "Importancia de los rellenos sanitarios: tipos, características" por Boris, 2021.

2.1.7. Lixiviados

Son líquidos originados por la percolación de residuos sólidos en proceso de transformación, en un relleno sanitario o vertedero de basura; su tratamiento es complejo por su composición que es muy tóxica y variable. Los análisis en laboratorio muestran valores altos tanto de Carbón Orgánico Total (COT) como de la Demanda Biológica de Oxigeno (DBO5) ya que presentan grandes cantidades de material y compuestos orgánicos, sustancias inorgánicas, presencia de nitrógeno como N - NH3, además poseen grandes concentraciones de cloruros y gran presencia de sólidos disueltos. Así mismo, los lixiviados se producen por descomposición de los residuos sólidos urbanos por acción de los microorganismos, dicha descomposición produce una disociación de las macromoléculas orgánicas a formas más sencillas que logren ser arrastradas por el agua formando los lixiviados y diversos compuestos de nitrógeno y fósforo procedentes de la mineralización de la misma materia orgánica (Orihuela, 2023, pp. 23-24).

2.1.8. Composición de Lixiviados

Diferentes elementos y compuestos constituyen los lixiviados que son originados en los rellenos sanitarios, estos dependen de los diversos residuos sólidos que se disponen allí, la velocidad de degradación, fermentación y el volumen de estos. En este sentido, se tiene que se han logrado identificar más de 200 compuestos orgánicos presentes en los lixiviados de los cuales tenemos: hidrocarburos cíclicos, hidrocarburos aromáticos, ácidos, esteres, bencenos, alcoholes, éteres cíclicos, furanos, fenoles y lantanos, compuestos de nitrógeno, sílice, fósforo y sulfuro, trazas identificables. De los compuestos mencionados existen algunos muy tóxicos como el tolueno, etilbenceno, xilano, estireno, naftaleno, pireno. Existen otros compuestos que se encuentran en la estructura química de los lixiviados como: Materia orgánica (Demanda Química de Oxígeno, Carbono Orgánico Total, Ácidos Grasos Volátiles, ácidos húmicos y fúlvicos), Materia inorgánica (Ca, Mg, Na, k, NH4, Fe, Mn; Cl, SO4 -2 , NaHCO3; Metales pesados (Cd Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn), compuestos xenobióticos (hidrocarburos aromáticos, fenoles, alifáticos clorados, pesticidas); pero existen presencia en pocas cantidades de sulfuros, arsenatos, boratos, selenatos, Ba, Li, y Co (Orihuela, 2023, p. 23).

2.1.9. Clasificación de Lixiviados

Los lixiviados dependen de la concentración de los contaminantes y factores como: edad, pH, temperatura, tipo el material de cubierta y la fase de estabilización en la que se encuentra. Los lixiviados se clasifican en base a su edad:

Tabla 4

Clasificación de los Lixiviados en función a su edad

Clasificación de Lixiviados	Descripción
Lixiviados jóvenes	Son aquellos lixiviados que presentan elevadas concentraciones de nitrógeno amoniacal con metales pesados además de contener sales disueltas; así mismo tienen cantidades de ácidos grasos volátiles

	(AGV) con bajos valores de pH. Para estos lixiviados el Índice de Biodegradabilidad (DBO5/DQO), usualmente es 0,4 a 0,5 o más elevada además influye la presencia de ácidos grasos volátiles para valores bajos de pH como 4.
Lixiviado maduro.	Son aquellos cuya edad se encuentra de 5 - 10 años y poseen fundamentalmente la DQO con una carga orgánica media de 3000 mg/L y 15000 mg/L, un Índice de Biodegradabilidad 0,1 - 0,3, con pH cercanos a 7 y con ácido carboxílico (AGV) a concentración entre 20 % - 30 % en carga orgánica.
Lixiviado Viejo	Son los lixiviados que tienen una edad mayor a 10 años, estabilizados químicamente y pueden ser removidos por tratamiento fisicoquímico todo compuesto orgánico remanente

Nota. Tomado de (Orihuela, 2022, pp. 24-25)

2.1.10. Características Fisicoquímicas de Lixiviados

Las características de los lixiviados están representadas por los siguientes parámetros: DQO, DBO5, relación DBO5/DQO, pH, conductividad, ST, SDT, SST, nitrógeno total y metales pesados.

Tabla 5

Características Fisicoquímicas de los Lixiviados

Lixiviados	**Características fisicoquímicas**
DQO	medida aproximada del contenido total de materia orgánica presente en una muestra de agua, esta materia orgánica en condiciones naturales puede ser biodegradada lentamente y es oxidada a CO2 y H2O mediante un proceso lento que puede tardar dependiendo del tipo de materia orgánica presente y de las condiciones de biodegradación.
DBO	cantidad de oxígeno que se consume en mg O_2/L por procesos bioquímicos durante la degradación de ingredientes orgánicos, por tanto, mediante el análisis de DBO se determinan los compuestos orgánicos degradables
DBO5/DQO	relación que indica la edad del lixiviado, para un lixiviado joven es más alta que el de un lixiviado maduro derivado de una estabilización. Una baja relación

	DBO5/DQO indica que el lixiviado es estable y difícil de degradar biológicamente. Por lo tanto, las técnicas fisicoquímicas son recomendadas en el tratamiento de lixiviado estable
pH	medida de su acidez o de su alcalinidad. Un pH menor de 7.0 indica una tendencia a la acidez, mientras que un valor mayor de 7.0 muestra una alcalina.
CE	relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico.
ST	Los SDT incluyen las sales, los minerales, los metales y cualquier otro compuesto orgánico o inorgánico menor a 1,5 micras que se disuelve en el agua, los SDT se confunden con los sólidos totales (ST), que son el residuo que queda después de evaporar la misma muestra de agua, pero sin filtrarse. Los sólidos suspendidos totales (SST) son los que quedan en el filtro de fibra de vidrio con abertura de 1.5 micras. Por lo tanto, los ST son la suma de los SST y de los SDT
Nitrógeno Total	Suma de las concentraciones de nitrógeno, nitritos y nitratos. Representa el conjunto de las formas de nitrógeno reducidas orgánicas y amoniacales, y no la totalidad del nitrógeno (se refiere al resultado de determinar todo el nitrógeno presente en el agua, a excepción de los nitritos y nitratos); el nitrógeno puede existir también en forma de nitrógeno nitroso y nítrico independientemente del nitrógeno gaseoso (forma neutra); incluye principalmente el nitrógeno amoniacal y el orgánico, constituido éste último por proteínas, polipéptidos y aminoácidos

Nota. Tomado de "Características generales de tecnologías para el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios" (pp. 17-19) por Ávila, 2022, Universidad Estatal del Sur de Manabí.

2.1.11. Tratamiento de Lixiviados

Como resultado del traslado de los lixiviados del relleno sanitario (debido a las características del diseño) este termina siendo dañino para el ambiente por el impacto que puede causar a las aguas superficiales y subterráneas, así como al ambiente en general; por ello se crea la necesidad de tratar los lixiviados para que no sean una amenaza latente.

El tratamiento de los lixiviados consiste en realizar procedimientos que tienen como finalidad la remoción de contaminantes antes de su disposición en cuerpo receptor, es por lo

cual que se debe conocer las características, la concentración y nivel contaminante de los lixiviados, la composición y especificaciones de estos, así como también las características del lugar y la disponibilidad de recursos (físicos y humanos) todo ello es importante para realizar la selección, diseño, dimensionamiento y el aprovechamiento ideal del sistema de tratamiento de los lixiviados (Huaranga, 2024, pp. 31-32).

Así se tiene los siguientes tratamientos más utilizados para tratar lixiviados:

- La recirculación de lixiviados
- Evaporación de lixiviados
- Tratamiento biológico aeróbico
- Tratamiento biológico anaeróbico
- Precipitación química
- Oxidación química
- Adsorción con carbón activado
- Sistemas naturales como lagunas y humedales artificiales

Alave (2022), menciona que la acumulación de residuos sólidos de rellenos sanitarios ocasiona que el lixiviado formado presente una composición compleja en su estructura de formación, haciendo difícil el tratamiento de lixiviados ya que posee componentes con elevada toxicidad. Actualmente hay diversas alternativas para tratar los lixiviados y se puede neutralizar su capacidad contaminante, existen procesos fisicoquímicos y biológicos hasta métodos avanzados de ultrafiltración y remediación. Los lixiviados se depositan en sitios temporales y por estar en reposo permiten la sedimentación y acumulan sólidos denominados lodos lixiviados, estos densa, tienen olor fuerte y poseen gran presencia de humedad. Las eficiencias del tratamiento para reducir y eliminar los contaminantes presentes en los lixiviados están en función a su composición química, específicamente de elementos como el nitrógeno total, pH,

DQO, DBO, metales pesados, biodegradabilidad y nivel de estabilización de residuos sólidos (pp. 25-26).

2.1.12. Tratamiento de Lixiviados por Procesos de Oxidación Avanzada (POA)

Los tratamientos químicos de oxidación avanzada emplean oxidantes (químicos) para remover las concentraciones de DBO/DQO y para separar los componentes orgánicos e inorgánicos oxidables. Estos procesos pueden oxidar totalmente los materiales orgánicos hasta carbono, CO2 y agua. Existe una amplia gama de procesos de oxidación avanzada:

- Procesos de oxidación química usando peróxido de hidrógeno, ozono, peróxido y ozono combinados, hipoclorito, reactivo Fenton, etc.
- Elevación de la oxidación ultravioleta tanto como UV/ozono, UV/Peróxido de hidrógeno, UV/aire.
- Oxidación del aire húmedo y oxidación catalítica del aire húmedo (donde el aire es usado como oxidante).

Los POA son ideales para tratar aguas residuales que poseen recalcitrantes, tóxicos o materiales no-biodegradables, pues ofrecen ventajas sobre los procesos físicos y biológicos incluyendo:

- Procesos de operatividad
- Operaciones desatendidas
- La ausencia de residuos secundarios
- La habilidad para manejar fluctuaciones de flujo impuestas, y composiciones.

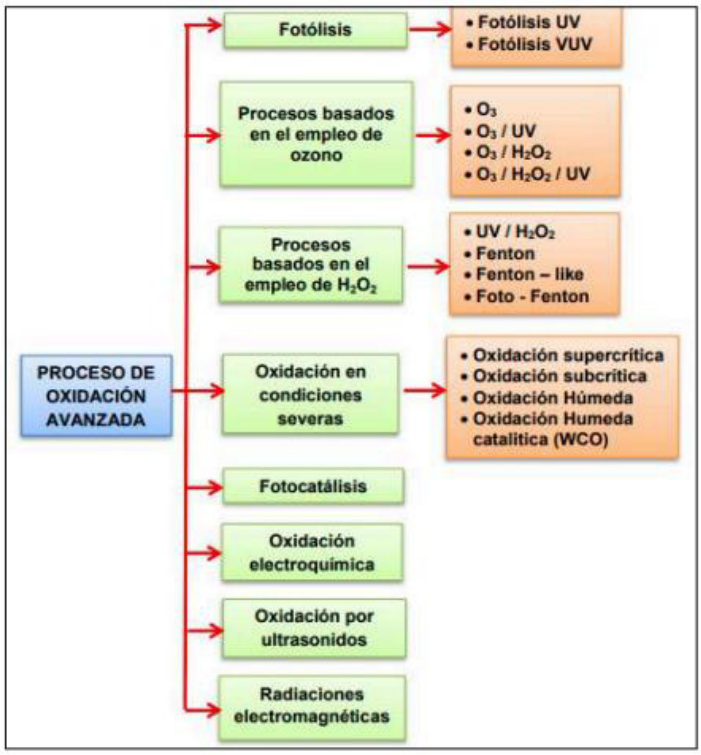
La variante más indicada para cada aplicación es elegida en base a las propiedades químicas del agua a tratar. Para la remoción de DBO y DQO con Peróxido de Hidrógeno, este puede emplearse solo o con catalizadores como hierro (Fe2+ o Fe3+), luz UV, ozono (O3) y álcali, para oxidar compuestos que contribuyen de DBO/DQO. El tipo de oxidación depende del tipo de DBO/DQO. (Aranibar, 2016, pp. 8-9)

Huaranga (2024), menciona que los principales efectos de los tratamientos con Oxidación Avanzada son:

- Oxidación de contaminantes orgánicos,
- Reducción de la toxicidad, -reducción de la DQO
- Reducción de la DBO5, y
- Eliminación de color y olor, Leszczynski (2018)

Figura 2

Clasificación de los procesos de oxidación avanzada



Nota. Tomado de "Optimización del proceso Fenton para el tratamiento de lixiviados en el Relleno Sanitario Itapalluni- Puno" (p.27) por Alave, 2023. Universidad Privada San Carlos.

2.1.13. Proceso FENTON

El proceso Fenton consiste en degradar el Peróxido de Hidrógeno (H2O2) con la ayuda de un catalizador como el Fe (II), para que este reaccione para lograr formar los radicales hidroxilos. A continuación, se ilustra dicha reacción:

$$Fe2+ + H2O2 \rightarrow Fe3+ + OH- + \bullet OH$$

La reacción Fenton puede llevarse a cabo sistemas homogéneos con hierro ferroso disuelto o en sistemas heterogéneos con hierro complejo (FeOOH), el subproducto, hierro férrico brinda una reacción con peróxido o superóxido radical (O2-) para dar origen al hierro ferroso como se ilustra a continuación:

$$Fe3+ + H2O2 \rightarrow Fe2+ + \bullet O2- + 2H+$$

$$\bullet O2 - + Fe3+ \rightarrow Fe2+ + O2$$

Las reacciones mostradas líneas antes, originan que el Fe pase de su estado de oxidación ferrosa y férrica hasta que el H2O2 se consuma totalmente, formando finamente el OH durante dicho proceso. La remoción de compuestos orgánicos se origina por reacciones de oxidación que inicia el radical hidroxilo.

La reacción Fenton resalta por la producción de radicales hidroxilos en medio ácido (3 - 3,5 de ph), a una temperatura y presión ambiente y empelando H2O2 catalizado por Fe+2.

$$Fe2+ + H2O2 \rightarrow Fe3+ + OH- + OH \cdot$$

El proceso Fenton requiere del pH en la solución, por ello el valor óptimo para este procedimiento es de 3 a 3,5. Dicho proceso garantiza la eficiencia del tratamiento de lixiviados; ya que se determina como un proceso óptimo para la degradación de compuestos alifáticos y aromáticos clorados, policloruro de vinilos (PCB), nitroaromáticos, clorobenceno, fenoles, fenoles clorados, octacloro-pdioxina y formaldehído.

Para añadir reactivos se debe ajustar el pH de la muestra a tratar a un nivel ácido o básico, por lo cual, el reactivo neutralizador debe ser incorporado de forma paulatina para evitar modificaciones en la temperatura interna y lograr una dosis óptima; después de esperar el tiempo de reacción determinado, y lograr la remoción óptima, la muestra se lleva a un tanque de neutralización para añadir una base y precipitar el hidróxido de hierro; luego este se coagula

en un tanque de floculación con un coagulante; una vez separadas estas dos fases se alcanza un efluente de lixiviado tratado (Huaranga, 2024, pp. 37-38).

2.1.14. Dosificación en el proceso Fenton

La dosis del H2O2 influye en la eficiencia del proceso, pues la concentración de Fe altera la cinética. Es importante resaltar que la eficiencia y la velocidad de la reacción incrementan con el volumen del reactivo. Sin embargo, la abundancia de Fe pueda producir una reducción de la eficiencia ya que incentiva la activación de reacciones secundarias no deseadas como la formación de Fe(OH)3 que puede precipitar; mientras que el exceso de H2O2 da lugar a la degradación de este por los radicales hidroxilos (Huaranga, 2024, pp. 37-38).

2.1.15. Factores que influyen en el Proceso Fenton

En la Tabla 6, se muestran los principales factores que influyen en el proceso Fenton, y las características que presentan cada uno de ellos, a fin de alcanzar los resultados esperados.

Tabla 6

Factores que influyen en el proceso Fenton

Control de pH	**Para el proceso Fenton se debe trabajar con pH de 9 – 10, con el fin de evitar la liberación de gases.**
Consumo de Reactivo	El consumo de H_2O_2 puede ser muy elevado para grandes caudales de aguas residuales; no obstante, esta situación se puede optimizar empleando un catalizador de Hierro para acelerar la reacción.
Producción de Lodos	La generación de lodos es uno de los principales inconvenientes, puesto que, este proceso hace referencia a la creación de un precipitado coloidal de color rojizo que debe ser separado de la mezcla líquida, ello debido a que este sedimento debe ser tratado como residuo sólido.

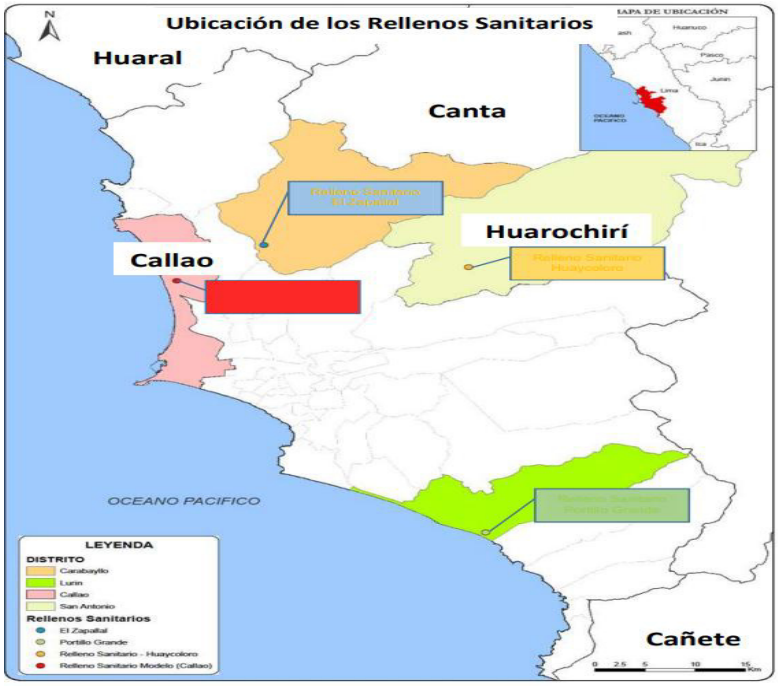
Nota. Tomado de “Tratamiento de lixiviados por procesos de oxidación avanzada del Relleno Sanitario “El Zapallal” por Huaranga, 2023, Universidad Nacional Federico Villarreal.

2.1.16. Relleno Sanitario Modelo del Callao

El Relleno Sanitario "Modelo del Callao", por su parte recepciona y dispone aproximadamente 1,534.46 t/día, lo que considera el 23% de los residuos municipales dispuestos en construcciones e infraestructuras autorizadas y generados en la provincia de Lima. Esta infraestructura es de propiedad de la Municipalidad Provincial del Callao y actualmente es administrada por la empresa PETRAMAS SAC. Se ubica al oeste de la ciudad de Lima, a la altura del km 19 de la Autopista Callao – Ventanilla, distrito Ventanilla, provincia constitucional del Callao, región Callao. Su funcionamiento se remonta a enero del 2004, periodo desde el cual funciona en mérito a una concesión otorgada por la Municipalidad Provincial del Callao a la empresa antes mencionada. Esta infraestructura cuenta con el Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA), aprobado mediante Resolución Directoral N° 1326/2005/DIGESA/SA de fecha 25 de agosto del 2005 y fue autorizado mediante Licencia de Funcionamiento N° 0093- 2004 del 30 de marzo del 2004 por la Municipalidad Provincial del Callao. En este relleno se viene desarrollando el segundo Proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio, para lo cual se construyó un sistema de 60 pozas para la captación del biogás, estimándose reducir el equivalente a 61,000 toneladas de CO_2 anuales en 07 años, generando un impacto positivo contribuyendo a la mitigación del calentamiento global y el mejoramiento de la calidad del aire. El proyecto se encuentra registrado ante Naciones Unidas como Project 561977. Asimismo, esta infraestructura tiene el potencial de generar 14,000 MWh anuales de energía eléctrica para lo cual se instalaría una Central Térmica de 2MW que sería operada dentro del marco de las Subastas de Energía con Recursos Energéticos Renovables (RER) realizadas por el Ministerio de Energía y Minas (Municipalidad Metropolitana de Lima [MML], 2014).

Figura 3

Ubicación de los Rellenos sanitarios en la provincia de Lima.



Nota. Tomado del Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia de Lima 2015-2025, Municipalidad Metropolitana de Lima.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Definición de términos

2.2.1.1. Residuos Sólidos. Son sustancias caracterizadas por estar compuestas de material orgánico con volumen salido de 10 a 40% y pueden categorizarse; en función a su origen en: desechos domésticos 8municipales), desechos industriales y deseos hospitalarios.

2.2.1.2. Relleno Sanitario. Técnica para la disposición final de los residuos sólidos municipales que poseen un área estructurada según los requisitos sanitarios y ambientales en base a la norma peruana.

2.2.1.3. Lixiviados. Líquidos originados al liberarse exceso de agua de los residuos sólidos y por la percolación de agua pluvial mediante los estratos de residuos sólidos que están en la fase de composición.

2.2.1.4. Contaminación. Agente o mezcla de sustancias en un lugar no deseable (aire, agua, suelo). Alteración perjudicial de condiciones naturales (salud, higiene, bienestar) en cuerpos receptores.

2.2.1.5. Eficiencia. Disposición de conseguir lo requerido con los recursos mínimos.

2.2.1.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno-DBO. Parámetro que indica la cantidad de contaminantes que se puede biodegradar; es decir, es la cantidad de oxígeno que requieren los organismos para consumir la materia orgánica presente en el agua.

2.2.1.7. Demanda Química de Oxígeno-DQO. Parámetro que manifiesta la cantidad de elementos contaminantes que se producen en el agua y que pueden pasar por el proceso de oxidación; mide todo contaminante, aunque puede ser sensible ante algunos compuestos orgánicos.

2.2.1.8. Reacción Fenton. Reacción realizada con H2O2 y sal de Fe (II).

2.2.1.9. Peróxido de Hidrogeno (H2O2). Compuesto químico con características de un líquido altamente polar, asociado con el hidrógeno, se encuentra como un líquido viscoso, y se lo reconoce como un poderoso oxidante.

2.2.1.10. **Tratamiento.** Métodos, técnicas o procesos que se empelan y diseñan para la remoción de sólidos o contaminantes de efluentes o emisiones.

2.3. Marco Legal Ambiental

A continuación, en la Tabla 7, se presenta el marco legal ambiental correspondiente (Contitución Política del Perú, 1993, 8 de mayo)e a la presente investigación.

Tabla 7

Marco Legal Ambiental

NORMA	FUNDAMENTO
Constitución Política del Perú. Título III, Capítulo II	Del Ambiente y los Recursos Naturales, indica que todo el que nació en territorio peruano presenta como derecho disfrutar de un ambiente puro, equilibrado y apropiado para desarrollarse

	personal y socialmente, así mismo se establece que el Estado debe promover la sostenibilidad de los recursos naturales renovables y no renovables.
Decreto Legislativo Nº635, Código Penal del año 1991; Título XIII	Sobre delitos ambientales, menciona las penas privativas de libertad a las personas que descarguen, comercialicen o viertan desechos industriales o domésticos en zonas no autorizados, con mayor sanción si el causante es funcionario o servidor público.
Ley General de Salud N.º 26842, del año 1997.	Establece la responsabilidad del Gobierno con el medio ambiente, así como las medidas dispuestas para la distribución de sustancias tóxicas y reducir daños posibles al medio ambiente, animales y seres humanos. También compromete a los organismos públicos y personas jurídicas a no descargar sustancias contaminantes en la superficie terrestre, acuática y en la atmósfera.
La Ley General del Ambiente, Ley Nº 28611, en su Artículo N°1	Indica que todo peruano posee el derecho de vivir en un buen ambiente sano y equilibrado para su desarrollo bajo las mejores condiciones posibles, así como también los deberes y responsabilidades que cada ciudadano. En su Artículo N.º 31 menciona el Estándar de Calidad Ambiental, como la medida que establece el nivel de concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente.
Artículo N°119 del Manejo de Residuos Sólidos (Ley 28611)	Indica que la gestión de los residuos sólidos de origen doméstico, comercial o que siendo de origen distinto presenten características similares a aquellos, son de responsabilidad de los gobiernos locales. Por ley se establece el régimen de gestión y manejo de los residuos sólidos municipales ((Ley Nº 28611, 2005, p. 62). Lo importante a considerar es que la LGA formula las competencias que cada organismo institucional, local o regional, debe realizar en materia ambiental para sus

	beneficiados. Para lograr una gestión integral de residuos sólidos se requiere tener en cuenta ejes políticos que ayuden a formar programas de educación y sensibilización para el cuidado de las zonas donde residen los ciudadanos en temas de segregación, reúso y reciclaje de basura (Ley Nº 28611, 2005).
Decreto Legislativo N°1278 que aprueba la ley de gestión integral de residuos sólidos	El presente Decreto Legislativo establece derechos, obligaciones, atribuciones y responsabilidades de la sociedad en su conjunto, con la finalidad de propender hacia la maximización constante de la eficiencia en el uso de los materiales y asegurar una gestión y manejo de los residuos sólidos económica, sanitaria y ambientalmente adecuada, con sujeción a las obligaciones, principios y lineamientos de este Decreto Legislativo
D.S N° 014-2017-MINAM- Reglamento de la Ley de Gestión de Residuos Sólidos	El presente dispositivo normativo tiene como objeto reglamentar el Decreto Legislativo N° 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, a fin de asegurar a maximización constante de la eficiencia en el uso de materiales, y regular la gestión y manejo de residuos sólidos, que comprende la minimización de la generación de residuos sólidos en la fuente, la valorización material y energética de los residuos sólidos, la adecuada disposición final de los mismos y la sostenibilidad de los servicios de limpieza pública.
Leyes federales II N° 263/2003, modificada por las Leyes Federales II N° 103/2005, Austria.	Ordenanza del Ministerio Federal de Agricultura, Silvicultura, Medio Ambiente y Gestión del Agua sobre la Limitación de las Emisiones de Lixiviados de los vertederos de residuos (AEV) Landfill Leachate.

Nota. Relación de marco legal normativa ambiental nacional e internacional

Tabla 8

Límites de lixiviados para vertidos en masas de agua superficial, Austria.

Statistical analysis of leachate characteristics of 32 MSW landfills and Austrian discharge limits into surface water bodies

Number of Parameter	Discharge limit
pH [-]	6.5 – 8.5
EC [µS/cm]	-
COD [mg O_2/l]	50
BOD_5 [mg O_2/l]	10
TOC [mg C_{org}/l]	20
NH_4-N [mg N/l]	10
Cl [mg/l]	Toxicity
AOX [mg Cl/l]	0.5
Fe [mg/l]	2.0
Zn [mg/l]	0.5
As [mg/l]	0.1
Cr_{tot} [mg/l]	0.5
Ni [mg/l]	0.5
Sulfide [mg S/l]	0.5

Nota. Tomado de: Limits according to the ordinances on waste water discharge from landfills (Leachate ordinance (MoE 2003) and waste water discharge ordinance (MoE 1996a)).

III. MÉTODO

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación por el enfoque planteado es de tipo aplicada, debido a que se pretende obtener nuevos conocimientos de manera que coadyuven en la resolución de problemas.

El diseño metodológico desde un enfoque cuantitativo es experimental, debido a su grado de manipulación de la variable independiente: "Tratamiento por oxidación Fenton y Cal", quien permitirá observar cambios en el comportamiento de la variable dependiente: "Remoción de DQO y Neutralización de lixiviados".

3.2. Ámbito espacial y temporal

3.2.1. Ámbito temporal

En cuanto al ámbito temporal la investigación inició en enero del 2025 con la definición del tema y búsqueda de información bibliográfica comprendida entre los 5 últimos para los antecedentes que se requieran. El desarrollo de los ensayos se ejecutó entre febrero y marzo del 2025, siendo verano (temporada seca) la estación del año correspondiente a la investigación.

3.2.2. Ámbito espacial

El cuanto al desarrollo de la presente investigación se planea trabajarlo en dos ámbitos espaciales, el primero corresponde al lugar donde se muestreará el lixiviado, correspondiente al relleno sanitario "Modelo del Callao" en el distrito de Ventanilla, el cual se encuentra ubicado en la margen derecha del rio Chillón, altura del kilómetro 19 de la Carretera Ventanilla y cuyas coordinadas son 268 903.94 E y 8 680 182.88 N. Por otro lado, el segundo lugar, corresponde al lugar donde se realizarán las pruebas de laboratorio, esto debido a que corresponden a un tipo de investigación experimental, siendo el ambiente de trabajo en este caso el laboratorio de Geografía y Medio Ambiente

de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de la UNFV, el cual presenta las coordenadas siguientes UTM: 277097 E y 8 667 468 N.

3.3. Variables

3.3.1. Variable Independiente

Tratamiento por oxidación Fenton y Cal.

3.3.2. Variable Dependiente

Remoción de DQO y Neutralización de lixiviados.

Tabla 9

Operacionalización de Variables de Investigación

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
Variable Independiente Tratamiento por Oxidación Fenton y Cal.	La Oxidación Avanzada son procesos fisicoquímicos capaces de modificar la estructura química de los contaminantes, este proceso consiste en generar especies fuertemente oxidantes como los radicales (OH.) que actúan como iniciadores de oxidación. (Mayorca, 2017). La neutralización consiste en agregar compuestos alcalinos o básicos según sea el caso como cal, alúmina, cloruros, etc., que permitan eliminar principalmente metales pesados y sólidos en suspensión. (Arbeláez y García, 2010)	La evaluación del tratamiento fenton será desarrollado mediante la aplicación de un oxidante como el peróxido de hidrógeno y un catalizador como el sulfato de hierro en concentraciones y dosis controladas en tiempos y velocidades diferentes o estándar. El volumen de trabajo será de 1 litro acondicionadas en las jarras del floculador programable.	PARÁMETROS DE CONTROL	Concentración (mg/l) Dosis (ml) Tiempo (min) Velocidad de Agitación (rpm) Volumen (L)
Variable Dependiente Remoción de DQO y neutralización de lixiviado	El tratamiento de los lixiviados consiste en realizar operaciones o procesos para lograr remover la mayoría de los contaminantes antes de su disposición en un cuerpo receptor. Para esto es indispensable saber el volumen y poder contaminante de los lixiviados, su composición y características. (Orozco, 2018)	Para la evaluación de la Remoción del proceso se tomará en cuenta la DQO, sin embargo, se caracterizará los principales parámetros fisicoquímicos como la DBO, DQO, pH, Conductividad Eléctrica, Turbiedad y Sólidos Totales Disueltos. La eficiencia será determinada en relación con la DQO inicial y la DQO final.	PARÁMETROS FISICOQUIMICOS RENDIMIENTO	DQO (mg/l) DBO (mg/l) pH SST (mg/l) CE (uS/cm) Turbiedad (NTU) Temperatura (°C) Eficiencia (%)

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

En la presente investigación se consideró trabajar con muestras de lixiviado, las cuales serán tomadas del relleno sanitario "Modelo del Callao", quien recibe un promedio de 3500 TN diarias de residuos sólidos, de las cuales se tomará un volumen determinado para la investigación, para luego ser trabajadas en el laboratorio LAGEMA de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo-UNFV.

3.4.2. Muestra

La muestra problema será tomada en campo y luego será trasladada al laboratorio, para el caso de nuestra investigación y por tratarse de un trabajo experimental, será de 60 litros de lixiviado aproximadamente para el primer tratamiento de oxidación y 60 litros para el segundo tratamiento de neutralización. El volumen mínimo para trabajar será de 1 litro por muestra, donde cada prueba incluirá dos repeticiones, haciendo un total de 120 litros.

3.5. Instrumentos

3.5.1. Técnicas

- Protocolo de monitoreo de efluentes.
- Manual de métodos estandarizados de análisis de aguas.
- Técnica Jar Test (Prueba de Jarras).

3.5.2. Instrumentos

- Fichas de recolección de datos de campo y laboratorio.
- Método APHA del analito.
- Método estándar ASTM D-2035.

3.6. Procedimientos

El procedimiento para el desarrollo de la presente investigación ha considerado cuatro etapas secuenciales: Monitoreo de campo y caracterización inicial, Ensayos experimentales

con Jar Test, Determinación de DQO y pH; y Análisis final de datos.

3.6.1. Monitoreo de campo y caracterización inicial

La toma de muestra del lixiviado será tomada en campo, por lo cual se realizará un viaje hacia el distrito de Ventanilla, ubicado en la provincia de Lima, para luego dirigirnos al relleno sanitario "Modelo del Callao", las muestras serán colectadas en bidones de 20 litros de capacidad cada uno (4). Las mediciones de los parámetros de campo del lixiviado serán tomadas en un recipiente de 2 litros de capacidad y se medirá la Temperatura, pH y Conductividad Eléctrica. El procedimiento de la toma de muestra se desarrollará tomando en cuenta el protocolo de monitoreo para efluentes del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, RM N° 273-2013-VIVIENDA.

Para la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO), se tomará una pequeña fracción u alícuota de muestra y será llevada con agua de dilución (caldo de cultivo) hasta un volumen de 1 litro, para luego llenar dos frascos de DBO con 300 ml cada uno y proceder a medir el Oxígeno Disuelto del día cero en uno de los frascos, posteriormente se dejará en la incubadora el otro frasco por un periodo de 5 días, donde culminado dicho tiempo se medirá el oxígeno disuelto final y se cuantificará la DBO de la muestra por diferencia de concentraciones y dividido entre el factor de dilución inicial.

La determinación y cuantificación de Turbiedad (Tb), se realizará mediante el método Nefelométrico, para lo cual previamente, con el uso de estándares se procederá a la calibración del Turbidímetro con concentraciones de 0.1, 20, 200, 400 y 2000 NTU; luego de ello se llenarán las celdas de medición con las muestras de lixiviado y se realizarán las lecturas correspondientes considerando previamente el blanco inicial o valor "Zero" del equipo, y finalmente las muestras correspondientes.

La determinación de Solidos Suspendidos Totales (SST), se llevará a cabo tomando una muestra de lixiviado con una alícuota de 100 ml y colocado sobre un filtro de fibra de vidrio (peso conocido) de una porosidad de 1.2 µm previamente tarado, y luego con un embudo de recepción y/o sistema de filtración apoyado con una bomba de vacío se procederá a filtrar toda la muestra, posteriormente el filtro con los sólidos en su superficie será llevado a un secado en la estufa a 105 °C por un tiempo aproximado de 30 minutos y enfriado en un desecador, siendo pesado finalmente en una balanza analítica, para cuantificar su valor, dividiendo el peso diferencial entre el volumen filtrado.

3.6.2. Ensayos Experimentales con Jar Test

En el laboratorio LAGEMA de la FIGAE-UNFV, se realizará el acondicionamiento de las muestras, el cual se iniciará con la preparación del oxidante a partir de una concentración al 50% de H2O2 (Solución Estándar) y un soluto de Sulfato Ferroso (FeSO4) que actuará como catalizador, todo en un ambiente controlado por el investigador. El procedimiento se inicia con la preparación del oxidante químico a partir del H2O2 al 50% y realizando diluciones hasta obtener concentraciones de 200, 400, 600, 800 y 1000 ppm y preparación del FeSO4 como catalizador con concentraciones de 125, 250, 500 y 1000 ppm.

Prosiguiendo con los reactivos se preparó cinco soluciones de Hidróxido de Calcio al 2.5, 5.0, 7.5, 10 y 15% para ser añadidas a las muestras y neutralizarlas una vez que se terminaran los tratamientos con el proceso fenton, trabajando para este último caso con la muestra que resultó ser la óptima.

Las pruebas para el tratamiento por oxidación y neutralización serán desarrolladas mediante una prueba de jarras o Jar Test, donde se acondicionarán 5 jarras para el primer caso (oxidación) y 4 jarras para el segundo caso (neutralización), conteniendo las muestras de

lixiviado con sus concentraciones iniciales de Demanda Química de Oxigeno (DQO) y niveles de pH finales en cada jarra con contenido de 1 litro de volumen.

Las pruebas se realizarán en el floculador programable, donde se va a considerar trabajar con una revolución lenta inicial de 50 rpm, por un tiempo programado de 5 minutos hasta alcanzar una homogenización completa del oxidante y posteriormente una rápida a 200 rpm por un tiempo de 30 minutos finales, y finalizar con un tiempo de sedimentación de 30 minutos en todos los casos, y proceder a la toma de muestra del sobrenadante.

Las pruebas en general pasaran por dos etapas, la primera de oxidación, donde cada jarra conteniendo las muestras tendrá una dosis diferente del reactivo FeSO4 (125, 250, 500 y 1000 ppm) y diferentes concentraciones de H2O2 con 200, 400, 600, 800 y 1000 mg/l.

Los ensayos serán llevados a cabo en cinco jarras de un litro de capacidad y se harán adicionalmente dos repeticiones para cada corrida experimental haciendo un subtotal de 15 litros por las tres corridas, y considerando los 4 ensayos a realizar obtendríamos un total de 60 litros.

Culminado el tratamiento con el oxidante fenton y conocido el pH de trabajo de todas las muestras, se procedió a continuar con la segunda etapa del proceso, el cual consistió en añadir a cada Jarra (4) ya tratada 5, 10, 15 y 20 ml de Ca(OH)2 pero con concentraciones diferentes (2.5, 5.0, 7.5, 10 y 15%) y apreciar con cual de todas se logra neutralizar y alcanzar el LMP establecido de acuerdo a la norma Australiana (6.5-8.5).

3.6.3. Determinación Final de DQO y pH

Una vez terminado el tiempo de sedimentación de cada ensayo proyectado en 30 minutos, se procederá a tomar un volumen de la muestra sobrenadante.

La determinación de la Demanda Química de Oxigeno (DQO), se realizará por el método colorimétrico, donde previamente las muestras serán llevadas a un digestor para luego ser medidas en el colorímetro.

La determinación del Potencial de Hidrógenos (pH), se realizará mediante el uso del equipo multiparamétrico, el cual debe ser previamente calibrado con las soluciones amortiguadoras o Buffer de 4, 7 y 10, posteriormente el sensor será lavado con agua destilada y se introducirá en cada uno de los envases para su medición y lecturas correspondientes.

3.6.4. Análisis Final

La etapa final del procedimiento consiste en evaluar los resultados finales obtenidos de los parámetros en estudio, los cuales serán comparados con los Límites Máximos Permisibles de la Norma Austriaca para descargas de efluentes. Se evaluará el tratamiento en general, se procederá a analizar cuáles fueron las dosis óptimas en cada uno de los ensayos en relación con cada una de las concentraciones iniciales y finales de los parámetros en estudio como DQO y pH. Así mismo, se evaluará las eficiencias obtenidas de acuerdo con las dosis del oxidante aplicado en cada una de las muestras, y con ello finalmente proceder a elaborar las tablas y graficas respectivas a fin de observar el comportamiento de cada dosis óptima registrada y sus respectivas eficiencias. Con los resultados finales obtenidos y analizados cuantitativamente se procederá a discutir de acuerdo con otras investigaciones, para proceder finalmente a obtener las conclusiones para nuestro trabajo de investigación y proceder a recomendar según sea el caso.

3.7. Análisis de datos

En el análisis de datos cuantitativos se tomará en cuenta los niveles de medición de las variables y se aplicará la estadística que permitirá describir las características principales de las variables dependientes e independientes, tomadas individualmente. Se llevará a cabo un

análisis y descripción cada una de las variables para lo cual se utilizará el programa Ms. Excel 2010; además se usará para presentar la estadística descriptiva tablas y gráficas de datos y para presentar la distribución de los datos se realizará empleando graficas lineales, todo esto con el propósito de conocer cuáles serán las dosis más optimas y determinar las eficiencias en la oxidación del tratamiento del lixiviado.

IV. RESULTADOS

A continuación, en el presente capitulo mostramos los resultados obtenidos con relación a los objetivos planteados en la presente investigación. En tal sentido los resultados muestran las características fisicoquímicas del lixiviado, las concentraciones residuales de DQO y pH con FENTON-Hidróxido de Calcio; y finalmente las eficiencias de los tratamientos aplicados. El tratamiento del lixiviado por FENTON será mediante aplicación del Peróxido de Hidrogeno (H2O2) con un catalizador a partir de Sulfato Ferroso (FeSO4), los mismos que permitirán mostrar los resultados de las dosis óptimas y eficiencias en cada uno de los tratamientos aplicados.

4.1. Caracterización Fisicoquímica del Lixiviado

En la Tabla 10, tenemos los resultados de las características fisicoquímicas del lixiviado en estudio:

Tabla 10

Características fisicoquímicas del Lixiviado

MUESTRA	T (ºC)	pH	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/l)	CE (mS/cm)	Tb (NTU)
M-1	22.7	8.46	1062	1997.5	286	8.86	1870.3
LMP	-	6.5-8.5	10	50	-	-	-

Nota. Cada uno de los parámetros corresponden a T: Temperatura, pH: Potencial de Hidrógenos, DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno, DQO: Demanda Química de Oxígeno, SST: Solidos Suspendidos Totales, CE: Conductividad Eléctrica, Tb: Turbiedad. Los LMP corresponden a la normativa Austriaca Limits according to the ordinances on waste water discharge from landfills (Leachate ordinance (MoE 2003) and waste water discharge ordinance (MoE 1996a).

Los valores de DBO5 y DQO exceden los Límites Máximos Permisibles con concentraciones de 1062 y 1997.5 mg/l respectivamente, el nivel de pH se encuentra dentro de lo permitido con 8.46, mientras que los niveles de Temperatura, SST, Conductividad Eléctrica y Turbiedad no cuentan con LMP de comparación, asimismo, se clasificó la edad del lixiviado con los valores de DBO5 y DQO obtenidos en esta caracterización, lo cual nos permite determinar el índice de biodegradabilidad de (DBO5/DQO), obteniendo un resultado de 0.53, lo cual Orihuela (2022, pp. 24-25) clasifica como lixiviado joven, asimismo, se debe considerar que dicho lixiviado proveniente de relleno sanitario tiene una edad en tiempo menor a los cinco años.

4.2. Concentraciones Residuales de DQO y pH con FENTON e Hidróxido de Calcio

A continuación, se muestran los resultados de las concentraciones residuales de DQO y pH después de la aplicación del proceso FENTON y neutralización final con Hidróxido de Calcio.

4.2.1. Concentraciones Residuales de DQO con FENTON

En la Tabla 11, se muestran los resultados residuales de la DQO terminado el tratamiento con Peróxido de Hidrógeno (200, 400, 600, 800 y 100 mg/l) y Sulfato Ferroso (125, 250, 500 y 1000 mg/l), trabajados en medio ácido a un pH de 2.68, con 3 repeticiones y un promedio final obtenido por las tres repeticiones.

Tabla 11

Resultados de Demanda Química de Oxigeno (DQO)

Tratamientos	**Reactivo Fenton (mg/l)**		**pH de trabajo=2.68**			
			Repetición	Repetición	Repetición	Promedio
	H_2O_2	Fe^{2+}	1	2	3	s
1	200	125	423.2	398.9	412.5	411.5
2		250	305.4	295.1	312.1	304.2

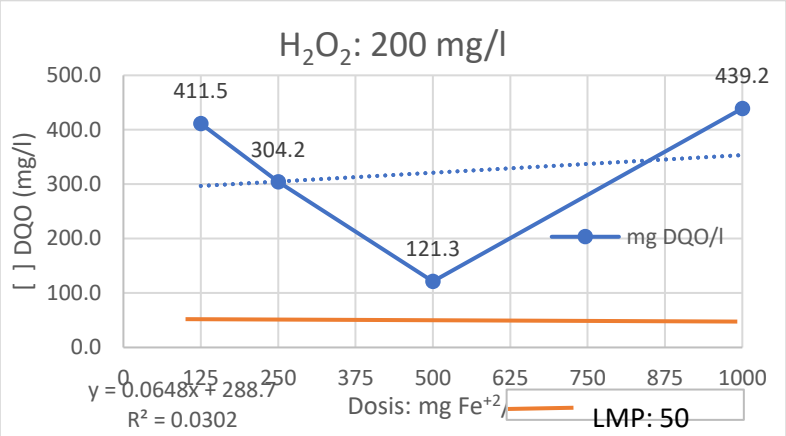
3		500	111.9	127.5	124.6	121.3
4		1000	442.7	435.4	439.4	439.2
5		125	334.8	347.5	340.2	340.8
6		250	228.5	241.6	239.8	236.6
7	400	500	127.5	141.3	139.8	136.2
8		1000	338.1	343.3	344.8	342.1
9		125	243.7	236.4	251.1	243.7
10		250	150.5	182.3	171.3	168.0
11	600	500	144.4	168.8	153.4	155.5
12		1000	374.2	368.4	355.6	366.1
13		125	153.4	170.4	161.6	161.8
14		250	150.4	168.6	172.4	163.8
15	800	500	81.2	108.1	98.9	96.1
16		1000	288.6	291.5	297.1	292.4
17		125	241.4	235.6	228.3	235.1
18		250	163.4	185	162	170.1
19	1000	500	130.1	141.6	126.5	132.7
20		1000	169.4	179.4	184.6	177.8

Primer Tratamiento con 200 mg/l de H2O2

Del primer tratamiento, se muestran los resultados, quien fue trabajado con un pH operativo en condiciones acidas de 2.68, concentración de H2O2 de 200 mg/l y FeSO4 con dosis de 200, 400, 600, 800 y 1000 mg/l. Los valores de los parámetros considerados para la operación fueron a una temperatura de 21.7° C, 1 l de muestra con tiempos de contacto y sedimentación de 30 minutos cada uno.

Figura 4

Concentración de 200 mg/l de H2O2 y Comportamiento de DQO



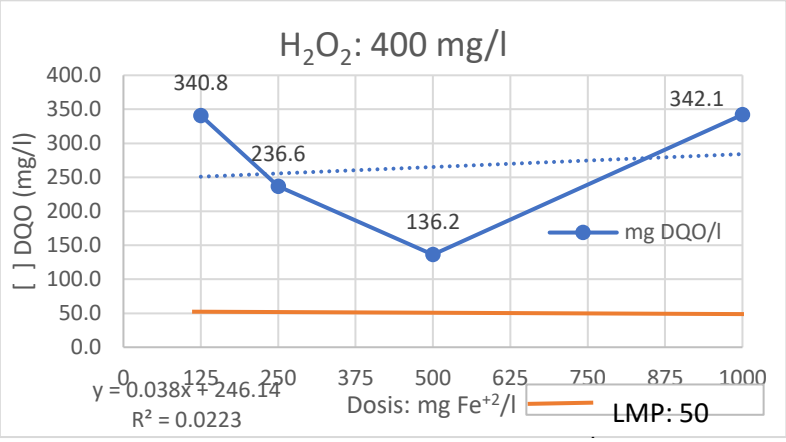
En la figura 3, se aprecia que de acuerdo con la primera concentración utilizada de H2O2, con la dosis de 500 mg/l de FeSO4 la DQO desciende desde un valor inicial de 1997.5 mg/l hasta 121.3 mg/l, sin embargo, se observa también que luego se incrementa hasta 439.2 mg/l con la dosis de 1000 mg/l de FeSO4. Asimismo, se observa una correlación muy baja (R2≤0.1), el cual puede deberse al último valor registrado. Finalmente, se puede indicar también que la concentración más baja obtenida no logra alcanzar el Límite Máximo Permisible.

Segundo Tratamiento con 400 mg/l de H2O2

Del segundo tratamiento, se muestran los resultados, quien fue trabajado con un pH operativo en condiciones acidas de 2.68, concentración de H2O2 de 400 mg/l y FeSO4 con dosis de 200, 400, 600, 800 y 1000 mg/l. Los valores de los parámetros considerados para la operación fueron a una temperatura de 21.7° C, 1 l de muestra con tiempos de contacto y sedimentación de 30 minutos cada uno.

Figura 5

Concentración de 400 mg/l de H2O2 y comportamiento de DQO



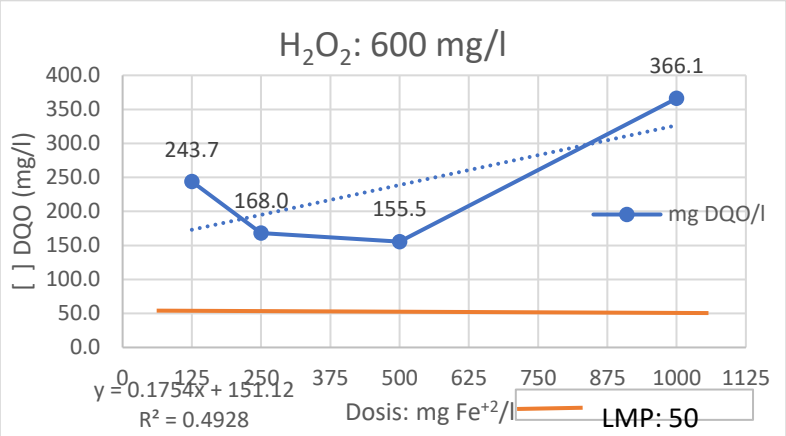
En la Figura 4, se aprecia que de acuerdo con la segunda concentración utilizada de H2O2, con la dosis de 500 mg/l de FeSO4 la DQO desciende desde un valor inicial de 1997.5 mg/l hasta 136.2 mg/l, sin embargo, se observa también que luego se incrementa hasta 342.1 mg/l con la dosis de 1000 mg/l de FeSO4. Asimismo, se observa una correlación muy baja (R2≤0.1), el cual puede deberse al último valor registrado. Finalmente, se puede indicar también que la concentración más baja obtenida no logra alcanzar el Límite Máximo Permisible.

Tercer Tratamiento con 600 mg/l de H2O2

Del tercer tratamiento, se muestran los resultados, quien fue trabajado con un pH operativo en condiciones acidas de 2.68, concentración de H2O2 de 600 mg/l y FeSO4 con dosis de 200, 400, 600, 800 y 1000 mg/l. Los valores de los parámetros considerados para la operación fueron a una temperatura de 21.7° C, 1 l de muestra con tiempos de contacto y sedimentación de 30 minutos cada uno.

Figura 6

Concentración de 600 mg/l de H2O2 y comportamiento de DQO



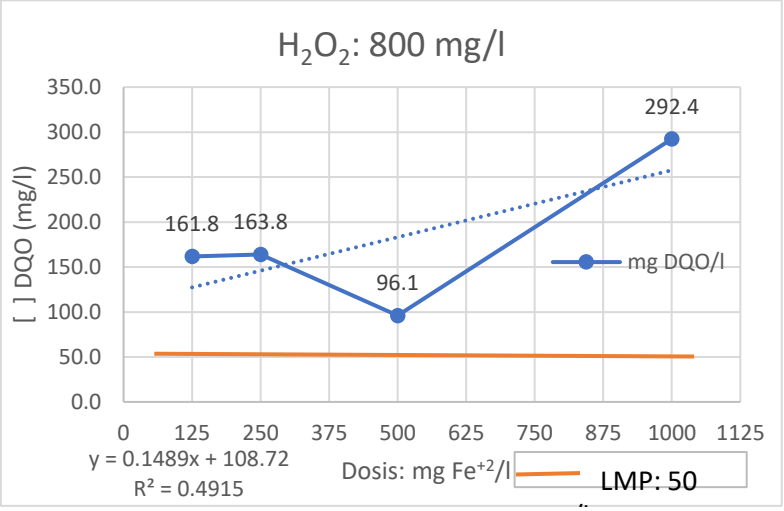
En la Figura 5, se aprecia que de acuerdo con la tercera concentración utilizada de H2O2, con la dosis de 500 mg/l de FeSO4 la DQO desciende desde un valor inicial de 1997.5 mg/l hasta 155.5 mg/l, sin embargo, se observa también que luego se incrementa hasta 366.1 mg/l con la dosis de 1000 mg/l de FeSO4. Asimismo, se observa una correlación baja (R2≤0.5), el cual puede deberse al último valor registrado. Finalmente, se puede indicar también que la concentración más baja obtenida no logra alcanzar el Límite Máximo Permisible.

Cuarto Tratamiento con 800 mg/l de H2O2

Del cuarto tratamiento, se muestran los resultados, quien fue trabajado con un pH operativo en condiciones acidas de 2.68, concentración de H2O2 de 800 mg/l y FeSO4 con dosis de 200, 400, 600, 800 y 1000 mg/l. Los valores de los parámetros considerados para la operación fueron a una temperatura de 21.7° C, 1 l de muestra con tiempos de contacto y sedimentación de 30 minutos cada uno.

Figura 7

Concentración de 800 mg/l de H2O2 y comportamiento de DQO



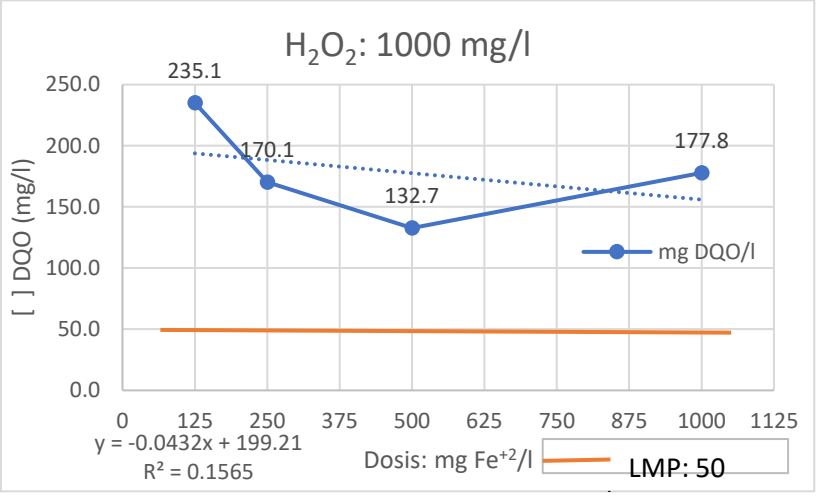
En la Figura 6, se aprecia que de acuerdo a la cuarta concentración utilizada de H2O2, con la dosis de 500 mg/l de FeSO4 la DQO desciende desde un valor inicial de 1997.5 mg/l hasta 96.1 mg/l, sin embargo, se observa también que luego se incrementa hasta 292.4 mg/l con la dosis de 1000 mg/l de FeSO4. Asimismo, se observa una correlación baja (R2≤0.5), el cual puede deberse al último valor registrado. Finalmente, se puede indicar también que la concentración más baja obtenida no logra alcanzar el Límite Máximo Permisible.

Quinto Tratamiento con 1000 mg/l de H2O2

Del quinto tratamiento, se muestran los resultados, quien fue trabajado con un pH operativo en condiciones acidas de 2.68, concentración de H2O2 de 1000 mg/l y FeSO4 con dosis de 200, 400, 600, 800 y 1000 mg/l. Los valores de los parámetros considerados para la operación fueron a una temperatura de 21.7° C, 1 l de muestra con tiempos de contacto y sedimentación de 30 minutos cada uno.

Figura 8

Concentración de 1000 mg/l de H2O2 y comportamiento de DQO



En la Figura 7, se aprecia que de acuerdo a la quinta concentración utilizada de H2O2, con la dosis de 500 mg/l de FeSO4 la DQO desciende desde un valor inicial de 1997.5 mg/l hasta 132.7 mg/l, sin embargo, se observa también que luego se incrementa hasta 177.8 mg/l con la dosis de 1000 mg/l de FeSO4. Asimismo, se observa una correlación muy baja (R2≤0.2), el cual puede deberse al último valor registrado. Finalmente, se puede indicar también que la concentración más baja obtenida no logra alcanzar el Límite Máximo Permisible.

4.2.2. Concentraciones Residuales de pH por neutralización con Hidróxido de Calcio

En la Tabla 12, se muestran los resultados obtenidos en el tratamiento de neutralización con Hidróxido de Calcio, el cual fue iniciado con un pH de 2.55, y luego de haber conocido la dosis óptima del oxidante. Los tratamientos fueron trabajados con concentraciones de 2.5, 5.0, 7.5, 10 y 15%, de los cuales se utilizaron las dosis de 5, 10,15 y 20 ml para cada una de ellas.

Tabla 12

Resultado de los niveles de pH en el tratamiento con Hidróxido de Calcio

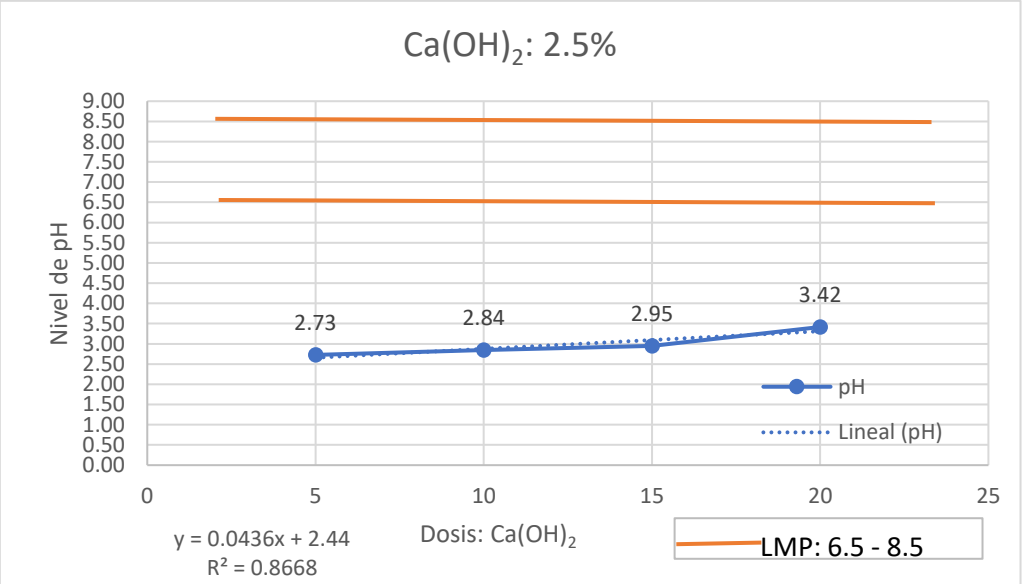
TRATAMIENTOS	Ca(OH)2		pH inicial=2.55			
	%	ml	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedios
1	2.5	5	2.72	2.77	2.69	2.73
2		10	2.83	2.89	2.81	2.84
3		15	2.95	2.88	3.03	2.95
4		20	3.26	3.35	3.64	3.42
5	5	5	3.75	3.71	3.77	3.74
6		10	3.88	3.82	3.91	3.87
7		15	3.95	3.91	3.98	3.95
8		20	4.13	4.15	4.21	4.16
9	7.5	5	4.57	4.62	4.68	4.62
10		10	4.64	4.69	4.61	4.65
11		15	4.77	4.82	4.86	4.82
12		20	4.86	4.82	4.91	4.86
13	10	5	4.93	4.98	5.12	5.01
14		10	5.35	5.39	5.42	5.39
15		15	5.66	5.72	5.78	5.72
16		20	6.05	6.15	6.18	6.13
17	15	5	6.56	6.68	6.72	6.65
18		10	7.15	7.27	7.38	7.27
19		15	7.65	7.78	7.85	7.76
20		20	8.13	8.36	8.25	8.25

Primer Tratamiento al 2.5% de Ca(OH)2

Del primer tratamiento, se muestran los resultados, quien fue trabajado con un pH inicial de 2.55, concentración de Ca(OH)2 al 2.5% y con dosis del mismo de 5, 10, 15 y 20 ml. Los valores de los parámetros considerados para la operación fueron a una temperatura de 21.4° C, 1 l de muestra con tiempos de contacto y sedimentación de 30 minutos cada uno.

Figura 9

Niveles de pH obtenidos al 2.5% con $Ca(OH)_2$



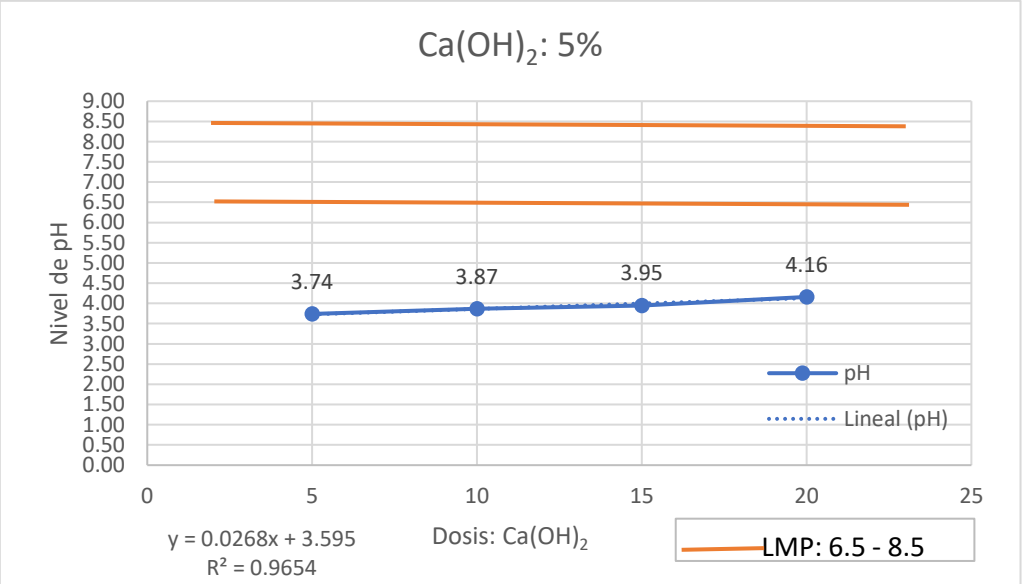
En la Figura 8, podemos apreciar con la concentración utilizada de $Ca(OH)_2$, el nivel de pH se incrementa ligeramente desde un valor inicial de 2.55 hasta un valor máximo de 3.42 con la dosis de 20 ml de $Ca(OH)_2$, las otras dosis de 5, 10 y 15 ml no logran un incremento significativo del pH, Asimismo, se puede apreciar que el coeficiente de correlación es media alta ($0.8 \leq R^2 \leq 0.9$), el mismo que se debe al comportamiento lineal adoptado de manera progresiva. De igual manera, se aprecia que todas las dosis de 5, 10, 15 y 20 ml de $Ca(OH)_2$ no lograron alcanzar el LMP establecido entre 6.5 y 8.5.

Segundo Tratamiento al 5% de $Ca(OH)_2$

Del segundo tratamiento, se muestran los resultados, quien fue trabajado con un pH inicial de 2.55, concentración de $Ca(OH)_2$ al 5% y con dosis del mismo de 5, 10, 15 y 20 ml. Los valores de los parámetros considerados para la operación fueron a una temperatura de 21.4° C, 1 l de muestra con tiempos de contacto y sedimentación de 30 minutos cada uno.

Figura 10

Niveles de pH obtenidos al 5% con $Ca(OH)_2$



En la Figura 9, podemos apreciar con la concentración utilizada de Ca(OH)2, el nivel de pH se incrementa ligeramente desde un valor inicial de 2.55 hasta un valor máximo de 4.16 con la dosis de 20 ml de Ca(OH)2, las otras dosis de 5, 10 y 15 ml no logran un incremento significativo de pH, Asimismo, se puede apreciar que el coeficiente de correlación es alto (0.9≤R2), el mismo que se debe al comportamiento lineal adoptado de manera progresiva. De igual manera, se aprecia que todas las dosis de 5, 10, 15 y 20 ml de Ca(OH)2 no lograron alcanzar el LMP establecido entre 6.5 y 8.5.

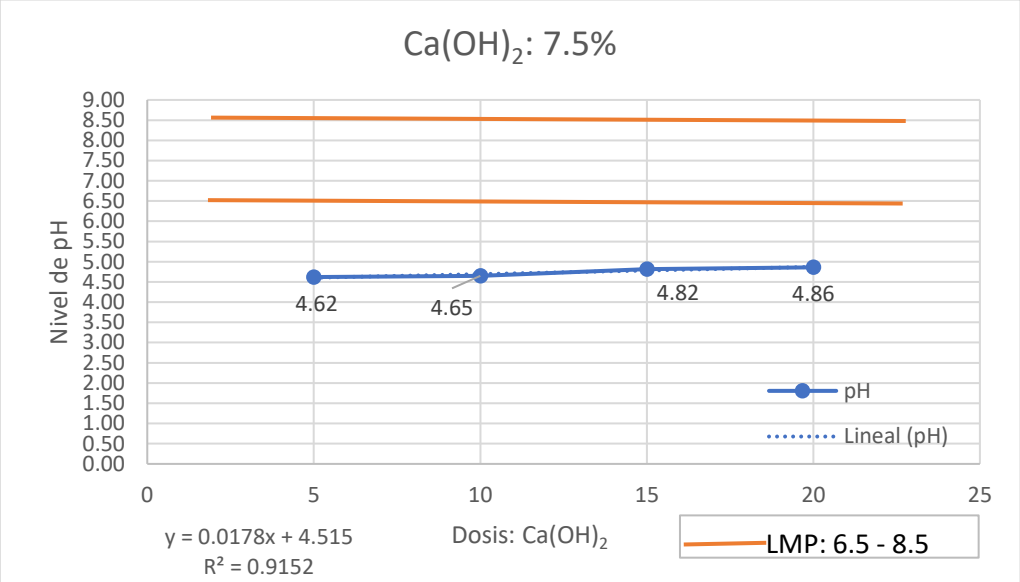
Tercer Tratamiento al 7.5% de Ca(OH)2

Del tercer tratamiento, se muestran los resultados, quien fue trabajado con un pH inicial de 2.55, concentración de $Ca(OH)_2$ al 7.5% y con dosis del mismo de 5, 10, 15 y 20 ml. Los

valores de los parámetros considerados para la operación fueron a una temperatura de 21.4° C, 1 l de muestra con tiempos de contacto y sedimentación de 30 minutos cada uno

Figura 11

Niveles de pH obtenidos al 7.5% con $Ca(OH)_2$



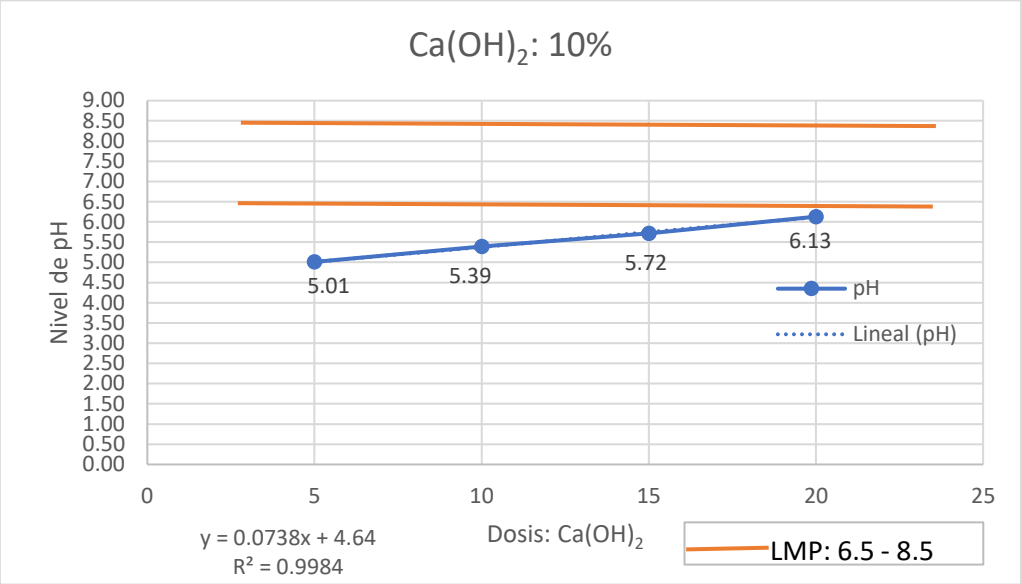
En la Figura 10, podemos apreciar con la concentración utilizada de $Ca(OH)_2$, el nivel de pH se incrementa ligeramente desde un valor inicial de 2.55 hasta un valor máximo de 4.86 con la dosis de 20 ml de $Ca(OH)_2$, las otras dosis de 5, 10 y 15 ml no logran un incremento significativo de pH, Asimismo, se puede apreciar que el coeficiente de correlación es alto ($0.9 \leq R^2$), el mismo que se debe al comportamiento lineal adoptado de manera progresiva. De igual manera, se aprecia que todas las dosis de 5, 10, 15 y 20 ml de $Ca(OH)_2$ no lograron alcanzar el LMP establecido entre 6.5 y 8.5.

Cuarto Tratamiento al 10% de Ca(OH)2

Del cuarto tratamiento, se muestran los resultados, quien fue trabajado con un pH inicial de 2.55, concentración de Ca(OH)2 al 10% y con dosis del mismo de 5, 10, 15 y 20 ml. Los valores de los parámetros considerados para la operación fueron a una temperatura de 21.4° C, 1 l de muestra con tiempos de contacto y sedimentación de 30 minutos cada uno.

Figura 12

Niveles de pH obtenidos al 10% con Ca(OH)2



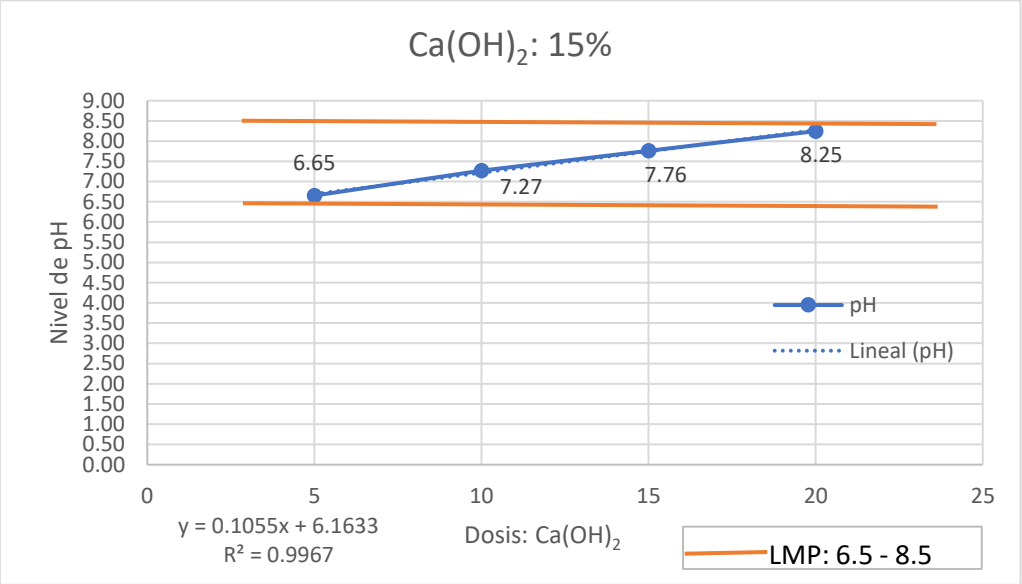
En la Figura 11, podemos apreciar con la concentración utilizada de Ca(OH)2, el nivel de pH se incrementa significativamente desde un valor inicial de 2.55 hasta un valor máximo de 6.13 con la dosis de 20 ml de Ca(OH)2, las otras dosis de 5, 10 y 15 ml no logran un incremento significativo de pH. Asimismo, se puede apreciar que el coeficiente de correlación es alto (0.9≤R2), el mismo que se debe al comportamiento lineal adoptado de manera progresiva. De igual manera, se aprecia que todas las dosis de 5, 10, 15 y 20 ml de Ca(OH)2 no lograron alcanzar el LMP establecido entre 6.5 y 8.5.

Cuarto Tratamiento al 15% de Ca(OH)2

Del cuarto tratamiento, se muestran los resultados, quien fue trabajado con un pH inicial de 2.55, concentración de Ca(OH)2 al 15% y con dosis del mismo de 5, 10, 15 y 20 ml. Los valores de los parámetros considerados para la operación fueron a una temperatura de 21.4° C, 1 l de muestra con tiempos de contacto y sedimentación de 30 minutos cada uno.

Figura 13

Niveles de pH obtenidos al 15% con Ca (OH)2



En la Figura 12, podemos apreciar con la concentración utilizada de Ca(OH)2, el nivel de pH se incrementa significativamente desde un valor inicial de 2.55 hasta un valor máximo de 8.25 con la dosis de 20 ml de Ca(OH)2, las otras dosis de 5, 10 y 15 ml alcanzan un incremento significativo de pH. Asimismo, se puede apreciar que el coeficiente de correlación es alto (0.9≤R2), el mismo que se debe al comportamiento lineal adoptado de manera progresiva. De igual manera, se aprecia que todas las dosis de 5, 10, 15 y 20 ml de Ca(OH)2 lograron alcanzar el LMP establecido entre 6.5 y 8.5.

4.3. Determinación de la eficiencia en el tratamiento del lixiviado

De acuerdo con la formulación del tercer objetivo propuesto se determinaron las eficiencias con las dosis utilizadas del oxidante (H2O2) y el catalizador de Sulfato Ferroso (FeSO4); y con relación a los cinco tratamientos desarrollados.

En las Tablas 12, 13, 14, 15 y 16 se muestran los resultados obtenidos de los 5 tratamientos del lixiviado para la remoción de la DQO, los cuales presentaron concentraciones iniciales de 1997.5 mg/l y con un pH de 2.68, en condiciones acidas.

Primer tratamiento

Tabla 13

Eficiencias del primer tratamiento para DQO con 200 mg/l de H_2O_2

Variables	Resultados			
[ ] Inicial de DQO (mg/l)	**1997.5**	**1997.5**	**1997.5**	**1997.5**
Dosis de Fe^{2+} (mg/l)	125	250	500	1000
[ ] Final de DQO (mg/l)	411.5	304.2	121.3	439.2
Eficiencia (%)	**79.4**	**84.8**	**93.9**	**78.0**

De la Tabla 12, se puede apreciar que las concentraciones de DQO varían con respecto a las dosis de Sulfato Ferroso, en ese sentido se puede apreciar que la máxima eficiencia obtenida es del 93.9%, al cual se llegó con la dosis de 500 mg/l.

Segundo Tratamiento

Tabla 14

Eficiencias del segundo tratamiento para DQO con 400 mg/l de H_2O_2

Variables	Resultados			
[ ] Inicial de DQO (mg/l)	**1997.5**	**1997.5**	**1997.5**	**1997.5**
Dosis de Fe^{2+} (mg/l)	125	250	500	1000
[ ] Final de DQO (mg/l)	340.8	236.6	136.2	342.1
Eficiencia (%)	**82.9**	**88.2**	**93.2**	**82.9**

De la Tabla 13, se puede apreciar que las concentraciones de DQO varían con respecto a las dosis de Sulfato Ferroso, en ese sentido se puede apreciar que la máxima eficiencia obtenida es del 93.2%, al cual se llegó con la dosis de 500 mg/l.

Tercer Tratamiento

Tabla 15

Eficiencias del tercer tratamiento para DQO con 600 mg/l de H_2O_2

Variables	**Resultados**			
[ ] Inicial de DQO (mg/l)	**1997.5**	**1997.5**	**1997.5**	**1997.5**
Dosis de Fe^{2+} (mg/l)	125	250	500	1000
[ ] Final de DQO (mg/l)	243.7	168.0	155.5	366.1
Eficiencia (%)	**87.8**	**91.6**	**92.2**	**81.7**

De la Tabla 14, se puede apreciar que las concentraciones de DQO varían con respecto a las dosis de Sulfato Ferroso, en ese sentido se puede apreciar que la máxima eficiencia obtenida es del 92.2%, al cual se llegó con la dosis de 500 mg/l.

Cuarto Tratamiento

Tabla 16

Eficiencias del cuarto tratamiento para DQO con 800 mg/l de H_2O_2

Variables	**Resultados**			
[ ] Inicial de DQO (mg/l)	**1997.5**	**1997.5**	**1997.5**	**1997.5**
Dosis de Fe^{2+} (mg/l)	125	250	500	1000
[ ] Final de DQO (mg/l)	161.8	163.8	96.1	292.4
Eficiencia (%)	**91.9**	**91.8**	**95.2**	**85.4**

De la Tabla 15, se puede apreciar que las concentraciones de DQO varían con respecto a las dosis de Sulfato Ferroso, en ese sentido se puede apreciar que la máxima eficiencia obtenida es del 95.2%, al cual se llegó con la dosis de 500 mg/l.

Quinto Tratamiento

Tabla 17

Eficiencias del quinto tratamiento para DQO con 1000 mg/l de H_2O_2

Variables	**Resultados**			
[ ] Inicial de DQO (mg/l)	**1997.5**	**1997.5**	**1997.5**	**1997.5**
Dosis de Fe^{2+} (mg/l)	125	250	500	1000
[ ] Final de DQO (mg/l)	235.1	170.1	132.7	177.8
Eficiencia (%)	**88.2**	**91.5**	**93.4**	**91.1**

De la Tabla 16, se puede apreciar que las concentraciones de DQO varían con respecto a las dosis de Sulfato Ferroso, en ese sentido se puede apreciar que la máxima eficiencia obtenida es del 93.4%, al cual se llegó con la dosis de 500 mg/l.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Suaibou et al. (2023), en su artículo plantea determinar la eficacia de la eliminación de DQO de los lixiviados de vertederos parcialmente tratados utilizando persulfato y peróxido de hidrógeno como agentes oxidantes en la eliminación de DQO de los lixiviados de vertederos. El efecto de los parámetros operativos: pH, dosis y tiempo de reacción, se evaluaron mediante experimentos de laboratorio en lotes utilizando matraces de 250 ml. En condiciones óptimas, se obtuvo como resultado que la eliminación de DQO fue del 80.6, 80.4 y 83.5 % cuando se utilizó el tratamiento con persulfato, peróxido de hidrógeno y persulfato/peróxido de hidrógeno combinados, respectivamente. Se concluye que se prefiere el uso de peróxido de hidrógeno solo, ya que es capaz de cumplir con el límite de descarga en una dosis más baja en comparación con el tratamiento combinado de persulfato/peróxido de hidrógeno, lo que hace que el proceso sea económico. Con relación a nuestro trabajo de investigación en la remoción de la DQO para lixiviados de vertedero, se trabajó con Peróxido de Hidrógeno como oxidante y Sulfato Ferroso como catalizador bajo un sistema controlado de Jar Test, se utilizaron diferentes dosis de ambos reactivos, a fin de encontrar la mejor combinación que asegurara la máxima eficiencia en el tratamiento del lixiviado, en ese sentido, los resultados finales arrojaron que la concentración de 800 mg/l de Peróxido de Hidrógeno y 500 mg/l de Sulfato Ferroso alcanzaron remover el 95.2% de la DQO. A diferencia del estudio desarrollado por Suaibou et al (2023), no se trabajó con otro oxidante en particular como medio de comparación, ni tampoco se hizo combinaciones de oxidantes, sin embargo, las máximas eficiencias alcanzadas en ambos estudios variaron de 80.4 a 95.2%, haciendo una diferencia de 14.8%.

El Mrabet et al. (2022), en su artículo científico planteó caracterizar fisicoquímicamente el lixiviado del vertedero de la ciudad de Fez (Marruecos) y evaluar la viabilidad de aplicar un proceso Fenton. Dentro de la metodología se utilizó un diseño de experimentos basado en Box–Behnken combinado con un método de superficie de respuesta para evaluar el efecto de tres

variables operativas (pH, dosis de Fe 2+ y H2O2) en dos respuestas de objetivo: remoción de DQO y eliminación de color. Los resultados del análisis de varianzas demuestran que ambas respuestas se ven afectadas significativamente por la dosis de Fe 2+ y el pH. Los análisis estadísticos y gráficos muestran que se obtienen eficiencias máximas del 85% y 96% en términos de DQO y eliminación de color, respectivamente, cuando las condiciones operativas se establecen en pH = 2,8, [Fe 2+] = 1621 mg/ L y [H2O2] = 2500 mg/L. De acuerdo a nuestro trabajo de investigación se evaluó únicamente la remoción de la DQO mas no el color, en ese sentido, se tomó en consideración un pH de trabajo en medio ácido de 2.68, concentración de 800 mg/l de Peróxido de Hidrógeno y 500 mg/l de Sulfato Ferroso arrojando como resultados un residuo de DQO de 96.1 mg/l, el cual mostró una eficiencia final del 95.2%, en ese sentido en ambos estudios se demuestran que los resultados se ven condicionados por las dosis de Sulfato Ferroso y nivel de pH, siendo el medio ácido el ideal para la mayor remoción de la DQO.

Mahtab et al. (2021), en su artículo científico evaluaron estadísticamente la eficacia de la técnica de oxidación avanzada basada en Fenton para el tratamiento de lixiviados de vertederos y se determinaron las condiciones operativas óptimas. Este proceso fue optimizado utilizando metodología de superficie de respuesta (RSM) junto con un diseño compuesto central (CCD) de cuatro factores (cinco niveles). Las variables del proceso utilizadas fueron pH, tiempo de reacción, dosis de Fe2+ y H2O2 para estudiar la respuesta y la eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO). Se obtuvo un modelo de regresión cuadrática significativa para ajustar los datos experimentales y todos los factores fueron estadísticamente significativos. El modelo tuvo en cuenta la respuesta dentro del error permitido. Se encontró que el coeficiente de determinación era igual a 0,95, el adecuado, la ratio de precisión se obtuvo como 22,133. La eliminación optimizada de DQO del 61 % se obtuvo a un pH de 3.1; el tiempo de reacción de 36 min, dosificación de Fe2+ de 0,04 mol/ L y dosificación de H2O2 de 0,075

mol/ L. Los gráficos de superficie de respuesta sugirieron que los valores de pH más altos no son favorables y que aumentar la dosis química no siempre conduce a una mayor eficiencia de eliminación de DQO. Con relación a nuestra investigación de igual forma se trabajó con el método Fenton que incluyó el uso de variables de operación como el pH de trabajo de 2.68, tiempo de reacción de 30 minutos (agitación en Jar Test), dosificación de Peróxido de Hidrogeno es de 800 mg/l que es equivalente a 0.0235 mol/l y de Fe+2 de 500 mg/l que es equivalente a 0.009 mol/l, con la finalidad de evaluar la respuesta y la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), obteniéndose como resultados un residuo de DQO de 96.1 mg/l, el cual mostró una eficiencia de remoción final del 95.2%. Los resultados obtenidos estuvieron en la misma línea con relación a otros trabajos de investigación anteriores, aprobando de esta manera la precisión del resultado obtenido.

VI. CONCLUSIONES

- ✓ De acuerdo con el primer objetivo se concluye que los parámetros determinados inicialmente en el lixiviado de DQO (1997.5 mg/l) y DBO (1062 mg/l) se encuentran fuera de los Límites Máximos Permisibles, el pH (8.46) se encuentra dentro del LMP, mientras que la Temperatura (22.7°C), Conductividad Eléctrica (8.86 mS/cm), Sólidos Suspendidos Totales (286 mg/l) y Turbiedad (1870.3 NTU) no cuentan con Límites Máximos Permisibles según la norma Austriaca utilizada para la comparación.
- ✓ Con relación al segundo objetivo se concluye que el tratamiento del lixiviado trabajado con 2.68 de pH, utilizando una concentración de 800 mg/l de H2O2 y 500 mg/l de FeSO4, alcanzó una concentración residual de 96.1 mg/l de DQO desde un valor inicial de 1997.5 mg/l, asi mismo, la concentración del 15% de Ca(OH)2 logró neutralizar la muestra de lixiviado con la dosis de 5 ml, llegando a un valor de 6.65 de pH, cumpliendo con el límite permitido.
- ✓ Del tercer objetivo se concluye que, en el tratamiento del lixiviado las concentraciones de 800 mg/l de Peróxido de Hidrógeno y 500 mg/l de Sulfato Ferroso alcanzaron una remoción total de 1901.4 mg/l de DQO, obteniéndose una eficiencia total del del 95.2%.
- ✓ Se concluye que el uso del neutralizante Ca(OH)2 al 15% y dosis de 5, 10, 15 y 20 ml lograron incrementar el pH de las muestras ácidas desde un valor inicial de 2.55 hasta niveles de 6.65, 7.27, 7.76 y 8.25 respectivamente, logrando con ello que todas las dosis puedan estar dentro de los Límites Máximos Permisibles establecidos entre 6.5 y 8.5.

VII. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda utilizar la metodología desarrollada en la presente investigación para el tratamiento de lixiviados de vertederos (rellenos sanitarios) que contengan altas concentraciones de DQO y requieran una neutralización de la acidez final, con la finalidad de alcanzar los Límites Máximos Permisibles.
- ✓ Con la finalidad de obtener mejores dosis de tratamiento y optimizar las eficiencias para la remoción de concentraciones elevadas de DQO en los lixiviados, es recomendable realizar otros ensayos con concentraciones de oxidantes distintos a los trabajados en la presente investigación e incluso considerar otras estaciones del año.
- ✓ Se recomienda para futuros estudios en el tratamiento de lixiviados, modificar las variables de operación como el volumen de muestra, el tiempo de contacto y sedimentación, la temperatura de trabajo, los niveles de pH, la concentración de los reactivos y otros, con la finalidad de conocer posibles cambios para alcanzar una remoción máxima de la DQO.
- ✓ Se recomienda que los tratamientos desarrollados con FENTON en medio ácido, antes de su vertimiento a los cuerpos receptores sean neutralizados correctamente a fin de evitar contaminarlos e impactarlos negativamente.
- ✓ Se recomienda al sector competente-MINAM elaborar Límites Máximos Permisibles para el caso de lixiviados de vertederos (rellenos sanitarios), quienes no cuentan con parámetros de evaluación y presentan elevadas concentraciones de contaminantes con un alto grado de toxicidad para el ambiente y salud de las personas.

VIII. REFERENCIAS

Alave, J. (2023). *Optimización del proceso Fenton para el tratamiento de lixiviados en el Relleno Sanitario Itapalluni- Puno*. [Tesis de pregrado, Universidad Privada San Carlos]. Repositorio Institucional de UPSF. https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/944/Jose_Guillermo_ALAVE_CASTILLO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Aranibar, M. (2016). *Aplicación del reactivo Fenton para la remoción de DQO del lixiviado de un depósito de seguridad a escala laboratorio*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina] . Repositorio Institucional UNALM. https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/e50dea3d-c34f-4fe1-abca-53672e9c3617

Ávila, E. (2022). *Características generales de tecnologías para el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios*. [Tesis de pregrado, Universidad Estatal del Sur de Manabi]. Repositorio Insitucional UESM. https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/4331/1/%c3%81vila%20Tumbaco%20Edwin%20Danny.pdf

Bahena, K. (2022). *Evaluación de dos procesos de oxidación avanzada acoplados a un proceso anaerobio bioelectroquímico para el tratamiento de lixiviados provenientes de un relleno sanitario*. [Tesis de pregrado, Instituto Mexicano de Tencología del Agua]. Repositorio Institucional IMTA http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/2305/T_111.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Barrantes, N. (2020). *Remoción de parámetros fisicoquímicos del lixiviado del botadero controlado "la Pushura", mediante proceso de Oxidación Avanzada, Jaén,*

Cajamarca. [Tesis de pregrado, Universidad de Jaén]. Repositorio Institucional Jaén. https://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/UNJ/183/1/Barrantes_SNF.pdf

Boris, T. (8 de enero de 2021). *Importancia de los rellenos sanitarios: tipos, caracteristicas*. Obtenido de https://ingenieriaambiental.net/rellenos-sanitarios/

Cadavid, A., Rivera, J., y Becerra, D. (2022). Procesos avanzados de oxidación usando peróxido de hidrogeno activado con diferentes catalizadores para tratamiento de lixiviado de relleno sanitarios. *Ing-NOVA, 1*(2), 205-214. https://revistas.unicartagena.edu.co/index.php/ing-nova/article/view/4005/3232

Chakinala, A., Bremner, D. G., y Namkung, K. B. (2008). nálisis multivariable de la mineralización de fenol mediante cavitación hidrodinámica combinada y procesamiento Fenton avanzado heterogéneo. *Applied Catalysis B: Environmental,, 78*(1), 11-18. doi:10.1016/j.apcatb.2007.08.012

Chávez, W. (2011). *Tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario de la Cd. de Chihuahua*. [Tesis de pregrado, Centro De Investigación En Materiales Avanzados]. Repositorio Institucional CIMAV. https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/858/1/Wendy%20Margarita%20Ch%C3%A1vez%20Montes%20MCTA.pdf

Cheibub, A., Campos, J., Fonseca, y Valeria, F. (2014). Eliminación de DQO de un lixiviado de vertedero estabilizado mediante un proceso fisicoquímico y oxidativo avanzado. *Revista de Ciencias Ambientales y Salud Parte A Sustancias Tóxicas/Peligrosas e Ingeniería Ambiental , 94*(14), 1718-1726. doi:http://dx.doi.org/10.1080/10934529.2014.951259

Chu, L., Cheung, K., y Wong, M. (1994). Variaciones en las propiedades químicas del lixiviado de vertederos. *Gestión Ambiental, 18*(1), 105–117. https://doi.org/10.1007/BF02393753

Decreto Legislativo N°635. *Código Penal, delitos ambientales* (8 de mayo de 1991) https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con2_uibd.nsf/771198DA8AB8D48A052577BD006EABC3/$FILE/DLeg_635.pdf

Decreto Legislativo N°1278. *Gestión Integral de Residuos Sólidos* (24 de abril de 2017) https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Decreto-Legislativo-N%C2%B0-1278.pdf

Decreto Supremo N°014. *Reglamento de la Ley de Gestión de Residuos Sólido* (21 de diciembre de 2017) https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/12/ds_014-2017-minam.pdf

Deng, Y., y Englehardt, J. D. (2006). Tratamiento de lixiviados de vertederos mediante el proceso Fenton. *Investigación del agua, 40*(20), 3683-3694. doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.08.009

Diaz, S. M., Solís, H., Gómez, S., Giacomán, G., y Méndez, R. (2021). Tratamiento del lixiviado de un relleno sanitario utilizando oxidaciones avanzadas combinadas. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química, 7*(7), 137-146. https://zaloamati.azc.uam.mx/server/api/core/bitstreams/3d4cfb79-620f-4d61-95a3-66b2a4a4974f/content

El Mrabet, I., Ihssane, B., Valdés, H., y Zaitan, H. (2022). Optimization of Fenton process operating conditions for the treatment of the landfill leachate of Fez city (Morocco). *Int. J. Environ. Sci. Technol., 19*(1), 3323–3336. https://doi.org/10.1007/s13762-021-03393-0

Herrera, S. (2021). *Adecuación de los métodos foto fenton y químico para la reducción de DQO y sulfatos de aguas residuales de colorantes naturales*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao]. *Repositorio Institucional de la UNC*. Obtenido de https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/5742/IF-HERRERA%20SANCHEZ-FIQ-2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Huaranga, L. (2023). *Tratamiento de lixiviados por procesos de oxidación avanzada del Relleno Sanitario "El Zapallal", Carabayllo*, 2023. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal*].* Repositorio Insittucional FV. https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/9310/Tesis_Huaranga_Alan_Lupe_Ines_FIGAE.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ley N° 28611. *Ley General del Ambiente* (13 de octubre de 2005). http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-28611.pdf

Ley N.º 26842 *Ley General de Salud* (15 de julio de 1997) https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/284868/ley-general-de-salud.pdf?v=1572397294

Lin Bu, K. W., Qing, L. Z., y Liang Liang Wei, J. Z. (2010). Caracterización de la materia orgánica disuelta durante el tratamiento de lixiviados de vertedero mediante reactor discontinuo secuencial, celda corrosiva de aireación-Fenton y carbón activado granular en serie. *J Hazard Mater, 179*(3), 1096-1105. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.03.118

Liu, Y., Chen, Y., Daa, Y. y Xie, F. J. (2022). Advanced treatment of landfill leachate using integrated coagulation/ photo-Fenton process through in-situ generated nascent Al3+ and H2O2 by Cl, N co-doped aluminum-graphite composite. *Applied Catalysis B: Environmental, 304*. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.121003

Mahtab, M., Islam, D. y Faaroqui, I. (2021). Optimization of the process variables for landfill leachate treatment using Fenton based advanced oxidation technique. *Engineering Science and Technology, an International Journal, 24*, 428–435. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.013

Méndez, R., García, R., C. E. y Sauri, M. (2010). Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton. *Ingeniería e Investigación, 30*(1), 80-85. http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v30n1/v30n1a14.pdf

Municipalidad Metropolitana de Lima (2014). *Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia de Lima 2015-2025*.

Orihuela, E. (2023). *Degradación de carga orgánica del lixiviado generado en la fermentación de residuos sólidos municipales mediante el proceso avanzado foto - fenton.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/10123/T010_43208367_M.pdf?sequence=8&isAllowed=y

Orozco, V. (2018). *Determinación de lixiviados de relleno sanitario de San Ramón y selección de su sistema de tratamiento*. [Tesis de licenciatura, Tecnológico de Costa Rica].Repositorio Institucional TEC. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11164/determinacion_lixiviados_relleno_sanitario.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Renou, J., Givaudan, G., Poulain, S., Dirassouyan, F. y Moulin, P. (2007). Tratamiento de lixiviados de vertederos: revisión y oportunidad. *J Hazard Mater, 150*(3), 468-939. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.09.077

Totoy, V. (2022). *Evaluación de la eficiencia de remoción de DQO de un humedal artificial para el tratamiento secundario de los lixiviados del Relleno Sanitario Romerillos, Cantón Mejía*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional] Biblioteca digital EPN. https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23563

Wang, F., Zhepei, G. H. y Q., L. (2021). Split dosing of H2O2 for enhancing recalcitrant organics removal from landfill leachate in the Fe0/H2O2 process. *Degradation efficiency and mechanism. Separation and Purification Technology, 278*(1), 119-564. dhttps://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119564

Yaranga, J. (2021). *Eficiencia de la oxidación Fenton y Foto Fenton en la remoción de DQO en lixiviados del botadero "El Porvenir", distrito de El Tambo, Huancayo*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/63563/Yaranga_MJS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Zouboulis, A., Xiao-Li Chai y Katsoyiannis, I. A. (2004). La aplicación de biofloculante para la eliminación de ácidos húmicos de lixiviados de vertederos estabilizados. *J Environ Manage, 70*(1), 35-41. doi:10.1016/j.jenvman.2003.10.003

IX. ANEXOS

9.1. Anexo A. Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
Problema general ¿Cómo es el tratamiento por oxidación fenton y cal para la remoción de DQO y neutralización de lixiviados del relleno sanitario "Modelo del Callao", 2025? **Problemas Específicos** 1)¿Cómo es la caracterización de los parámetros fisicoquímicos del lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao"? 2)¿Cuáles son los niveles residuales de la DQO y pH terminado el tratamiento por oxidación fenton y neutralización con cal en el lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao"? 3)¿Cuál es la eficiencia del tratamiento por oxidación fenton para la remoción de DQO y neutralización con cal del pH en el lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao"?	**Objetivo general** Evaluar el tratamiento por oxidación fenton y cal para la remoción y neutralización de DQO y pH en el lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao", 2025. **Objetivos Específicos** 1) Caracterizar los parámetros fisicoquímicos del lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao", 2025. 2) Determinar los niveles residuales de la DQO y pH al término del tratamiento por oxidación fenton y neutralización con Cal en el lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao". 3) Estimar la eficiencia del tratamiento por oxidación fenton y cal para la remoción de la DQO y neutralización del pH en el lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao".	**Hipótesis general** La oxidación fenton y la Cal permitirán remover la DQO y neutralizar el pH eficientemente en el lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao", 2025. **Hipótesis Específicos** 1) Los parámetros fisicoquímicos se encuentran fuera de los límites máximos permisibles en el lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao", 2025. 2) La oxidación fenton y la Cal remueven y neutralizan eficientemente la DQO y el pH en el lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao", 2025. 3) La oxidación fenton y la Cal son altamente eficientes para la remoción de la DQO y neutralización del pH en el lixiviado del relleno sanitario "Modelo del Callao".	**Variable Independinte**	La Oxidación Fenton o Avanzada son procesos fisicoquímicos capaces de modificar la estructura química de los contaminantes, este proceso consiste en generar especies fuertemente oxidantes como los radicales (OH.) que actúan como iniciadores de oxidación. (Mayorca, 2017) La neutralización consiste en agregar compuestos alcalinos o básicos según sea el caso como cal, alúmina, cloruros, etc., que permitan eliminar principalmente metales pesados y sólidos en suspensión. (Arbeláez y García, 2010)	La evaluación del tratamiento fenton será desarrollado mediante la aplicación de un oxidante como el peróxido de hidrógeno y un catalizador como el sulfato de hierro en concentraciones y dosis controladas en tiempos y velocidades diferentes o estándar. El volumen de trabajo será de 1 litro acondicionadas en las jarras del floculador programable.	PARÁMETROS DE CONTROL	Concentración	mg/l
							Dosis	g
			Tratamiento por oxidación fenton y cal.				Tiempo	minutos
							Velocidad	RPM
							Volumen	ml
							Densidad	g/cm^3
			Variable Dependiente:	El tratamiento de los lixiviados consiste en realizar operaciones o procesos para lograr remover la mayoría de los contaminantes antes de su disposición en un cuerpo receptor. Para esto es indispensable saber el volumen y poder contaminante de los lixiviados, su composición y características. (Orozco, 2018)	Para la evaluación de la Remoción del proceso se tomará en cuenta la DQO, sin embargo, se caracterizará los principales parámetros físicoquímicos como la DBO, DQO, pH, Conductividad Eléctrica, Turbiedad y Sólidos Totales Disueltos. La eficiencia será determinada en relación a la DQO inicial y la DQO final.	PARAMETROS FISICOQUIMICOS	Potencial de Hidrógeno	Unidad de pH
							Conductividad Eléctrica	uS/cm
							Solidos Disueltos Totales	mg/l
							Turbiedad	NTU
			Remoción de DQO y neutralización de lixiviado				DQO	mg/l
						RENDIMIENTO	Eficiencia	%

9.2. Anexo B: Ficha técnica para la recolección de datos de campo.

Universidad Nacional Federico Villarreal	"TRATAMIENTO POR OXIDACIÓN FENTON Y CAL PARA REMOCIÓN DE DQO Y NEUTRALIZACIÓN DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO "MODELO DEL CALLAO", 2025"	FIGAE
	FORMATO FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO	**VERSIÓN: 01** **PÁGINAS: 1 DE 1**

ESTACIÓN	**EQUIPO**			
	Multiparámetro	**Potenciómetro**	**Conductímetro**	**Turbidímetro**

ANALISIS 2	**PARAMETROS FISICOQUIMICOS**						
MONITOREOS	**pH**	**Temperatura**	**Conductividad**	**Solidos Totales Disueltos**	**Salinidad**	**Turbiedad**	**DQO**
	0 -14	**°C**	**uS/cm**	**mg/L**	**%**	**NTU**	**mg/l**
Monitoreo 1							
Monitoreo 2							
Monitoreo 3							
Monitoreo 4							

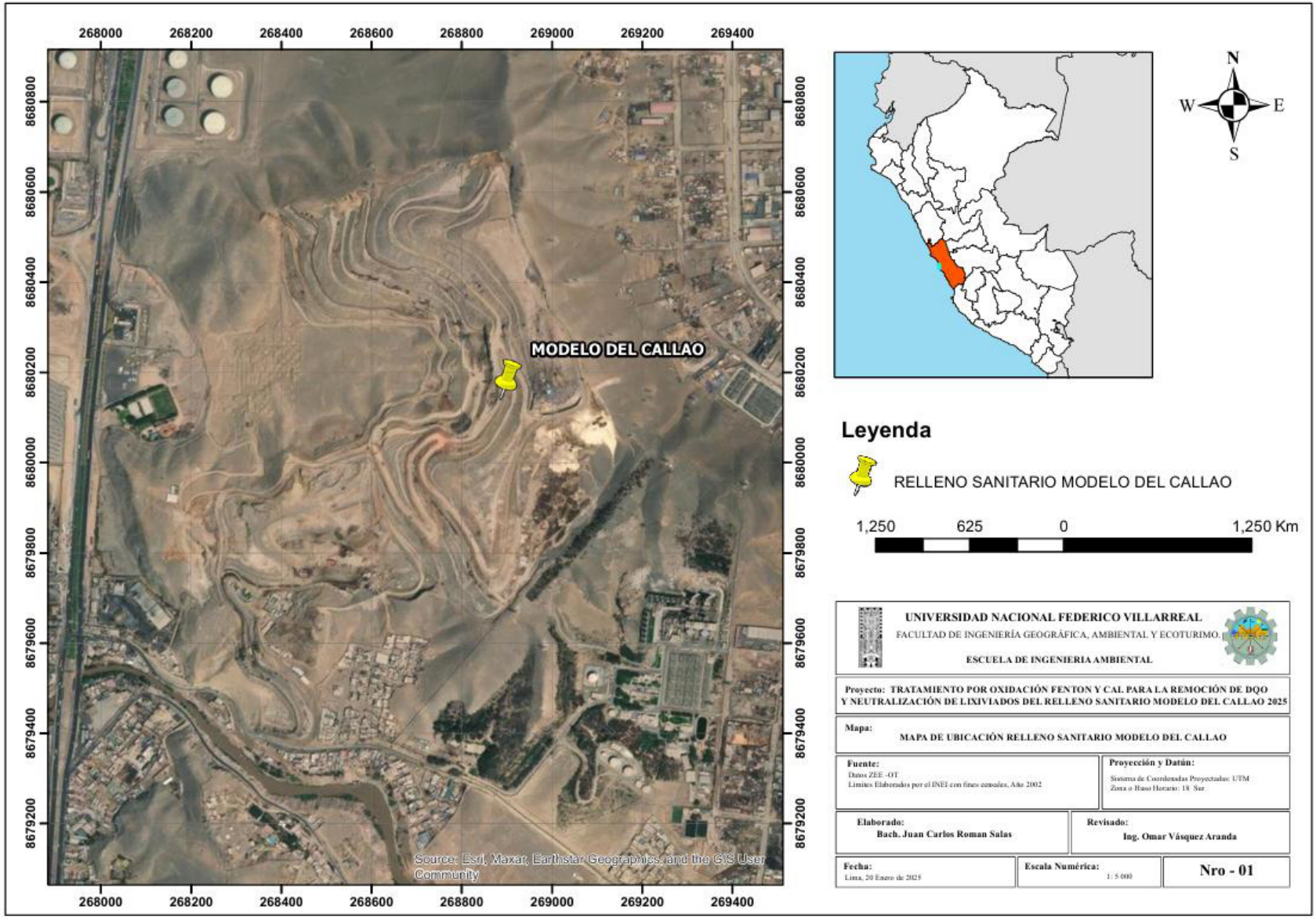
9.3. Anexo C. Ficha de recolección de datos de laboratorio

Universidad Nacional Federico Villarreal	"TRATAMIENTO POR OXIDACIÓN FENTON Y CAL PARA REMOCIÓN DE DQO Y NEUTRALIZACIÓN DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO "MODELO DEL CALLAO", 2025"	FIGAE
	FORMATO FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE LABORATORIO	**VERSIÓN: 01**
		PÁGINAS: 1 DE 1

FECHA DE ANALISIS	**METODO: JAR TEST**			
	N° DE JARRAS	**N° DE PRUEBAS**	**N° DE REPETICIONES**	**MUESTRAS TOTALES**

	PRUEBA DE JARRAS						
	Peróxido de Hidrógeno-H_2O_2	Sulfato Ferroso-$Fe(SO_4)_2$	Velocidad	Tiempo	Volumen	Modo Lento/Rápido	Tiempo de sedimentación
	mg/l	mg/l	RMP	Minutos	Litros	RPM	Minutos
Jarra 1							
Jarra 2							
Jarra 3							
Jarra 4							
Jarra 5							

9.4. Anexo D Mapa de Ubicación



9.5. Anexo E. Panel fotográfico

Toma de muestra de Lixiviado

Caracterización Fisicoquímica de Lixiviado

Caracterización Fisicoquímica de Lixiviado

Adición de reactivos para en los viales

Adición de reactivos para en los viales

Medición de DQO del Lixiviado

Adición del Peróxido y Sulfato Ferroso

Llenado de las muestras en la Jarras de Floculación

Adición del Peróxido y Sulfato Ferroso

Medición de parámetros finales