



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AMBIENTAL Y FORESTAL



**“EFICIENCIA DEL PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA
FOTO - FENTON EN EL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS
DE LA CELDA TRANSITORIA DE HUANUYO – JULIACA 2022”**

Bach. Jhoel Amador Ticona Ramos

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

**Línea de investigación
Gestión de los recursos hídricos**

Asesor:

Dr. José Luis Pineda Tapia

Juliaca, 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AMBIENTAL Y FORESTAL



**“EFICIENCIA DEL PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA FOTO -
FENTON EN EL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS DE LA CELDA
TRANSITORIA DE HUANUYO – JULIACA 2022”**

Bach. Jhoel Amador Ticona Ramos

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL

Línea de investigación
Gestión de los Recursos Hídricos

Asesor:

Dr. José Luis Pineda Tapia

Juliaca, 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Ticona, J. (2023). *Eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton en el tratamiento de los lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo, Juliaca 2022* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Juliaca.

AUTOR: Jhoel Amador Ticona Ramos

TÍTULO: Eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton en el tratamiento de los lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo, Juliaca 2022.

PUBLICACIÓN: Mayo, 2023

DESCRIPCIÓN: Cantidad de páginas (110 pp)

NOTA: Tesis de la **Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal** - Universidad Nacional de Juliaca

CÓDIGO: 01-000025-01/T52

NOTA: Incluye bibliografía

ASESOR: Dr. José Luis Pineda Tapia

PALABRAS CLAVE: DQO, oxidación foto-fenton, lixiviados, materia orgánica, residuos sólidos.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AMBIENTAL Y FORESTAL

**“EFICIENCIA DEL PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA FOTO -
FENTON EN EL TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS DE LA CELDA
TRANSITORIA DE HUANUYO – JULIACA 2022”**

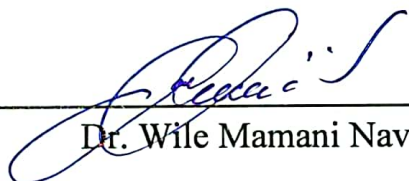
**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL Y FORESTAL**

Presentado por:

Bach. Jhoel Amador Ticona Ramos


Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

PRESIDENTE



Dr. Wile Mamani Navarro

SECRETARIO



M. Sc. Eliana Mullisaca Contreras

VOCAL



M. Sc. Hugo Apaza Aquino

ASESOR



Dr. José Luis Pineda Tapia

DEDICATORIA

A Dios

Por regalarme un día más de vida y permitirme lograr mis objetivos de formación y desenvolvimiento profesional.

A mi hijo Abdiel

Motor y motivo, con el deseo de que crezca en un ambiente mejor y alcance el éxito personal.

A mis Padres

Por ser pilares y demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional. Son y serán siempre mi fortaleza, los quiero y admiro mucho.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo de investigación científica si bien ha requerido el esfuerzo y mucha dedicación por parte del autor y asesor de tesis, no hubiera sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que a continuación mencionaré, porque ellos fueron parte fundamental de haber alcanzado esta meta con éxito.

A Dios, por el apoyo espiritual, quien iluminó mi mente y por haber puesto en mi camino a personas que han sido mi soporte y compañía durante el desarrollo de esta investigación científica.

Mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis Dr. José Luis Pineda Tapia, por saber guiar este barco hasta su destino final, por su dedicación, empeño y sus consejos.

Al PhD. Marcelo Rocco Casas por guiarme en la investigación y aclararme las dudas tan amablemente. Al Ing. Wilson Robles Kqerare del equipo Flowen por dejarme trabajar junto a ellos y ensamblar el prototipo de tratamiento.

Al personal de laboratorios generales de la UNAJ por su indispensable colaboración para que todo funcionara, al Mvz. Miguel y el Ing. Rolando.

Con mención especial, a mis leales amigos y colegas Yordy y Briguit, por remar durante todo el viaje junto conmigo sin dejarme desfallecer, al Dr. Cesar Larico Mamani, por sus consejos, su contagiosa vitalidad y su energía; con quienes estaré siempre en deuda pues su compañía y amistad fue el mejor premio.

¡Firmar la rendición, no entró en mis planes...!

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ANEXOS	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN.....	11
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1.1. Descripción del problema de investigación.....	13
1.2. Formulación del problema de investigación.....	14
1.3. Objetivos de la investigación.....	15
1.4. Justificación de la investigación	15
1.4.1. Justificación técnica	15
1.4.2. Justificación económica	16
1.4.3. Justificación socioambiental	16
CAPÍTULO II REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
2.1. Antecedentes de la investigación.....	17
2.1.1. Antecedentes internacionales	17
2.1.2. Antecedentes nacionales	18
2.1.3. Antecedentes locales	19
2.2. Marco teórico.....	20
2.2.1. Residuos sólidos.....	20
2.2.2. Infraestructuras de disposición final de RRSS.....	22
2.2.3. Lixiviados de residuos sólidos	22
2.2.4. Materia orgánica.....	29
2.2.5. Demanda química de oxígeno (DQO).....	29
2.2.6. Biodegradabilidad de las aguas residuales	31
2.2.7. Procesos de oxidación avanzada - POA.....	32
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
3.1. Ámbito de estudio.....	37
3.2. Metodología de la investigación.....	37

3.3.	Hipótesis de la investigación	38
3.4.	Variables de investigación.....	39
3.5.	Población, muestra, muestreo y unidad de análisis	39
3.6.	Equipos, materiales y reactivos	41
3.7.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	41
3.8.	Procedimiento metodológico.....	42
3.8.1.	Caracterización físico-química de los lixiviados de la celda transitoria	42
3.8.2.	Evaluación de las condiciones óptimas de eficiencia del tratamiento	45
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN		51
4.1.	Caracterización físico-química de los lixiviados de la celda transitoria	51
4.1.1.	Índice de biodegradabilidad del lixiviado crudo	54
4.2.	Evaluación de las condiciones óptimas de eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto – fenton.	55
4.3.	Diseño estadístico de la investigación.....	57
4.3.1.	Análisis estadístico.....	58
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		72
5.1.	CONCLUSIONES.....	72
5.2.	RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		74
ANEXOS		83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición general de residuos sólidos municipales del distrito de Juliaca	21
Tabla 2. Características físicas de residuos sólidos municipales del distrito de Juliaca	21
Tabla 3. Contenido de humedad de los residuos sólidos municipales del distrito de Juliaca ...	21
Tabla 4. Caracterización físico-química de los lixiviados.....	24
Tabla 5. Clasificación y caracterización de los lixiviados.....	25
Tabla 6. Contaminantes más comunes en los lixiviados	26
Tabla 7. Efectos en la salud causados por los lixiviados.....	26
Tabla 8. Índice de biodegradabilidad del agua residual	31
Tabla 9. Potenciales de oxidación de algunos oxidantes a 25°C.....	33
Tabla 10. Ventajas y desventajas del proceso fenton	36
Tabla 11. Ubicación de la poza de lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo	37
Tabla 12. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos empleados.....	42
Tabla 13. Métodos de determinación de los parámetros fisicoquímicos evaluados.....	44
Tabla 14. Matriz del diseño experimental (diseño Box-Behnken).....	50
Tabla 15. Matriz del diseño de contraste (diseño factorial)	50
Tabla 16. Parámetros de campo.....	51
Tabla 17. Parámetros fisicoquímicos.....	52
Tabla 18. Parámetros inorgánicos (metales totales).....	53
Tabla 19. Índice de biodegradabilidad del lixiviado crudo	54
Tabla 20. Índice de biodegradabilidad del agua residual	54
Tabla 21. Eficiencia (%) de reducción de la DQO en función a la absorbancia	55
Tabla 22. Matriz del diseño factorial para la eficiencia de reducción de DQO utilizando las variables dosis de H ₂ O ₂ y pH.	57
Tabla 23. Matriz del diseño factorial para la eficiencia de reducción de DQO utilizando las variables dosis de H ₂ O ₂ y tiempo de tratamiento.	57
Tabla 24. Matriz del diseño factorial para la eficiencia de reducción de DQO utilizando las variables pH y tiempo de tratamiento.....	58
Tabla 25. Coeficientes del modelo de regresión para las variables dosis de peróxido de hidrógeno y pH.	64

Tabla 26. Coeficientes del modelo de regresión para las variables dosis de peróxido de hidrógeno y tiempo de tratamiento.	64
Tabla 27. Coeficientes del modelo de regresión para las variables dosis de peróxido de hidrógeno y tiempo de tratamiento.	65
Tabla 28. Análisis de varianza para el % de eficiencia de reducción de DQO utilizando las variables dosis de peróxido de hidrógeno y pH.....	66
Tabla 29. Análisis de varianza para el % eficiencia de reducción de DQO utilizando las variables dosis de peróxido de hidrógeno y tiempo de tratamiento.	67
Tabla 30. Análisis de varianza para el % eficiencia de reducción de DQO utilizando las variables pH y tiempo de tratamiento.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de tratamiento de aguas en función a la biodegradabilidad y POAs	32
Figura 2. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada a presiones y temperaturas ambientales	33
Figura 3. Ubicación y estado de las celdas transitorias y poza de lixiviados de Huanuyo.....	37
Figura 4. Poza de lixiviados operativa de la celda transitoria de Huanuyo.....	40
Figura 5. Muestreo puntual de la poza de lixiviados operativa.....	44
Figura 6. Ilustración del esquema del reactor propuesto por el autor.....	45
Figura 7. Esquema de las etapas del procedimiento experimental de foto-oxidación.....	45
Figura 8. Diagrama de Pourbaix para el hierro	47
Figura 9. Curva de calibración de la DQO en función a la absorbancia	48
Figura 10. Eficiencia alcanzada en la reducción de la materia orgánica.....	56
Figura 11. Diagrama de Pareto para la eficiencia de reducción de DQO.....	60
Figura 12. Relación de los efectos principales para el porcentaje de eficiencia de reducción de DQO.	61
Figura 13. Estimación de interacción para el % eficiencia de reducción de DQO.....	63
Figura 14. Efecto de la dosis de $[H_2O_2]$ y pH para el % eficiencia de reducción de DQO.	69
Figura 15. Efecto de la dosis de $[H_2O_2]$ y tiempo de tratamiento para el % eficiencia de reducción de DQO.	70
Figura 16. Efecto de la dosis de pH y tiempo de tratamiento para el % eficiencia de reducción de DQO.....	71
Figura 17. Visita de diagnóstico a las celdas transitorias de Huanuyo.....	85
Figura 18. Muestreo de lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo para su caracterización y tratamiento.....	86
Figura 19. Proceso de tratamiento de oxidación avanzada foto-fenton.....	87
Figura 20. Calidad de las muestras luego del tratamiento de oxidación foto-fenton	88
Figura 21. Preparación de solución digestora y viales para determinación de DQO	89
Figura 22. Lectura de viales digestados para determinación de la DQO mediante absorbancia en el espectrofotómetro UV.....	90

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Registro fotográfico	84
Anexo 2. Informes de ensayo de laboratorio	91
Anexo 3. Cadena de custodia	96
Anexo 4. Método de determinación de la DQO	98
Anexo 5. Procesamiento de la data estadística	101
Anexo 6. OFICIO N.º 092-2022/P-CO-UNAJ	103
Anexo 7. CARTA N.º 588-2022-MPSRJ/UGRS	105
Anexo 8. Matriz de consistencia	107
Anexo 9. Operacionalización de variables	109

RESUMEN

Los lixiviados de residuos sólidos contienen elevadas cargas contaminantes representando un riesgo potencial al ambiente y la salud pública, su tratamiento destaca como una de las áreas de mayor interés en las infraestructuras de disposición final, sobre todo cuando las tecnologías actuales se limitan a la recirculación como medidas máximas de control. Esta investigación tuvo por objetivo general determinar la eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton como tratamiento en la reducción de materia orgánica de los lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo. En la etapa inicial se caracterizaron física y químicamente los lixiviados para conocer la calidad y analizar los procesos de tratamiento; en seguida se realizaron las pruebas experimentales de foto-oxidación para determinar la mayor eficiencia de degradación de la materia orgánica a diferentes condiciones. Los resultados de la caracterización reportaron valores de 5140 mg/L y 61300 mg/L para DBO₅ y DQO respectivamente y un pH inicial de 6.8; en lo que concierne a las pruebas experimentales de foto-oxidación, esta tecnología fue capaz de reducir el 83.29 % de materia orgánica en términos de DQO a condiciones óptimas de una dosis de 15 mL/L de peróxido de hidrogeno (H₂O₂ al 50%) y 2000 mg/L de Fe²⁺ (FeSO₄.7H₂O al 99.9%), un pH de 4 y tiempo de contacto de 30 minutos; mejorando el color, olor y la biodegradabilidad del efluente tratado, pasando de un IB de 0.08 a 0.5. Este valor evidencia que puede acompañarse tratamientos biológicos posteriores al de oxidación avanzada para su reinserción en la naturaleza sin causar alteraciones significativas, demostrando la viabilidad técnica del proceso foto-fenton como alternativa de tratamiento primario para los lixiviados de las celdas transitorias de Huanuyo y de los rellenos sanitarios en general que permitirá mitigar los riesgos e impactos negativos que ocasionan estos efluentes sobre los componentes ambientales.

Palabras clave: DQO, oxidación foto-fenton, lixiviados, materia orgánica, residuos sólidos.

ABSTRACT

Solid waste leachates contain high polluting loads, representing a potential risk to the environment and public health, its treatment stands out as one of the areas of greatest interest in final disposal infrastructures, especially when current technologies are limited to recirculation as maximum control measures. The general objective of this research was to determine the efficiency of the photo-fenton advanced oxidation process as a treatment for the reduction of organic matter in leachate from the Huanuyo transitory cell. In the initial stage, the leachates were physically and chemically characterized to determine the quality and analyze the treatment processes; then the experimental photo-oxidation tests were carried out to determine the highest degradation efficiency of organic matter under different conditions. The characterization results reported values of 5140 mg/L and 61300 mg/L for BOD₅ and COD respectively and an initial pH of 6.8; regarding the experimental tests of photo-oxidation, this technology was able to reduce 83.29% of organic matter in terms of COD at optimal conditions with a dose of 15 mL/L of hydrogen peroxide (50% H₂O₂) and 2000 mg/L of Fe²⁺ (FeSO₄·7H₂O at 99.9%), a pH of 4 and a contact time of 30 minutes; improving the color, odor and biodegradability of the treated effluent, going from a BI of 0.08 to 0.5. This value shows that biological treatments can be accompanied after advanced oxidation for their reinsertion into nature without causing significant alterations, demonstrating the technical feasibility of the photo-fenton process as a primary treatment alternative for leachates from the transitory cells of Huanuyo and from the sanitary landfills in general that will mitigate the risks and negative impacts caused by these effluents on environmental components.

Keywords: COD, photo-fenton oxidation, leachate, organic matter, solid waste.

INTRODUCCIÓN

La variada composición de los residuos sólidos dispuestos en las celdas transitorias de Huanuyo hace posible que el lixiviado formado adquiera una composición compleja en su estructura de formación, definiéndose como un producto obtenido a consecuencia de los residuos sólidos, la humedad y la percolación de líquidos a través de los desechos durante el proceso de estabilización (Méndez et al., 2019). Los lixiviados muestran una gran variación, caracterizándose principalmente por su elevada cantidad de compuestos de naturaleza orgánica, sólidos totales disueltos y microorganismos patógenos como los coliformes (Espinosa et al., 2010), los cuales al ser vertidos en el ambiente pueden contaminar el suelo, aguas superficiales y subterráneas, y al evaporarse el contenido acuoso las partículas pueden causar contaminación del aire (Torres et al., 2014).

El tratamiento de los lixiviados que hasta ahora es complejo, se debe a que sus componentes son altamente tóxicos y variables (Seibert et al., 2019); y debido a sus características fisicoquímica por lo general son resistentes a la biodegradación (Hirata, 2002). Este aspecto ambiental se ve agudizado en el altiplano puneño debido a que las precipitaciones son altas, lo que incrementa la cantidad de lixiviado generado, ocasionando el colapso de la poza de lixiviados y consecuentemente el riesgo potencial de contaminación de los cuerpos de agua del área de influencia del proyecto en operación (Red Muqui, 2020). Los compuestos más recalcitrantes de remover en los lixiviados son las sustancias húmicas y fúlvicas, por lo que es necesario proponer un sistema de tratamiento que asegure la reducción de la elevada carga orgánica presente y la precipitación de los elementos y/o compuestos no degradados (Nercolini et al., 2019).

Existen sistemas que pueden ser utilizados para el tratamiento de lixiviados, por ejemplo, la recirculación, evaporación, tratamientos biológicos, anaerobios, aerobios y procesos de oxidación avanzada (POA) (Abdulhussain et al., 2009). Los POA transforman el contaminante químicamente, de esta manera se puede conseguir la mineralización completa de los compuestos y en la mayoría de los casos no se generan sustratos que se deban tratar posteriormente (Martínez et al., 2014), motivo por el cual se requiere demostrar la capacidad que presentan los procesos de oxidación avanzada, cuyos métodos pueden ser aplicados de manera directa o combinada en la reducción de materia orgánica de aguas residuales, medidos generalmente bajo parámetros

indicadores como la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y carbono orgánico total (COT) (San Pedro et al., 2019).

En ese contexto; con la finalidad de contribuir con una propuesta técnica para el tratamiento de lixiviados de residuos sólidos que terminan impactando sobre el suelo, aire y las aguas naturales presentes en el área de influencia de operación del proyecto de las celdas transitorias de Huanuyo del distrito de Cabanillas, San Román, Puno; se planteó desarrollar una investigación que tuvo por objetivo principal determinar la eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton como propuesta de tratamiento de los lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo, que evidencie altos porcentajes de eficiencia de degradación química de la materia orgánica para que puedan ser reinsertados en la naturaleza sin generar alteraciones significativas sobre los componentes ambientales.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema de investigación

García (2018), menciona que durante décadas el crecimiento de la población mundial ha sido exponencial, con cambios notables en los hábitos de consumo, lo que ha resultado en la generación acelerada de residuos sólidos municipales (RSM) e industriales que se llevan a disposición final. Asimismo, Fuentes y Muñoz (2021), señalan que una de las principales problemáticas en la disposición final de los RSM es el tratamiento y control de los lixiviados representando un riesgo sanitario y ambiental muy alto por las condiciones tóxicas dependientes de las características de los residuos depositados. Este producto se ha convertido en uno de los principales desafíos de la ingeniería del tratamiento de residuos líquidos debido a sus elevadas cargas contaminantes (materia orgánica y metales pesados), por ello destaca como una de las áreas de mayor interés en los rellenos sanitarios (Zafra y Romero, 2019).

El relleno sanitario es el método más practicado en América Latina y el Caribe, aunque la mayoría de los calificados como sanitarios no cumplen las especificaciones técnicas requeridas (OPS, 2010). En la mayoría de los países de Latinoamérica las tecnologías implementadas para el tratamiento de lixiviados no cumplen con las condiciones técnicas para controlar la contaminación ambiental impactando sobre el suelo, el agua subterránea y los sistemas fluviales; como consecuencia, la infiltración de los lixiviados al agua subterránea y a los sistemas acuíferos significa un riesgo potencial a la salud pública (García, 2018). Respecto al tratamiento de lixiviados de residuos sólidos, solo en países como Argentina, Brasil, México y Chile, existen rellenos sanitarios, para algunas de sus ciudades, con tratamiento de lixiviados (Sáez et al., 2014).

En el Perú, Sandoval (2009), menciona que la tecnología usada para el tratamiento de este aspecto ambiental se limita a la evaporación y recirculación del lixiviado, fundamentándose en que una de las ventajas de la recirculación es que va reduciendo la cantidad de lixiviados y la concentración de los metales pesados se va haciendo menor, por la evaporación e infiltración que sufre, pero generando malos olores y otros riesgos en la infraestructura. Por su parte,

Méndez et al. (2008), señalan que las tecnologías de evaporación y recirculación utilizada para el tratamiento de lixiviados, presenta desventajas relacionadas con la eficiencia y reducción de los contaminantes. La recirculación no es un procedimiento aconsejable cuando la pluviometría de la zona es muy elevada (como en el altiplano), enfatizando que existen serios cuestionamientos en sus efectos sobre la estabilidad geotécnica del relleno, lo que limita su aplicación a situaciones donde se pueda comprobar la estabilidad; por su parte la evaporación presenta como desventaja la ubicación del terreno, ya que produce cierto grado de contaminación y malos olores (Martínez et al., 2014).

Actualmente, la Municipalidad Provincial de San Román - Juliaca cuenta con celdas transitorias para residuos sólidos, construida el año 2019 en el marco de la declaratoria de emergencia en gestión y manejo de los residuos sólidos de este distrito, esta infraestructura se encuentra ubicada en el sector Huanuyo, distrito de Cabanillas, San Román, Puno (Loza, 2020), cuenta con pozos de captación de lixiviados con recirculación como medida de control, es decir, cuando alcanzan su capacidad máxima se limitan a ser recirculados mediante bombeo hacia las celdas superiores con una frecuencia de 35 y 30 días en época de estiaje y avenida respectivamente (Municipalidad Provincial de San Román, 2022), agravándose el problema por la pluviometría alta del altiplano y la topografía accidentada del terreno, elevando el riesgo de impactar negativamente sobre los cuerpos de aguas subterráneos y superficiales, poniendo en riesgo la salud de los habitantes de zonas aledañas (Red Muqui, 2020). Por consiguiente, se formularon las siguientes preguntas de investigación.

1.2. Formulación del problema de investigación

1.2.1. Problema general

¿Cuál será la eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton en la reducción de materia orgánica de los lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles serán las características fisicoquímicas de los lixiviados generados en la celda transitoria de Huanuyo?

- ¿Cuáles serán las condiciones óptimas de eficiencia en función a relación fenton, pH y tiempo de tratamiento para la reducción de la materia orgánica del lixiviado de la celda transitoria de Huanuyo mediante oxidación avanzada foto-fenton?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Determinar la eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton en la reducción de la materia orgánica del lixiviado de la celda transitoria de Huanuyo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las características físicas y químicas de los lixiviados generados en la celda transitoria de Huanuyo.
- Evaluar y determinar las condiciones óptimas de la relación fenton, pH y tiempo de tratamiento para la reducción de la materia orgánica del lixiviado de la celda transitoria de Huanuyo mediante oxidación avanzada foto-fenton.

1.4. Justificación de la investigación

1.4.1. Justificación técnica

En el Perú y otros países en vías de desarrollo, las técnicas utilizadas para el tratamiento y/o manejo de los lixiviados de rellenos sanitarios se limitan a la recirculación de estos compuestos con alta carga contaminante, generando problemas en estas instalaciones como colapsos y la generación de olores, agudizándose el problema cuando la pluviometría es alta como en el Altiplano (Sandoval, 2009). Por ende, esta investigación pretende generar nuevos conocimientos de tecnologías eficientes para el tratamiento de lixiviados mediante procesos de oxidación avanzada de tipo foto-fenton, que tiene la capacidad de degradar materia orgánica no biodegradable (León et al., 2020) característico de los lixiviados, mediante el ensamblaje de un reactor foto-catalítico a escala de laboratorio, para alcanzar la mayor eficiencia en el tratamiento de lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo, haciéndola técnicamente viable en comparación a otros sistemas de tratamiento.

1.4.2. Justificación económica

Si bien es cierto, los procesos de oxidación avanzada implican elevados costes si los comparamos con tratamientos de tipo biológico, debido a que estas tecnologías emplean altas cantidades de reactivos y en ocasiones requieren altos consumos de energía, elevando los costos de operación y mantenimiento (León et al., 2020). Sin embargo, en ocasiones cuando las aguas contaminadas a tratar contienen compuestos de carácter recalcitrante y/o tóxico o bajas concentraciones de materia orgánica fácilmente biodegradable, como es el caso de los lixiviados de rellenos sanitarios u otras infraestructuras similares de disposición final de residuos sólidos, su uso se hace útil y necesario (Sarria et al., 2002).

1.4.3. Justificación socioambiental

El 20 de marzo del 2020, a 06 meses de funcionamiento de las celdas transitorias de Huanuyo, se pudo evidenciar el colapso de la poza de lixiviados, ocasionando el discurrimiento de lixiviados hacia la quebrada Huanuyo en temporada de avenida y conectando con el rio Cabanillas, afluente directo de 4 bocatomas destinadas para riego de cultivos orgánicos, impactando directamente sobre la población del área de influencia directa del relleno sanitario, generando preocupación, zozobra y desconfianza en la población (Red Muqui, 2020). Ahí se fundamenta la importancia social del tratamiento de los lixiviados, debido a la suspicacia que genera en la población brindar la licencia social para la construcción de estas infraestructuras de disposición final de RRSS, que beneficia a 319 828 usuarios del servicio de limpieza pública de la ciudad de Juliaca, estimación basada en la proyección del ECRS (MPSR, 2015); a su vez con ésta tecnología de tratamiento se pretende brindar una solución ambientalmente viable, es decir, de una manera no invasiva, usando reactivos inocuos como el agua oxigenada (H_2O_2) que no generen subproductos, y como propuesta futura del empleo de fuentes de energía renovable como la radiación solar que sustituya las lámparas UV.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Faggiano et al. (2023), demostraron que las concentraciones de H_2O_2 y Fe^{2+} afectaron significativamente las respuestas, el pH del proceso se fijó en 2.8 mientras que el tiempo de tratamiento se fijó en 2h. Las condiciones operativas óptimas obtenidas por perturbación y gráfico de superficie 3D fueron de 4262 mg/L y 5104 mg/L para Fe^{2+} y H_2O_2 respectivamente (relación molar $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+} = 2$) con remociones de DQO, DBO_5 , NT y PT de 70%, 67%, 84% y 96% respectivamente; además, la relación $\text{DBO}_5:\text{NT}:\text{PT}$ desequilibrada inicial (9:1:1) mejoró significativamente (100:6:1), haciendo que el efluente fuera apto para un tratamiento biológico posterior.

Traid et al. (2022), en condiciones operativas óptimas de $[\text{H}_2\text{O}_2]= 0.2\text{M}$; $[\text{Fe}^{2+}] =4\text{mM}$ y $\text{pH}=3$ (25% ácido sulfúrico), 0.25% adición de antiespumante y agitación, lograron eliminar alrededor del 90% de DQO y DBO_5 , y reducciones significativas de otros parámetros, como la concentración de tensoactivos y el color, confirmando que el proceso fenton es un excelente candidato a mejorar el tratamiento convencional de lixiviados a escala preindustrial.

Mahtab et al. (2020), encontraron que las mayores eficiencias de tratamiento se dieron a pH ácido de 3.1, alcanzando una eficiencia del 61%, así mismo se demostró que un incremento de oxidante no significa necesariamente alcanzar una mayor remoción de DQO, lo que también demuestra que existe un punto óptimo de máxima eficiencia, muy independientemente de la alta concentración del oxidante. La relación $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$, muestran una influencia significativa en la remoción de la DQO (Amiri & Sabour, 2014), donde se aprecia también que la relación DBO_5/DQO aumenta, lo que indica un incremento en la biodegradabilidad, alcanzando eficiencias del 69% de la DQO.

Méndez et al. (2019), publicaron un artículo donde plasmaron resultados de remociones de DQO de 99.9%, donde el 90.8% se logró con el proceso fenton-filtración y el 9.1% se eliminó por adsorción. El 95.7% del color se eliminó en la etapa de fenton-filtración

y el 4.3% por adsorción. Si bien las remociones de DQO, DBO₅, color y SST del proceso de adsorción fueron menores que las del proceso fenton-filtración, la reducción adicional permite que el efluente alcance los valores requeridos para cumplir con las normas mexicanas vigentes.

Costa et al. (2015), mostraron buenas eficiencias de tratamiento en la aplicación de los métodos fenton-oscuro y foto-fenton, sin embargo, desde un punto de vista comparativo, el método foto-fenton tuvo mayor eficiencia en la degradación de la DQO (entre 88 y 78%) y la toxicidad, observando la importancia de los rayos UV solares para degradar materia orgánica recalcitrante y tóxica.

Méndez et al. (2010), cuantificaron que las mejores relaciones $[\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2]$ y $[\text{DQO}/\text{H}_2\text{O}_2]$ fueron de 0.6 y 9 respectivamente, la eficiencia máxima de reducción luego del proceso de adsorción fue de 98.9% para la DQO y 100% para el color, alcanzando un índice de biodegradabilidad final de 0.24 después del tratamiento fenton-adsorción.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Vásquez et al. (2022), concluyen que el método fenton con aplicación directa puede alcanzar eficiencias entre el 42 al 85%, mientras que el método combinado alcanza un rango del 65 al 99.88%; asimismo, mediante esta revisión se aprecia que existe escasa investigación en el uso de tecnologías de oxidación avanzada para el tratamiento de lixiviados y es aún más limitado el uso del proceso foto-fenton.

Yaranga (2021), determinó las eficiencias de los procesos fenton y foto-fenton para lixiviados del botadero El Porvenir en Huancayo, obteniendo una eficiencia en la reducción de DQO de 53.66% para el tratamiento fenton y 90.68% para el tratamiento foto-fenton, pero con residuales altos de contaminación.

Barrantes (2020), obtuvo bajo las condiciones $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$ de 6, donde 20 minutos de reacción fueron suficientes para remover 73.29 % de DQO y en 1 hora de reacción se hicieron efectivas las remociones de 89 y 76.35 % para el color y la turbiedad, respectivamente, concluyendo que los procesos de oxidación avanzada y en particular el proceso fenton, representa una tecnología atractiva y prometedora en el tratamiento de lixiviados.

Rosales (2017), logró la reducción de parámetros importantes como la turbidez, color y DQO, por encima del 96% con una dosis óptima de 12.17 mL/L de H₂O₂ al 30% y 200 mg/L de Fe²⁺ en aguas residuales de la industria textil. Asimismo, Salas y Ale (2008), utilizaron el proceso fenton para el tratamiento de aguas residuales de una refinería de petróleo, y para efluentes procedentes de la industria textil (Salas, 2010; Gamarra & La Rosa, 2014), obteniendo resultados satisfactorios.

Medina et al. (2016), optimizaron el proceso fenton en el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario Aguas de las Vírgenes de Huancayo, los parámetros evaluados fueron: DBO₅, DQO, alcalinidad, dureza, pH, conductividad, sólidos totales, turbidez, Pb y Cd; el indicador de biodegradabilidad obtenido fue 0.568 y 0.329 en época de lluvia y estiaje, respectivamente, con una eliminación cercana al 42% de la DQO en ambas épocas de estudio, concluyendo que el proceso fenton es una alternativa eficaz para tratamiento de sustancias persistentes en lixiviados y puede ser aplicado como postratamiento.

2.1.3. Antecedentes locales

Medrano (2017), con el objetivo de demostrar que el tratamiento de lixiviados por el proceso de coagulación y floculación evitará la contaminación del medio ambiente, concluye que la técnica de precipitación alcalina para la eliminación del hierro del lixiviado originado por los residuos sólidos de la ciudad de Puno, utilizando como coagulante el sulfato de aluminio y como floculante el Ca(OH)₂ ha dado buenos resultados en la reducción de 94.81% de hierro.

Astorga (2018), de manera similar investigó el tratamiento de lixiviados del botadero de residuos sólidos de la ciudad de Puno con surfactantes aniónicos, utilizando como coagulante el Al₂(SO₄)₃ y como floculante el dodecil benceno sulfato de sodio, concluye que los factores óptimos para la recuperación de Fe en un 95.34% son pH de 11.5, con un tiempo de coagulación de 12.5 minutos y una velocidad de agitación de 25 rpm, aduciendo que el pH es la variable más importante en el proceso de recuperación de hierro.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Residuos sólidos

Tchobanoglous (1997), define a los residuos sólidos como los restos de las actividades humanas, considerados por sus generadores como inútiles, indeseables o desechables; se presentan en estado sólido, semisólido o semilíquido, es decir, con un contenido líquido insuficiente para que este material pueda fluir libremente. Por su parte, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los EEUU, menciona que un residuo sólido, es toda sustancia u objeto que, una vez generado por la actividad humana, no se considera útil o se tiene la intención u obligación de deshacerse de él. Y según la legislación peruana, se entiende por residuo sólido a cualquier objeto, material, sustancia o elemento resultante del consumo o uso de un bien o servicio, del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención u obligación de desprenderse, para ser manejados priorizando la valorización de los residuos y en último caso, su disposición final (DL N.º1278, 2016).

a) Composición de los residuos sólidos de la ciudad de Juliaca, San Román

Es importante tener como dato el parámetro físico de composición de los residuos sólidos, debido a que la calidad de los lixiviados que se generen en la infraestructura de disposición final dependerá de ello, debido a que en una reacción química la suma de la masa de los reactivos es igual a la suma de la masa de los productos, y los lixiviados son producto del lavado de estos restos sólidos. Según el Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos (PIGARS), de la Municipalidad provincial de San Román del año 2016, los residuos sólidos que se generan en esta ciudad tienen una composición que se muestra en las tablas 1, 2 y 3 (MPSR, 2016).

De los residuos producidos en la ciudad de Juliaca, la mayor fracción son del tipo orgánico, como se muestra en la tabla 2, el 48.08% de los residuos sólidos municipales generados son orgánicos, estos son de especial importancia ya que son responsables de la generación de lixiviados por el contenido de humedad que representan (tabla 3), los que se caracterizan por ser altamente contaminantes. Adicionalmente están relacionados con la generación de algunos gases de efecto invernadero como el metano (Sandoval, 2009).

Tabla 1

Composición general de residuos sólidos municipales del distrito de Juliaca

Composición	Porcentaje %
Materia orgánica	41.13
Madera, follaje	0.95
Papel	6.05
Cartón	6.06
Vidrio	1.94
Plástico PET	2.48
Plástico duro	1.59
Bolsas	5.66
Tetra-pack	0.57
Tecnopor y similares	1.96
Metales	0.99
Telas, textiles	1.95
Caucho, cuero, jebe	0.67
Pilas	0.06
Restos de medicinas, focos, etc.	0.04
Residuos sanitarios	10.73
Residuos inertes	11.61
Otros	4.08
Envolturas de golosinas	1.45
Residuos de aparatos electrónicos	0.03
Total	100.00

Fuente: PIGARS MPSR - Juliaca (2016, p. 60)

Tabla 2

Características físicas de residuos sólidos municipales del distrito de Juliaca

Composición	Porcentaje %
Orgánico	42.08
Inorgánico	29.92
No aprovechable	28.00
Total	100.00

Fuente: PIGARS (2016)

Tabla 3

Contenido de humedad de los residuos sólidos municipales del distrito de Juliaca

Parámetro	Valor
Humedad	65%

Fuente: PIGARS MPSR - Juliaca (2016, p. 34)

2.2.2. Infraestructuras de disposición final de RRSS

En el marco del decreto legislativo N.º 1278, el artículo 108 considera como infraestructuras de disposición final de residuos sólidos: los rellenos sanitarios, los rellenos de seguridad y las escombreras.

a) Relleno sanitario: Astorga (2018), menciona que un relleno sanitario es una infraestructura de disposición final de residuos sólidos municipales que está diseñado, construido y operado para minimizar molestias y riesgos para la salud y seguridad de los habitantes, así como daños al ambiente, donde los residuos son compactados para reducir su volumen para luego ser cubiertos. Estos rellenos se clasifican en:

- Relleno sanitario manual, cuya capacidad de operación diaria no excede las seis (06) toneladas métricas (TM);
- Relleno sanitario semi-mecanizado, cuya capacidad de operación diaria es más de seis (06) hasta cincuenta (50) TM; y
- Relleno sanitario mecanizado, cuya capacidad de operación diaria es mayor a cincuenta (50) TM.

Las celdas transitorias en cambio, son instalaciones para la disposición final de residuos sólidos, con un tiempo de vida útil de tres años hasta contar con un relleno sanitario, y cumplen con todos los estándares ambientales internacionales para no contaminar el aire, el suelo ni el agua (DL N.º1278, 2016).

b) Relleno de seguridad: Los rellenos de seguridad son infraestructuras donde se realiza la disposición final de residuos no municipales peligrosos (DL N.º1278, 2016).

c) Escombrera: Para el caso de los residuos sólidos no peligrosos provenientes de las actividades de la construcción y demolición, la infraestructura de disposición final se denomina escombrera (DL N.º1278, 2016).

2.2.3. Lixiviados de residuos sólidos

Los lixiviados son el líquido resultado de la percolación de la precipitación, la escorrentía incontrolada y el agua de riego de los rellenos sanitarios, además de la contenida propiamente en los residuos (Tchobanoglous y Kreith, 2002). La calidad y cantidad del lixiviado están en función de las características geológicas de la ubicación

del botadero, las condiciones meteorológicas, la superficie del lugar de disposición y el suelo subyacente, los procedimientos de operación y los tratamientos a los que se someten a los residuos (Pérez, 2017).

Si el relleno sanitario no tiene sistema de recogida de lixiviados, éstos pueden alcanzar las aguas subterráneas y causar, como resultado, problemas medioambientales o de salud; típicamente, el lixiviado es tóxico, ácido, rico en ácidos orgánicos, iones sulfato y con altas concentraciones de iones metálicos comunes, especialmente hierro; tiene un olor bien característico, difícil de ser confundido y olvidado (Tchobanoglous, 1997). Además, se debe tener en cuenta que un vertedero puede continuar produciendo lixiviado hasta 50 años después de su clausura y cese de las actividades (Kurniawan et al., 2005).

a) Clasificación y caracterización de los lixiviados: Los lixiviados tienen un alto contenido de carbono orgánico total (COT) y demanda química de oxígeno (DQO), por lo que contienen cantidades significativas de materia orgánica, sustancias inorgánicas como metales pesados, alta variabilidad de pH, alto contenido de sólidos totales y disueltos, presencia de nitrógeno en forma de N-NH_3 , alta concentración de cloruros, entre otros que se muestran en la tabla 4 (Tchobanoglous, 1997). Esta composición depende de la naturaleza del residuo (pH, edad, temperatura, tipo de material de cobertura) y del estado de estabilización en que se encuentre. (Borzacconi et al. 1996; El-Fadel et al. 2002).

En la literatura se ha demostrado que las concentraciones de contaminantes en los lixiviados varían con el tiempo. En general, se puede decir que los lixiviados de vertederos jóvenes tienen un alto contenido de materia orgánica y el índice de biodegradación (DBO_5/DQO) es superior a 0.4, por lo que pueden ser tratados de forma eficaz mediante procesos biológicos (aerobios o anaerobios); pero en lixiviados de vertederos antiguos, con índices de biodegradación inferiores a 0.2, estos métodos de tratamiento son poco eficientes (Robles, 2005). Según Astorga (2018), los lixiviados de un relleno sanitario se clasifican en función a su edad en lixiviados Tipo I (jóvenes), II (intermedio) y III lixiviados viejos, las características de cada una de estas clasificaciones se muestran en la tabla 5.

Tabla 4

Caracterización físico-química de los lixiviados

Lixiviado bruto					
Parámetro	Mayo	Julio	Noviembre	Enero	Mayo
Parámetros Generales					
pH	7.98	8.35	7.49	7.96	7.99
Conductividad (mS/cm)	9.11	12.77	10.43	19.53	13.13
Sólidos totales en SS (mg/L)	790	317	366	166	170
Parámetros de contenido orgánico					
COT (mg/L)	1921	2782	1658	1010	630
DQO (mg/L)	3090	4434	3947	3659	2232
DBO ₅ (mg/L)	420	640	1500	1000	600
DBO ₅ /DQO	0.14	0.14	0.38	0.27	0.27
Iones Inorgánicos					
Fluoruros(mg/L)	1.6	16	31	< Id	0
Cloruros(mg/L)	1836	3235	1114	2124	1207
Nitritos(mg/L)	0	0	0	0	0
Nitratos(mg/L)	0	0	0	< Id	5
Fosfatos(mg/L)	0	55	0	28	16
Sulfatos(mg/L)	19	39	0	438	184
Amonio(mg/L)	-	2350	900	1773	1045
Metales(mg/L)					
Cromo Total	0.3	0.6	-	0.4	-
Plomo	< Id	< Id	-	< Id	-
Níquel	0.1	0.2	-	0.1	-
Estaño	1.1	< Id	-	< Id	-
Hierro	0.4	4.6	-	1.8	-
Sodio	1405	2402	-	1640	-
Potasio	818	1476	-	1005	-
Magnesio	99	88	-	68	-
Calcio	167	108	-	149	-
Manganeso	1.9	1.2	-	1.2	-
Silicio	12	12	-	-	-
Zinc	0.05	0.15	-	0.08	-

Fuente: Tchobanoglous (1997)

(Id = límite de detección)

Tabla 5
Clasificación y caracterización de los lixiviados

Tipo de lixiviado	Joven	Intermedio	Viejo
Edad (años)	<5	5 – 10	>10
pH	<6.5	6.5 – 7.5	>7.5
DBO ₅ /DQO	>0.5	0.1 – 0.5	<0.1
DQO	>15000	5000 – 15000	<5000
N-NH ₃	<400	-	>400
Metales Pesados	>2	<2	<2

Fuente: Astorga (2018)

A medida que aumenta la edad del relleno sanitario, baja la fracción orgánica biodegradable en el lixiviado, lo que resulta en una relación DBO₅/DQO muy baja debido a que los ácidos grasos y otras sustancias biodegradables se convierten muy fácilmente en metano en el relleno sanitario (Lau et al. 2001). La mayoría de los compuestos orgánicos en estas infraestructuras son compuestos refractarios y, por lo tanto, los procesos biológicos para el tratamiento de sus lixiviados tienen una efectividad muy limitada. Su naturaleza refractaria implica la necesidad de utilizar métodos alternativos a los procesos biológicos para reducir la carga contaminante de estos fluidos (Yoo et al. 2001).

b) Composición de los lixiviados

Los lixiviados en el relleno sanitario arrastran a su paso material disuelto, en suspensión, fijo o volátil, lo que provoca que tenga elevadas cargas orgánicas y un color que varía desde café – pardo- grisáceo cuando están frescos hasta un color negro viscoso cuando envejecen, estos fluidos poseen elevadas concentraciones de sales inorgánicas (cloruro de sodio y carbonatos) y de metales pesados. Estudios indican que el carbono orgánico en forma coloidal tiene el potencial de adsorber altas concentraciones de metales en su superficie, por lo que actúan como transporte de metales traza en los lixiviados (Corena, 2008).

Tabla 6
Contaminantes más comunes en los lixiviados

Grupo de contaminantes	Componentes que los constituyen
Materia orgánica	Ácidos, alcoholes, aldehídos, y otros usualmente cuantificados como DQO, demanda de DBO ₅ , o carbono orgánico total. Se incluyen igualmente ácidos grasos y otros como ácidos húmicos y fúlvicos.
Materia inorgánica	Sulfatos, cloruros, amonio, calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonato, hierro, manganeso y metales pesados como plomo, níquel, cobre, cadmio, cromo y zinc.
Compuestos orgánicos (xenobióticos)	Hidrocarburos aromáticos, fenoles, hidrocarburos alifáticos clorados, pesticidas y plastificantes como bifenilos policlorados, dioxinas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, entre otros.

Fuente: Jerez (2013)

- c) **Efectos de los lixiviados a la salud:** Los efectos y riesgos potenciales de causar daños a la salud debido a la composición de los contaminantes presentes en los lixiviados de residuos sólidos son los que se muestran en la tabla 7 (Corena, 2008).

Tabla 7
Efectos en la salud causados por los lixiviados

Metal	Efecto Negativo
Arsénico	Sistema cardiovascular, sistema respiratorio, nervioso periférico, reproductivo, daños en el hígado, riñón, cancerígeno potencialmente teratógeno.
Cadmio	Sistema nervioso central, reproductivo y respiratorio, riñón, probable cancerígeno, teratogénico; embriológico.
Cromo	Sistema respiratorio, alergias, irritación en la vista, cancerígeno, probable muta génico
Plomo	Sistema nervioso central y reproductivo, en células de la sangre probable teratogénico.
Mercurio	Sistema nervioso central, cardiovascular y respiratorio, riñón y ojos, teratogénico.
Níquel	Sistema respiratorio, alergias, irritación de ojos, piel, hígado, riñón, probables cancerígeno y teratogénico

Fuente: Corena (2008)

d) Impacto de los lixiviados en el ambiente: Los lixiviados de rellenos sanitarios pueden ocasionar diversas afectaciones en el ambiente, estas afectaciones se pueden dar desde la generación de los mismos y en manejo de ellos (control y tratamiento); se estima que un relleno sanitario puede generar hasta 0.2m^3 de lixiviados por tonelada de RSU depositados; aun cuando los sitios son cerrados estos pueden seguir produciendo lixiviados hasta por 50 años más (Kurniawan et al., 2010), reportando la generación de lixiviados en diversos sitios de disposición final, cantidades que varían en función del tamaño del sitio, así como a la estacionalidad (Nawaz et al., 2020).

León et al. (2015), han reportado la contaminación de aguas superficiales y subterráneas aledañas al relleno sanitario de Linares, Nuevo León, en pozos aledaños al sitio se encontró alto contenido de nitrato (NO_3), Pb, Mn y Fe cuyos valores exceden la normativa mexicana y son potencialmente peligrosas para la salud humana, además el pH registrado fue de 6.8 que de ser desplazado a condiciones ácidas puede dar lugar al plomo disuelto (Pb^{2+}) el cuál es más tóxico en el ambiente. Asimismo, se ha visto que suelos que son expuestos a lixiviados durante un periodo de tiempo prolongado sufren cambios en su estructura, reportando la degradación del comportamiento geotécnico de los suelos, así como cambios en las propiedades físicas, químicas, estructurales, hidromecánicas y mineralógicas (Quintero et al., 2017).

e) Parámetros a monitorear en los lixiviados: Los principales parámetros que deben ser monitoreados en los lixiviados provenientes de la descomposición de los residuos sólidos dispuestos en un relleno sanitario son: la DQO, la DBO_5 , el pH, la conductividad eléctrica, los sólidos totales, los metales pesados y el nitrógeno total (Chavez, 2011).

DQO: Permite conocer la cantidad de sustrato orgánico capaz de ser oxidado de manera química con una solución de ácido sulfúrico. Las variaciones en los valores de DQO en diversas muestras de lixiviados se pueden presentar debido a la estructura del relleno sanitario, la composición de los residuos sólidos, las

características geomorfológicas del lugar y los tiempos de maduración de los residuos sólidos (Qarani et al., 2010).

DBO₅: Es uno de los parámetros más importantes que se analizan en las muestras de aguas residuales y superficiales con la finalidad de conocer la contaminación de las mismas, se desarrolla en un periodo de 5 días a una temperatura de 20 °C, determinándose la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos presentes en la fracción orgánica de una muestra de agua (IDEAM, 2007).

pH: Los valores de acidez o alcalinidad en un lixiviado suelen cambiar en base al tiempo de maduración del mismo; por esta razón en la etapa ácida los valores pH se reducen hasta en cinco veces hasta más por la acción de los ácidos orgánicos y a su vez aumentan hasta más o menos en ocho veces en la etapa de maduración (Tchobanoglous, 2006). Los lixiviados de rellenos sanitarios jóvenes debido a la etapa acidogénica poseen gran cantidad de ácidos grasos volátiles, y los lixiviados viejos o maduros todo lo contrario por la etapa metanogénica (Renou, 2008).

Conductividad eléctrica: Es un parámetro medible en los diversos tipos de aguas, el mismo que está vinculado en la cantidad de sales presentes en una solución, las cuales están distribuidas en iones positivos y negativos que permiten conducir energía eléctrica; es así que las fracciones inorgánicas son buenas conductoras de energía en comparación con las fracciones orgánicas, utilizando para su lectura un conductímetro con un rango de 10 hasta 50000 $\mu\text{mho/cm}$ (IDEAM, 2006).

Sólidos totales: Están conformados por sólidos disueltos y sólidos suspendidos, evidenciando alteraciones negativas en la calidad de una fuente de agua; este parámetro permite mantener un control de la eficiencia en las plantas de tratamiento y su presencia depende de diversos factores como los vertimientos, los terrenos que recorre, la presencia de residuos, el arrastre de partículas por los vientos, la intensidad y frecuencia de lluvias, entre otras (IDEAM, 2007).

Metales pesados: Dentro de los cuales se encuentran el talio, cromo, arsénico, mercurio, plomo, níquel, zinc y cadmio; es muy fácil que estos elementos se

introduzcan al agua debido a que se pueden encontrar de manera natural en los horizontes del suelo y su determinación se realiza en laboratorio mediante el método espectrofotométrico de absorción atómica (IDEAM, 2004).

Nitrógeno total: Una carga alta de nitrógeno en una muestra de agua hace referencia a un proceso de contaminación que ha ocurrido hace poco tiempo y que puede ser muy tóxico; para su análisis en laboratorio se determina la cantidad de nitrógeno orgánico y amoniacal, en base a la materia orgánica presente en la muestra líquida, este proceso se lleva a cabo mediante la adición de reactivos químicos con el objetivo de promover la formación de amonio, método conocido como nitrógeno Kjeldahl (IDEAM, 2004). La cantidad de nitrógeno presente en los lixiviados de rellenos sanitarios varían en función del tiempo de maduración de dicho líquido, pues, en los rellenos sanitarios jóvenes ocurre el proceso de degradación de compuestos orgánicos y disminución de aminas en los aminoácidos (Ziyang, 2009).

2.2.4. Materia orgánica

La materia orgánica consiste en millares de componentes, como partículas macroscópicas, coloides o macromoléculas disueltas que pueden causar color, olor, sabor, el desarrollo de microorganismos patógenos o implicar la presencia de materia no biodegradable (USEPA, 2004). La concentración de materia orgánica en el agua se determina directamente con la medida del carbono orgánico total (COT) e, indirectamente, midiendo la capacidad reductora del carbono existente con la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) (Fuentes et al., 2015).

2.2.5. Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno (DQO), es el oxígeno equivalente a los materiales orgánicos en la muestra de agua que pueden ser oxidados químicamente mediante una solución de dicromato, como oxidante más común (solución digestora) en medio ácido junto con un catalizador e inhibidores de interferencias (Metclaf & Eddy, 2004). Mientras que APHA, AWWA y MEF definen a la DQO de forma más general, como la medición del oxígeno equivalente al contenido de materia orgánica de una muestra que

es susceptible a la oxidación química por un oxidante químico fuerte que no necesariamente puede ser el dicromato (APHA, 1985).

La DQO es otro parámetro al igual que la DBO_5 por medio del cual podemos conocer la carga orgánica de un efluente ya sea doméstico o industrial. Esta prueba permite medir la cantidad total de oxígeno que es necesario para pasar de un residuo a dióxido de carbono y agua, y está basada en el hecho de que todos los residuos orgánicos, con algunas excepciones, pueden oxidarse con fuertes agentes oxidantes bajo condiciones ácidas, la importancia de esta prueba radica en el hecho de que se obtienen datos con mucha más rapidez que con la prueba de DBO_5 , y mediante el factor adecuado se puede pasar de un valor a otro, es utilizada como un parámetro global para indicar el contenido en materia orgánica de un agua (Dianderas, 2011).

A) Métodos de determinación de la DQO

- Método colorimétrico

De entre los métodos estandarizados para determinar la DQO está el método colorimétrico con reflujo cerrado, es bastante usado y su importancia va en aumento, esto debido a que solo se requiere de un espectrofotómetro visible y los volúmenes de muestra y de reactivos son mucho menores que en el caso del reflujo abierto generando menor cantidad de residuos peligrosos, con toxicidad ambiental por las especies de cromo, mercurio y dicromato, la diferencia en los volúmenes es de 7.5 a 150 mL en comparación al reflujo abierto. (Hanna Instruments, 2022).

- Método titulométrico

El método titulométrico se puede utilizar en muestras con alta turbidez y color residual después de la digestión con dicromato, pero tiene las desventajas del consumo y preparación de titulante e indicador, el uso de material de vidrio adicional y la falta de estandarización del punto final de titulación, ya que cada analista puede tener una percepción diferente del punto de cambio de color, lo que determina el final de la titulación (Hanna Instruments, 2022).

2.2.6. Biodegradabilidad de las aguas residuales

En muchos trabajos, la relación entre la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno (DBO₅/DQO) se emplea como parámetro indicador de la mejora de la biodegradabilidad. Esta relación indica que fracción de la materia orgánica total presente en el agua residual es susceptible de ser descompuesta biológicamente. Por lo tanto, el parámetro DBO₅/DQO se puede utilizar como estimación del grado de biodegradabilidad de un agua residual (Oppenlander, 2003).

Tabla 8
Índice de biodegradabilidad del agua residual

Relación DBO₅/DQO	Índice de biodegradabilidad del H₂O
< 0.2	No biodegradable
0.2 – 0.4	Biodegradable
>0.4	Muy biodegradable

Fuente: Remtavares (2012)

La DBO₅ y DQO son dos parámetros globales relacionados con el contenido en materia orgánica, bien definidos y con métodos de análisis estandarizados que no requieren complicados sistemas.

La figura 1 muestra un esquema de estrategia de tratamiento de agua residual considerando su biodegradabilidad, este da a entender que si el agua contiene toxicidad y baja biodegradabilidad se necesita utilizar un pretratamiento químico, por ejemplo, foto-fenton, antes de proponer un tratamiento biológico.

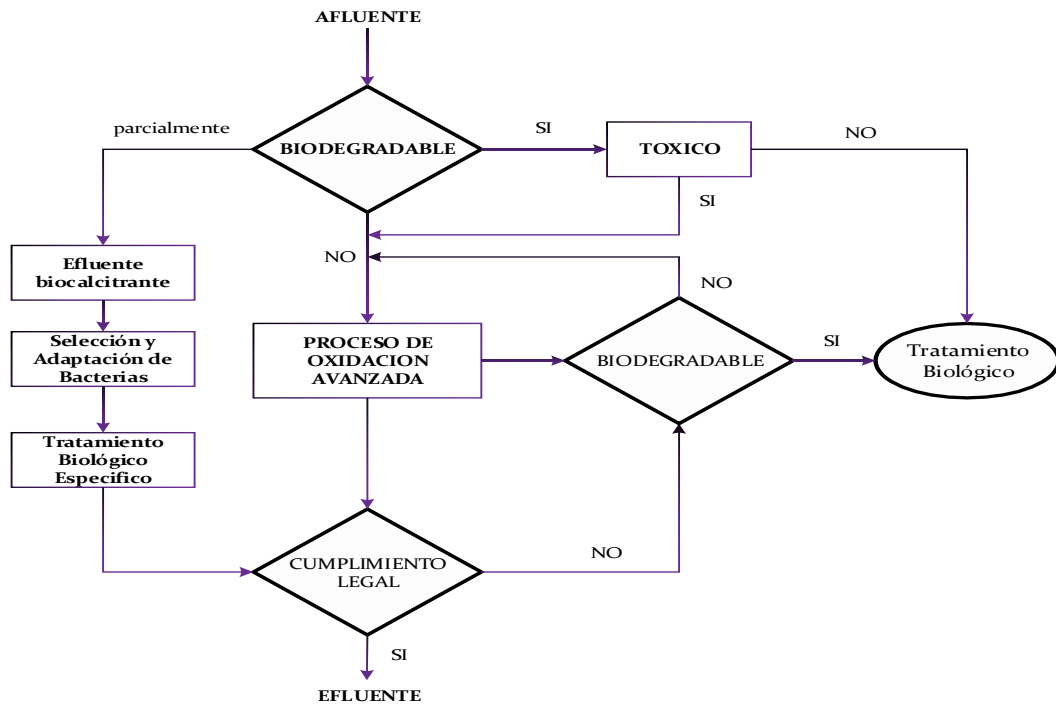


Figura 1. Diagrama de tratamiento de aguas en función a la biodegradabilidad y POAs

Fuente: Sarria et al. (2002)

2.2.7. Procesos de oxidación avanzada - POA

Los procesos de oxidación avanzada (POA) pueden definirse como procesos que implican la formación de radicales hidroxilos (OH^\cdot) de potencial de oxidación ($E=2.8\text{V}$) mucho más que el de otros oxidantes tradicionales como el ozono, peróxido de hidrogeno, dióxido de cloro y cloro. Los POA son aplicados en el tratamiento de aguas residuales de baja biodegradabilidad que contienen compuestos recalcitrantes difíciles de remover por tratamientos convencionales, alcanzando la mineralización completa hasta obtener productos como CO_2 y H_2O (Bes et al., 2016).

Estos procesos (POA) se basan en la generación in situ de especies químicas con un alto poder de oxidación como los radicales hidroxilos (OH^\cdot), oxidante químico de carácter no selectivo y con un elevado potencial de oxidación capaz de reaccionar rápidamente con muchos compuestos orgánicos de constantes cinéticas del orden de $10^6 - 10^9 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ (Legrini et al., 1993).

Tabla 9
 Potenciales de oxidación de algunos oxidantes a 25°C

Oxidante	E° (V)
Fluoruro (F)	3.03
Radical hidroxilo (OH ⁻)	2.8
Oxígeno atómico (O ₂)	2.42
Ozono (O ₃)	2.07
Peróxido de hidrogeno (H ₂ O ₂)	1.77
Permanganato potásico (KMnO ₄)	1.67
Ácido hipobromoso (HBrO)	1.59
Dióxido de cloro (ClO ₂)	1.5
Acido hipocloroso (HClO)	1.49
Cloro (Cl ₂)	1.36
Bromo (Br ₂)	1.09

Fuente: Legrini et al. (1993)

En estas tecnologías de oxidación avanzada, el peróxido de hidrógeno es un reactivo químico seguro, abundante y de sencillo manejo, ampliamente usado para la prevención de la contaminación. Sin embargo, por sí mismo no posee unas buenas propiedades oxidantes, sino que debe ser combinado con otras sustancias o catalizadores para incrementar su eficacia.

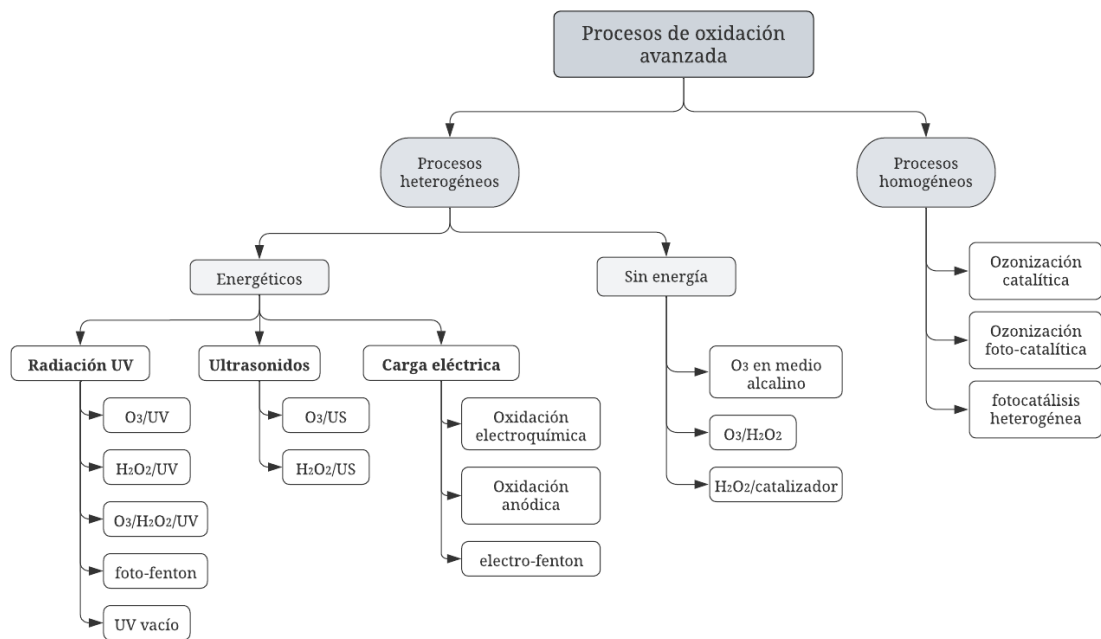


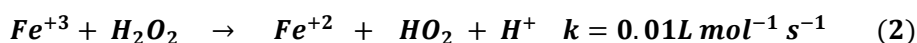
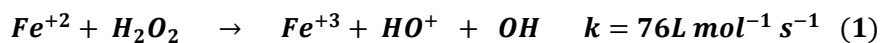
Figura 2. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada a presiones y temperaturas ambientales

Fuente: Sharma et al. (2011)

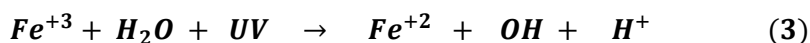
Cerda (2007), menciona que las tecnologías o procesos de oxidación avanzada (POA) han tenido gran relevancia en el tratamiento de un centenar de contaminantes presentes en el agua, capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. En este grupo de POAs se encuentran el proceso fenton y todas sus variaciones (fenton-like, foto-fenton, electro-fenton) y el proceso UV/H₂O₂. Esta investigación está enfocada en el estudio de POAs basados en el uso de H₂O₂/Fe²⁺ como la combinación UV/H₂O₂/Fe³⁺, el proceso fenton y el proceso foto-fenton respectivamente.

A) Proceso fenton y foto-fenton: El reactivo fenton, una mezcla de peróxido de hidrógeno y una sal de hierro (II), fue descubierto por Henry J.H. Fenton a finales del siglo XIX (Fenton, 1894). En cualquiera de sus varias formas, este sistema está siendo cada vez más usado en el tratamiento de aguas y suelos contaminados (Wadley & Waile, 2004).

Estos dos sistemas se diferencian en que el proceso fenton (H₂O₂/Fe²⁺) tiene lugar en ausencia de luz ultravioleta, mientras que el llamado proceso foto-fenton (UV/H₂O₂/Fe²⁺) se basa en la adición de radiación al reactivo fenton. Las ecuaciones de estos procesos son los siguientes:



Estas reacciones permiten la regeneración del Fe²⁺, que puede volver a tomar parte en la reacción para generar nuevos radicales hidroxilos. Sin embargo, estas últimas reacciones ocurren a una velocidad bastante más lenta, disminuyendo progresivamente la cantidad de Fe²⁺ disponible en el medio.



En cambio, en presencia de radiación ultravioleta, se observa un aumento de la velocidad de oxidación de los compuestos orgánicos mediante el proceso fenton. Bajo estas condiciones, la fotólisis de los complejos de Fe³⁺ permite una mayor regeneración del Fe²⁺, además, se genera otra vía para la formación de radicales hidroxilos a partir de la fotólisis del peróxido de hidrógeno; estas reacciones tienen lugar desde longitudes de onda correspondientes a la región UV-A del espectro hasta la región visible (300 – 580 nm), por lo tanto, este proceso podría

ser llevado a cabo bajo radiación solar permitiendo una reducción del coste (Wadley & Waile, 2004).

El proceso tipo fenton es un buen oxidante, puede decolorar agua residual con distintos tipos de colorantes y otros residuos industriales, reduciendo su DQO, además es útil como pretratamiento de compuestos no biodegradables resaltando además que el proceso fenton representa un costo-beneficio socio ambiental alto para el tratamiento de lixiviados (León et al., 2020).

B) Parámetros que influyen en los POA: Las condiciones de operación en que el proceso se lleva a cabo, así como la composición del agua residual afectan sustancialmente a la eficacia y velocidad del proceso de oxidación (Wadley & Waile, 2004). Los principales parámetros que influyen en el proceso son:

- i. pH:** El sistema fenton depende del pH del medio de reacción. La velocidad de las reacciones tiende a ser máxima en un pH cercano a 3. A pH altos, la velocidad disminuye debido a la precipitación de hierro en forma de $\text{Fe}(\text{OH})^{3+}$. La formación de complejos de hierro se inicia para $\text{pH} > 4$. A pH excesivamente bajos ($\text{pH} < 2$), se produce la formación de $\text{Fe}(\text{OOH})^{2+}$ que reacciona muy lentamente con el H_2O_2 obstaculizando la generación de OH^\cdot (Wadley & Waile, 2004).
- ii. Relación $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$:** La dosis de H_2O_2 influye fundamentalmente sobre la eficacia del proceso mientras la concentración de hierro afecta a la cinética. Sin embargo, un exceso tanto de hierro como de peróxido da lugar a una disminución de la eficacia debido a la activación de reacciones secundarias no deseadas. Cada caso depende de la naturaleza y la composición de las aguas a tratar, así como del grado de oxidación que se desea alcanzar (Wadley & Waile, 2004).
- iii. Temperatura:** El aumento de la temperatura supone por lo general un incremento en la velocidad de las reacciones de oxidación (Wadley & Waile, 2004).

iv. Concentración de aniones inorgánicos: Ciertos aniones inorgánicos actúan como inhibidores de la acción de los radicales OH^- o forman especies no reactivas con el hierro. Algunos estudios han mencionado la disminución de la velocidad del proceso debido a la presencia en altas concentraciones de sulfatos, cloruros, nitratos, percloratos o hidrogeno fosfatos (García, 2007).

C) POAs foto-fenton como “green processes”: Muñoz (2006), menciona que los procesos de oxidación avanzada (POAs) han sido considerados como procesos de tratamiento a fines a los principios de la química sostenible, es decir, respetuosos con el medio ambiente. Algunas de las razones para sostener esta afirmación son:

- Muchos POAs no generan subproductos, ni residuos ya que son procesos destructivos capaces de alcanzar la mineralización completa.
- Emplean reactivos químicos inocuos.
- Admiten el empleo de fuentes de energía renovable como la radiación solar.

Propiedades que se encuentran reflejadas en los 12 principios básicos de los “procesos verdes”, además de presentar las siguientes ventajas y desventajas que debemos de considerar.

Tabla 10
Ventajas y desventajas del proceso fenton

Ventajas	Desventajas
a) El Fe (II) es abundante y no tóxico.	a) Un exceso de Fe (II) puede causar condiciones para el atrapamiento de OH^- .
b) El peróxido de hidrógeno es fácil de manejar y ambientalmente benigno.	b) Si no se controla adecuadamente el pH y se trabaja a valores >5 se genera Fe (III) particulado, por ende, se forma lodo residual que debe ser gestionado.
c) No se forman compuestos clorados como en otras técnicas oxidantes.	c) En el laboratorio, el agregado del metal se realiza en forma de sales ferrosas, pero en escalas mayores el uso de éstas se vuelve costosa.
d) No existen limitaciones de transferencia de masa por tratarse de un sistema homogéneo.	

Fuente: Cerda (2007)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. **Ámbito de estudio**

El estudio se realizó con muestras de los lixiviados de la celda transitoria de residuos sólidos de la localidad de Huanuyo de la ciudad de Juliaca – región Puno a 3997 m.s.n.m. que cuenta con un área de 34 Has. Esta infraestructura de disposición final de residuos sólidos municipales está comprendida en la siguiente ubicación geográfica (tabla 11):



Figura 3. Ubicación y estado de las celdas transitorias y poza de lixiviados de Huanuyo.

Tabla 11

Ubicación de la poza de lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo

Código	Punto de muestreo	Coordenadas WGS84		Altura (msnm)
		Este (x)	Norte (y)	
M-01	Poza de lixiviados	334304	8264262	3997

3.2. **Metodología de la investigación**

3.2.1. **Diseño, tipo y nivel de investigación**

Dado que el objetivo fue determinar la eficiencia de reducción de la materia orgánica de los lixiviados mediante el uso de oxidación avanzada foto-fenton, se aplicó un diseño “**experimental**” el cual se realizó manipulando las variables independientes que nos

llevó a obtener mejores eficiencias en los procesos, tal como se dan en su contexto natural para que posteriormente sean analizados. Se ejecutó en procedimiento hipotético-deductivo ya que mediante las hipótesis que se formularon a partir de la teoría se procedió con la operacionalización de variables (se muestra en el anexo 9), procesamiento de datos e interpretación de resultados.

La investigación, según los niveles de investigación fue “**relacional, multivariado-causal**” ya que predecirá el valor aproximado de un grupo de fenómenos de una variable a partir del valor que tienen en las variables relacionadas. Según la intervención del investigador fue “**experimental**” debido a que posee una veracidad significativa en la orientación de una investigación, permitiendo el control y la manipulación de variables que posibiliten conocer los efectos y el grado de influencia entre ellas. Según la planificación de las mediciones fue “**prospectivo**” porque se registrará la información con las mediciones planificadas según van ocurriendo los hechos o fenómenos y los datos recolectados serán primarios. Según el número de mediciones de la variable de estudio fue “**longitudinal**” es decir, con más de una medición de las variables. Según el número de variables analizadas fue “**analítico**” por contar con más de una variable.

3.2.2. Enfoque de investigación

Teniendo en cuenta que se busca comprobar la hipótesis, así como los objetivos trazados, el presente trabajo fue diseñado bajo el planteamiento metodológico del **enfoque cuantitativo**, puesto que se adapta a las características y necesidades de la investigación.

3.3. Hipótesis de la investigación

3.3.1. Hipótesis general

Debido a que el proceso de oxidación avanzada foto-fenton opera bajo parámetros optimizados, es probable que se alcance una eficiencia superior al 80% medible en reducción de materia orgánica en función de la DQO presente en el lixiviado de la celda transitoria de Huanuyo.

3.3.2. Hipótesis específicas

- Las características fisicoquímicas de los lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo, serán de carácter no biodegradable que condicionan su tratamiento mediante procesos químicos de oxidación avanzada foto-fenton.
- Se alcanzará la mayor eficiencia en determinados rangos de observación: relación de concentración $H_2O_2/FeSO_4$ de 3 a 1, pH de 4 y tiempo óptimo de tratamiento de 45 minutos.

3.4. Variables de investigación

3.4.1. Variable independiente

- Concentración fenton - $[H_2O_2/FeSO_4]$.
- Potencial de hidrogeno - pH
- Tiempo de tratamiento - TRH

Se trabajó bajo tres niveles de observación de cada variable independiente para cada proceso de los cuales se obtuvo las mejores combinaciones y su respectiva eficiencia máxima.

3.4.2. Variable dependiente

- Reducción de materia orgánica (en función a la DQO)

La materia orgánica es el principal factor de contaminación en los lixiviados de residuos sólidos, por lo que se pretende disminuir estas concentraciones mediante la foto-oxidación como tratamiento primario y/o previo a un tratamiento biológico, para el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental y un posterior vertimiento en el ambiente sin causar anomalías críticas en su composición.

3.5. Población, muestra, muestreo y unidad de análisis

3.5.1. Población

La investigación consideró como universo principalmente la poza de lixiviados de la celda transitoria de residuos sólidos de Huanuyo, del distrito de Cabanillas, provincia de San Román, departamento Puno.



Figura 4. Poza de lixiviados operativa de la celda transitoria de Huanuyo.

3.5.2. Muestra

La muestra fue recolectada de la poza de lixiviados de la celda transitoria de residuos sólidos de Huanuyo, se tomaron en total 60 litros de muestra; 4 litros para la caracterización en laboratorio acreditado y 56 litros para la fase de las corridas experimentales en laboratorio.

3.5.3. Muestreo

Se utilizó la “propuesta metodológica para el muestreo de lixiviados en rellenos sanitarios operativos” desarrollado por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2021); mediante un muestreo puntual ya que los lixiviados se recolectan hacia un mismo punto que es la poza de lixiviados, toda vez que no existe un protocolo de muestreo para lixiviados en el país.

3.5.4. Unidad muestral

El prototipo de tratamiento foto-fenton está diseñado para una unidad muestral de 1.5 litros mínimamente por cada prueba (corrida) experimental, el diseño utilizado consideró 14 combinaciones, haciendo uso de un total de 21 litros de lixiviado para esta etapa.

3.6. Equipos, materiales y reactivos

3.6.1. Equipos

1 reactor foto-catalítico, el mismo que fue elaborado a base de una lampara UV de 16W, una bomba de pecera de 4W, un vaso de precipitado de 1L, una manguera de ½" (50cm), tubos de abasto de ½" con rosca, abrazaderas de ½" con cintillos (como se muestra en la figura 6). Otros equipos como la balanza analítica, multiparámetros, pH-metros, termodigestor para DQO y un espectrofotómetro UV.

3.6.2. Materiales

Viales para digestión de DQO, fiolas de 100 mL; vasos precitados de 1000 mL, 250mL, 100 mL y 50 mL; probetas de 500 mL, 250 mL y 100 mL; pipetas de 1 mL, 5 mL y 20 mL; propipetas, embudos, papel filtro Whatman N.º 42, goteros, pinzas, espátulas y lunas de reloj.

3.6.3. Reactivos

Peróxido de hidrogeno (H_2O_2) al 50%, sulfato ferroso heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) al 99.9%, ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 99%, hidróxido de sodio (NaOH) 5M, dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) al 99.9%, sulfato de mercurio ($HgSO_4$) al 99.9%, sulfato de plata (Ag_2SO_4) al 99.9%, dióxido de manganeso (MnO_2) al 99.9%, biftalato de Potasio ($C_8H_5KO_4$) al 99.9%.

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se recurrió a la búsqueda bibliográfica para indagar a fondo sobre el tema de investigación mediante herramientas digitales de información científica que permitió darle un enfoque al planteamiento de la investigación, el uso de formatos de campo para registrar los parámetros analizados in-situ, así como contar con procedimientos de muestreo mediante protocolos para muestreos puntuales, informes de laboratorio de análisis y los demás datos recolectados durante cada etapa del proceso de experimentación, los mismos que se anexan al final de este informe.

Las técnicas e instrumentos que se utilizaron en la presente investigación se muestran a detalle en la tabla 12.

Tabla 12

Técnicas e Instrumentos de recolección de datos empleados

Etapa	Fuente	Técnica	Instrumento	Resultado
Planificación	Bibliografía consultada	Observación	Matriz de consistencia	Estado del arte y enfoque de la investigación
Recolección de muestras	Celda transitoria de Huanuyo	Observación	Protocolo de muestreo puntual de aguas residuales	Muestras de lixiviados
Caracterización de los lixiviados	Muestreo y análisis	Observación	Cadena de custodia	Caracterización inicial
Etapa experimental	Análisis de pruebas en laboratorio	Observación	Ficha de análisis de las pruebas realizadas	Eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton
Análisis de los resultados	Resultados de los análisis realizados	Observación	Software de análisis estadístico (Minitab, Excel)	Contrastación de los objetivos y las hipótesis

3.8. Procedimiento metodológico

Mediante un diseño experimental se manipularon las variables independientes de dosis de concentración fenton, pH y tiempo de contacto, con el objetivo de evaluar los efectos producidos en la reducción de la materia orgánica en función a la DQO de los lixiviados materia del presente estudio de investigación.

A continuación, se detalla los procedimientos experimentales desarrollados bajo condiciones controladas, con la finalidad de explicar la secuencia de acciones realizadas durante el proceso de tratamiento de los lixiviados.

3.8.1. Caracterización físico-química de los lixiviados de la celda transitoria

- a) **Procedimiento de muestreo:** El procedimiento de muestreo se realizó siguiendo las recomendaciones dadas por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2021), debido a que no se cuenta con un protocolo para muestreo de lixiviados. Se realizó un muestreo puntual, debido a que estos lixiviados se canalizan hacia un mismo punto llamado poza de lixiviados, los recipientes para la toma de muestras fueron enjuagados con la misma muestra para asegurar la calidad y representatividad de la

misma. El muestreo de los lixiviados materia de estudio fue realizado en el mes de setiembre, en temporada de estiaje.

Se recolectaron 60 litros de muestra representativa de las celdas transitorias de Huanuyo, 4 litros para análisis de parámetros fisicoquímicos, compuesta de 1 envase PET de 1L para análisis de DBO₅, 1 envase PET de 1L para análisis de metales totales y 4 envases PET de 500 ml cada uno para análisis de los parámetros de DQO, nitrógeno amoniacal, sólidos totales, la alcalinidad y dureza; y 56 litros para el procedimiento experimental propiamente dicho del diseño experimental. Se agregó preservante a los envases de las muestras de DQO, metales totales y nitrógeno amoniacal, para ello se usó ácido sulfúrico (H₂SO₄), de acuerdo a las especificaciones del laboratorio Bhios Lab donde se enviaron las muestras.

Se realizó el registro de los datos de campo en el instrumento de recolección de información llamada cadena de custodia, donde se mencionó el nombre de la muestra, la codificación, la matriz (agua residual municipal, lixiviado), la procedencia, fecha y hora de muestreo, los parámetros que se analizarán de acuerdo a la cotización, el volumen y número de muestras, así como los tipos de envases y los reactivos para su preservación, y alguna otra información necesaria como se especifica en la cadena de custodia que se anexa al presente informe (anexo 3).

Los frascos fueron almacenados en el cooler, debidamente rotulados y conservados con reactivos y sachets refrigerantes para su transporte libre de movimientos al laboratorio acreditado Bhios Lab de la ciudad de Arequipa, donde fueron analizados los parámetros fisicoquímicos mencionados.

Respecto a la recolección de los 56 litros de líquido lixiviado para realizar los procedimientos correspondientes a la investigación, se siguió los mismos procedimientos de seguridad y se usó 3 baldes de plástico de 20 L de capacidad.



Figura 5. Muestreo puntual de la poza de lixiviados operativa.

b) Parámetros a evaluar y método de análisis: A continuación, se muestran los distintos parámetros y método de ensayo que se emplearon para la determinación de los parámetros físico-químicos y establecer la calidad del lixiviado a tratar.

Tabla 13

Métodos de determinación de los parámetros fisicoquímicos evaluados

N.º	Parámetro	Unidad	Método
1	pH	Und. de pH	Multiparámetro (Parámetros de campo, in-situ)
2	Temperatura	°C	
3	Conductividad eléctrica	µS/cm	
4	Oxígeno Disuelto	Ppm	
5	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	SMEWW 5210-B
6	Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	SMEWW 5220 D
7	Nitrógeno amoniacal		SMEWW 4500-NH3 D
8	Sólidos totales	mg/L	SMEWW 2540-B
9	Alcalinidad		SMEWW 2320 B
10	Dureza total		SMEWW 2340-C
11	Turbiedad	NTU	Nefelométrico
12	Metales totales por ICP-MS	mg/L	SMEWW 6020 B

3.8.2. Evaluación de las condiciones óptimas de eficiencia del tratamiento

El sistema experimental empleado para llevar a cabo los experimentos fotoquímicos en el laboratorio estuvo formado básicamente por un reactor equipado con una lámpara de radiación UV y una bomba de pecera para la recirculación del lixiviado a tratar, el mismo que se aprecia a continuación.

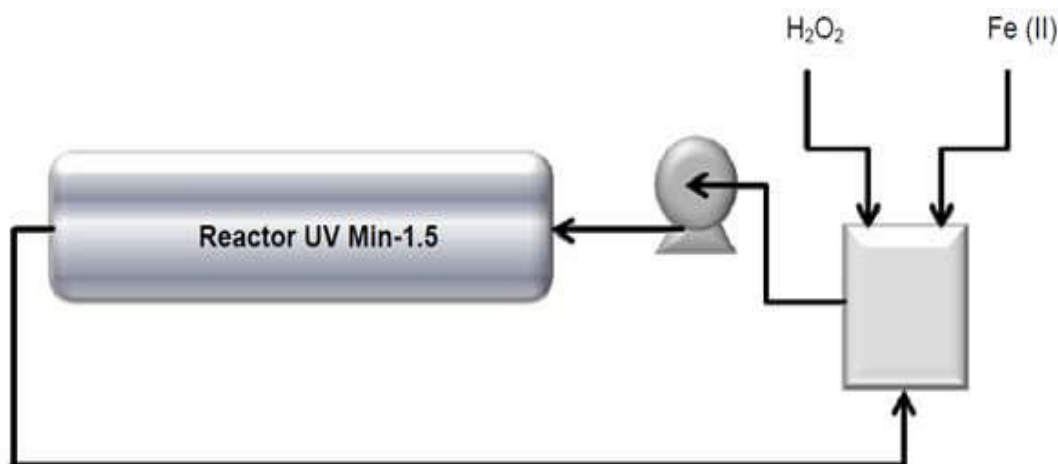


Figura 6. Ilustración del esquema del reactor propuesto por el autor.

El procedimiento de oxidación avanzada constó de las siguientes etapas:

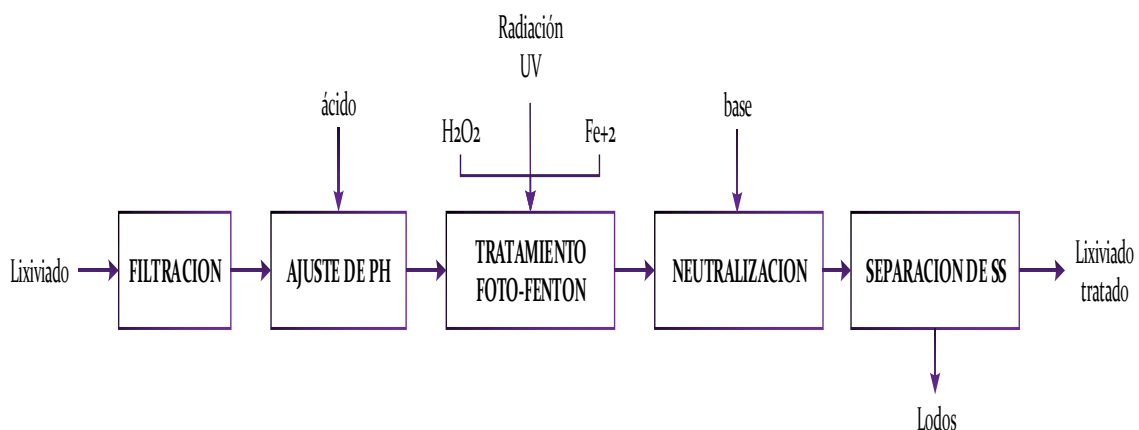


Figura 7. Esquema de las etapas del procedimiento experimental de foto-oxidación

- a) **Filtración:** Con el fin de eliminar partículas sólidas y sólidos en suspensión y evitar así su posible interferencia en la transmisión de la radiación, se filtró el lixiviado usando papel filtro Whatman N.º 42, el mismo que no presentó elevada eficiencia, debido a que las muestras del lixiviado no contenían gran cantidad de sólidos en suspensión y la coloración negra de la muestra era propia de los sólidos disueltos y la DBO₅ soluble.

b) Ajuste del pH de las muestras: Para cada prueba experimental se trabajó con 1.5 L de lixiviado en vaso precipitado de 1L de capacidad que forma parte del reactor foto-catalítico. Se determinó la concentración inicial de pH de la muestra usando el equipo multiparámetro manteniéndose para todos los casos un valor neutro. Como parte del diseño experimental, se ajustó el pH de las muestras a 3, 3.5 y 4. Para ello se utilizó ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) al 99 % de pureza. Se seleccionaron estos valores porque es bien conocido que las reacciones de oxidación tipo fenton son más eficaces en medio ácido (Bigda, 1995).

c) Reacción de oxidación avanzada: En el reactor foto-catalítico tipo batch de un volumen de tratamiento mínimo de 1.5L de lixiviados, adecuado con una bomba de pecera para la recirculación, asimismo se adaptó con mangueras de abasto para conectar a la lámpara fluorescente de UV de 16 watts, con una longitud de 44 cm. que a su vez viene cubierto con material metálico evitando la irradiación al ambiente. El prototipo del reactor foto-catalítico para las pruebas de experimentación de tratamiento foto-fenton es como se muestra en la figura 6.

Se adicionó para la experimentación sobre el reactor foto-catalítico que contiene el lixiviado ya ajustado a los pH de determinación de 3 , 3.5 y 4, los reactivos fenton, es decir, el peróxido de hidrógeno al 50% de acuerdo a los niveles de observación de 5, 10 y 15 mL/L de lixiviado crudo, mientras que el reactivo de sulfato ferroso heptahidratado al 99.9% de pureza se mantuvo constante la dosis de 2000 mg/L para todas las corridas experimentales. La otra variable de manipulación fue el tiempo de tratamiento, de 15, 30 y 45 minutos, que transcurridos este tiempo de contacto las muestras fueron depositadas en probetas de 250 mL para su posterior precipitación, los mismos que se aprecian en los anexos (figura 20).

d) Neutralización y decantación: Para finalizar el tren de tratamiento, luego de 5 días se ajustó el pH del efluente del reactor hasta un valor comprendido en 7 (pH neutro) y un ORP de 0 mV, utilizando hidróxido de sodio 5M (NaOH al 98% de pureza), con el fin de provocar la precipitación del catalizador metálico añadido en el proceso de oxidación, fundamentándose en los diagramas de Pourbaix, el cual menciona que a un pH de 7 y ORP de 0mV precipita el Fe^{2+} en forma de $Fe_2O_3(s)$. Se decantó y tomó una muestra del

líquido sobrenadante para su posterior análisis de demanda química de oxígeno post tratamiento.

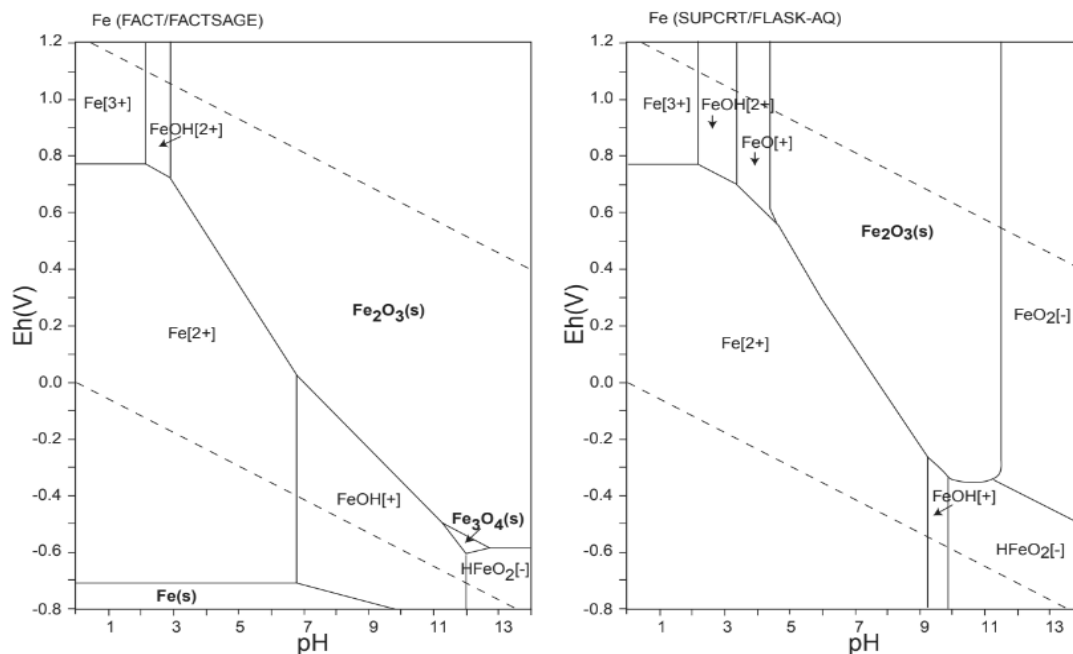


Figura 8. Diagrama de Pourbaix para el hierro
Fuente: Atlas de diagramas de Eh-pH (2005)

Para la preparación del hidróxido de sodio a una concentración de 5M, se pesó 20g. del soluto NaOH al 98% y se diluyó aforando en una fiola de 100 mL. Inmediatamente, luego de la adición de NaOH se pudo observar los cambios que se aprecian en la figura 19 de los anexos.

Finalmente, se detuvo la reacción de oxidación con óxido de manganeso (MnO_2) para eliminar el H_2O_2 residual, añadiendo 0.2 mg de MnO_2 por cada 10 mL de la muestra de lixiviado tratado, agitándolo por un lapso de 15 minutos hasta la desaparición de burbujas, dejándolo precipitar. Si obviamos este procedimiento será imposible la determinación de la DQO, debido a que toda la solución digestora será consumida por el H_2O_2 en lugar de ser consumida por el dicromato de potasio.

3.9. Determinación de la eficiencia del reactor

Cada una de las 14 muestras tratadas por oxidación avanzada foto-fenton, neutralizadas con NaOH y MnO_2 , fueron diluidas en 50 partes, aforando 1mL de muestra en fiolas de 50mL, posteriormente sobre los viales que contienen la solución de digestión y el ácido

sulfúrico con sulfato de plata, se colocó 2.5 ml de la muestra diluida, agitando la solución para producir una buena mezcla. En seguida, se colocaron los viales en un termorreactor LIANHUA a 150 °C durante 2 horas. Transcurrido este tiempo, se dejaron enfriar y se efectuaron las lecturas correspondientes de dicromato residual por colorimetría, en un espectrofotómetro UV a una longitud de onda de 440 nm. A partir de estos valores de absorbancia que cuentan con una curva de calibración se determinaron los porcentajes de DQO finales. El procedimiento para determinar la curva de calibración de la DQO se encuentra anexado al presente informe.

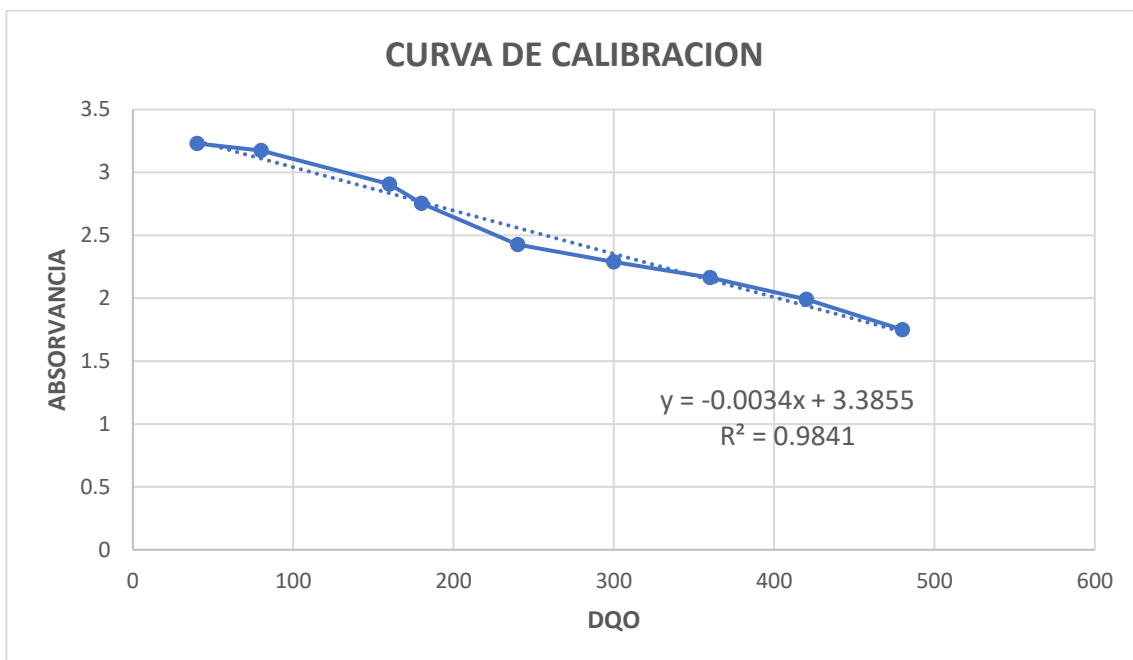


Figura 9. Curva de calibración de la DQO en función a la absorbancia

La función matemática de la DQO en base a la absorbancia, determinada mediante la curva de calibración fue la siguiente:

$$Y = -0.0034x + 3.3855 \quad (4)$$

$$ABS = -0.0034(DQO) + 3.3855$$

$$DQO = (ABS - 3.3855)/-0.0034$$

La eficiencia del reactor foto-fenton se determinó mediante la medición de condiciones iniciales (DQO = 61300 mg/L para todos los casos) y las condiciones finales después de la salida del reactor. La eficiencia del reactor foto catalítico se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$Eficiencia = \left(\frac{DQO_0 - DQO_t}{DQO_0} \right) \times 100 \quad (5)$$

Donde:

DQO₀: Concentración de la DQO a la entrada

DQO_t: Concentración de la DQO a la salida

3.10. Análisis estadístico de la investigación

Para estimar las mejores combinaciones de las variables de dosis óptima del reactivo fenton, pH y tiempo de contacto, se utilizó el diseño Box-Behnken de 12 combinaciones con 2 repeticiones en los puntos centrales haciendo un total de 14 experimentos con la finalidad de determinar un valor óptimo. El modelo matemático que se ajusta a un diseño Box-Behnken viene determinada por la siguiente ecuación (Box y Behnken, 1960):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (6)$$

Donde, β_0 es el término independiente, β_i y β_{ii} son los coeficientes de los i – *esimo* efectos principales y su efecto cuadrático respectivamente, β_{ij} es el coeficiente de interacción entre el i – *esimo* i el j – *esimo* y es el error aleatorio.

Esta ecuación, al contar con términos cuadráticos, proporciona una superficie de respuesta con cierta curvatura, pudiéndose así aproximar mejor al modelo real que en el caso del diseño k-factorial. El número de experimentos (N) necesarios para el desarrollo de este diseño se define como:

$$N = 2k(k - 1) + C_0 \quad (7)$$

Donde, k es el número de factores y C_0 es el número de puntos centrales. La tabla 14 contiene el número de experimentos del diseño Box-Behnken de tres factores y tres niveles, en donde el valor máximo, mínimo y medio de cada factor en el rango seleccionado está codificado como “1”, “-1” y “0” respectivamente. Los niveles de los factores de H₂O₂, pH y tiempo de contacto fueron aplicados de acuerdo a matriz experimental que se muestra en la tabla 14.

Tabla 14
 Matriz del diseño experimental (diseño Box-Behnken)

N.º	X1	X2	X3	Factores		
				H ₂ O ₂ (ml/L)	pH (und.)	Tiempo (min)
1	-	-	0	5	3	30
2	-	+	0	5	4	30
3	+	-	0	15	3	30
4	+	+	0	15	4	30
5	-	0	-	5	3.5	15
6	-	0	+	5	3.5	45
7	+	0	-	15	3.5	15
8	+	0	+	15	3.5	45
9	0	-	-	10	3	15
10	0	-	+	10	3	45
11	0	+	-	10	4	15
12	0	+	+	10	4	45
13	0	0	0	10	3.5	30
14	0	0	0	10	3.5	30

Para un mejor contraste, los resultados fueron analizados mediante un diseño factorial conformado por 2 variables, 2 niveles y 2 réplicas en el centro. El número de combinaciones de este diseño se define como $2^k + C_0$ y se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15
 Matriz del diseño de contraste (diseño factorial)

Campos	H ₂ O ₂			pH			Tiempo		
	a1	a2	a3	b1	b2	b3	c1	c2	c3
1	a1,1	a2,1	a3,1	b1,1	b2,1	b3,1	c1,1	c2,1	c3,1
2	a2,1	a2,2	a2,3	b2,1	b2,2	b2,3	c2,1	c2,2	c2,3
3	a3,1	a3,2	a3,3	b3,1	b3,2	b3,3	c3,1	c3,2	c3,3

El modelo matemático que se ajusta a un diseño k-factorial viene determinada por la ecuación 8. La ecuación de la superficie de respuesta definida en esta ecuación, al carecer de términos cuadráticos, proporciona una superficie plana (Ayala & Pardo, 1995).

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (8)$$

Asimismo, se desarrolló un análisis de los resultados considerando diagramas de Pareto, estimación de efectos, estimación de interacciones, modelos de regresión, análisis de varianza (ANOVA), diagramas de superficie de respuesta y gráficos de contorno.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización físico-química de los lixiviados de la celda transitoria

Los resultados de la caracterización de parámetros físicos y químicos, indicadores de la calidad de los lixiviados generados en la celda transitoria de Huanuyo, analizados tanto con equipos propios de la Universidad Nacional de Juliaca (parámetros de campo) y el laboratorio acreditado ante INACAL Bhios Lab, según Informe de ensayos N.º 5684 – 2022 se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 16

Parámetros de campo

N.º	Parámetro	Valor	Unidad
1	pH*	6.8	Und. de pH
2	Temperatura*	20.6	°C
3	Conductividad eléctrica*	29000	µS/cm
4	Oxígeno disuelto*	0.21	mg/L

*Parámetro determinado con equipos de la Universidad Nacional de Juliaca

La tabla 16 muestra los parámetros de campo analizados mediante el equipo multiparámetro, logrando determinar un valor de 6.8 para el pH, lo que significa que los lixiviados tienen un valor neutro a ligeramente ácido; otro parámetro importante en el tratamiento de aguas residuales es la temperatura, reportando un valor de 20.6 °C; una conductividad de 29000 µS/cm y oxígeno disuelto de 0.21 mg/L, lo que indica que el lixiviado se encuentra en condiciones anóxicas.

Los valores de la caracterización físico-química de lixiviados realizado por Medina et al. (2016), no evidenciaron cambios importantes en el pH de los lixiviados en comparación al presente estudio, ya que reportó en época de estiaje valores de 8.17 para los lixiviados de Aguas de las Vírgenes y de 7.86 para los lixiviados de El Edén, ambos rellenos sanitarios se encuentran ubicados en Huancayo. Asimismo, valores de pH comprendidos entre 6.5 y 8.8; y similares valores de conductividad eléctrica han sido reportados previamente por Méndez et al. (2010) y Primo (2008).

Tabla 17
Parámetros fisicoquímicos

N.º	Parámetro	Valor	Unidad
1	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	5140	mg/L
2	Demanda química de oxígeno (DQO)	61300	mg/L
3	Nitrógeno amoniacal	2220.81	mg/L
4	Sólidos totales	83413	mg/L
5	Alcalinidad	1623581.25	mg/L
6	Dureza total como CaCO ₃	8350.72	mg/L
7	Turbiedad*	105	mg/L

De la Tabla 17 se infiere que los lixiviados contienen concentraciones muy altas de materia orgánica, con una DQO de 61 300 mg/L, que en comparación con un agua residual doméstica que como máximo alcanza una DQO 1000 mg/L, estos lixiviados se encuentran concentrados en 61 partes más, evidenciando los impactos que estos podrían ocasionar sobre el ambiente, así como la dificultad de su tratamiento. Del mismo modo, se aprecia 2220.81 mg/L de nitrógeno amoniacal en la muestra de lixiviados, producto del exceso de humedad de los residuos sólidos (fracción orgánica), este parámetro es causante de la producción de dióxido de nitrógeno (NO₂) en las celdas transitorias, gas considerado de efecto invernadero (GEI), lo cual es perjudicial para el medio ambiente.

Es importante considerar también que los valores de alcalinidad y dureza de los lixiviados analizados son muy altos, valores de 1623581.25 mg/L y 8350.72 mg/L respectivamente, lo que representa que el agua residual es muy dura, actuando como solución buffer al momento de ajustar el pH a condiciones ácidas, traduciéndose en costos de tratamiento por el uso de reactivos.

Medina et al. (2016), reportó valores de 6909 mg/L para DBO₅ y 16875 mg/L para DQO, una dureza total de 7100 mg/L y una alcalinidad de 8880 mg/L para ambos casos representado como CaCO₃; a pesar que esta infraestructura de disposición final presenta características similares a las celdas transitorias de Huanuyo por el tiempo de operación y condiciones climáticas, los lixiviados de Huanuyo contienen mayor carga contaminante.

Tabla 18

Parámetros inorgánicos (metales totales)

N.º	Parámetro	Valor	Unidad
1	Arsénico	0.19846	mg/L
2	Cadmio	0.00493	mg/L
3	Cobre	0.086	mg/L
4	Cromo	0.64190	mg/L
5	Mercurio	0.0013	mg/L
6	Plomo	0.0838	mg/L
7	Bario	1.446	mg/L
8	Boro	4.946	mg/L
9	Hierro	334.3	mg/L
10	Magnesio	470.3	mg/L
11	Manganeso	102.8	mg/L
12	Níquel	0.7761	mg/L
13	Aluminio	1.27	mg/L
14	Calcio	2199	mg/L
15	Potasio	3284	mg/L
16	Sodio	2907	mg/L
17	Fosforo	29.65	mg/L
18	Silicio	43.54	mg/L
19	Zinc	1.747	mg/L

En la tabla 18, se presenta la información de los parámetros metales totales, dividido en 3 grupos: metales pesados, metales considerados en los estándares de calidad ambiental ECA agua III, y finalmente otros metales de importancia. De estos parámetros evaluados, los metales pesados de arsénico 0.19846 mg/L, cromo 0.64190 mg/L y plomo 0.0838 mg/L superan los estándares de calidad ambiental para agua categoría 3. Asimismo, estos lixiviados contienen metales con altas concentraciones de calcio y magnesio, encargados de endurecer el agua; calculando la dureza matemática se halló el siguiente valor que se asemeja a la dureza determinada en laboratorio (tabla 16).

$$Dureza (CaCO_3) = 2.497[Ca] + 4.118[Mg] \quad (9)$$

$$Dureza (CaCO_3) = 2.497[2199] + 4.118[470.3]$$

$$Dureza (CaCO_3) = 7427.59 \quad <> \quad 8350.72 \text{ (lab)}$$

En cuanto al contenido de metales pesados, Medina et al. (2016), en época de lluvia observó que la presencia de plomo fue mayor en los lixiviados de los rellenos sanitarios Aguas de las Vírgenes 0.814 mg/L y El Edén .060 mg/L (80% más que en época de estiaje); mientras que en época de estiaje se observó el cadmio en pequeñas

concentraciones de 0.0018 mg/L en los lixiviados del primer relleno sanitario mencionado.

4.1.1. Índice de biodegradabilidad del lixiviado crudo

Este índice se determina dividiendo el valor de la DBO₅/DQO propios de la caracterización de la muestra (lixiviado crudo).

$$IB = \frac{DBO_5}{DQO} \quad (10)$$

$$IB = \frac{5140}{61300}$$

$$IB = 0.084$$

Tabla 19
Índice de biodegradabilidad del lixiviado crudo

Muestra	Parámetro	Valor
M-01	Índice de biodegradabilidad (IB)	0.08

Tabla 20
Índice de biodegradabilidad del agua residual

Relación DBO ₅ /DQO	Índice de biodegradabilidad del H ₂ O
< 0.2	No biodegradable
0.2 – 0.4	Biodegradable
>0.4	Muy biodegradable

Fuente: Remtavares (2012)

Si comparamos los valores del índice de biodegradabilidad, según Remtavares (2012), la muestra del lixiviado crudo es un agua residual **no biodegradable**, es decir, que los métodos de tratamiento biológicos no serán eficientes ni los adecuados para degradar la materia orgánica presente en el lixiviado, por lo que se tiene que recurrir a métodos avanzados de oxidación para su tratamiento, aceptando la hipótesis nula de que el lixiviado presentaría un IB no biodegradable, comprobándose con la caracterización de la muestra.

Medina et. al (2016), como resultado de la caracterización físico-química de los lixiviados calculó el indicador de biodegradabilidad, obteniendo valores de 0.09 y 0.4 en época de estiaje para los rellenos sanitarios Aguas de las Vírgenes (lixiviado viejo) y El Edén (lixiviado joven) respectivamente.

4.2. Evaluación de las condiciones óptimas de eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto – fenton.

Las eficiencias alcanzadas en degradación de la materia orgánica, mediante las pruebas de oxidación avanzada a determinadas condiciones de H₂O₂, pH y tiempo se muestran en la tabla 21, el mismo que representa los valores de las 12 combinaciones con 2 repeticiones en los puntos centrales, un total de 14 corridas experimentales distribuidas de acuerdo al diseño Box Behnken.

Tabla 21
Eficiencia (%) de reducción de la DQO en función a la absorbancia

Unidad Muestra	Factores			ABS.	DQO (diluida)	DQO FINAL	Eficiencia (%)
	H ₂ O ₂ (ml/L)	pH (und.)	T (min)				
1	15	4	30	2.689	205	10243	83.29
2	5	3.5	15	1.877	444	22184	63.81
3	5	3.5	45	1.977	414	20713	66.21
4	15	3.5	15	2.084	383	19140	68.78
5	15	3.5	45	2.04	396	19787	67.72
6	10	3	15	1.867	447	22331	63.57
7	10	3	45	1.869	446	22301	63.62
8	10	4	15	2.014	403	20169	67.10
9	10	4	45	2.002	407	20346	66.81
10	15	3	30	1.998	408	20404	66.71
11	5	4	30	1.732	486	24316	60.33
12	5	3	30	1.921	431	21537	64.87
13	10	3.5	30	1.832	457	22846	62.73
14	10	3.5	30	1.803	465	23272	62.04

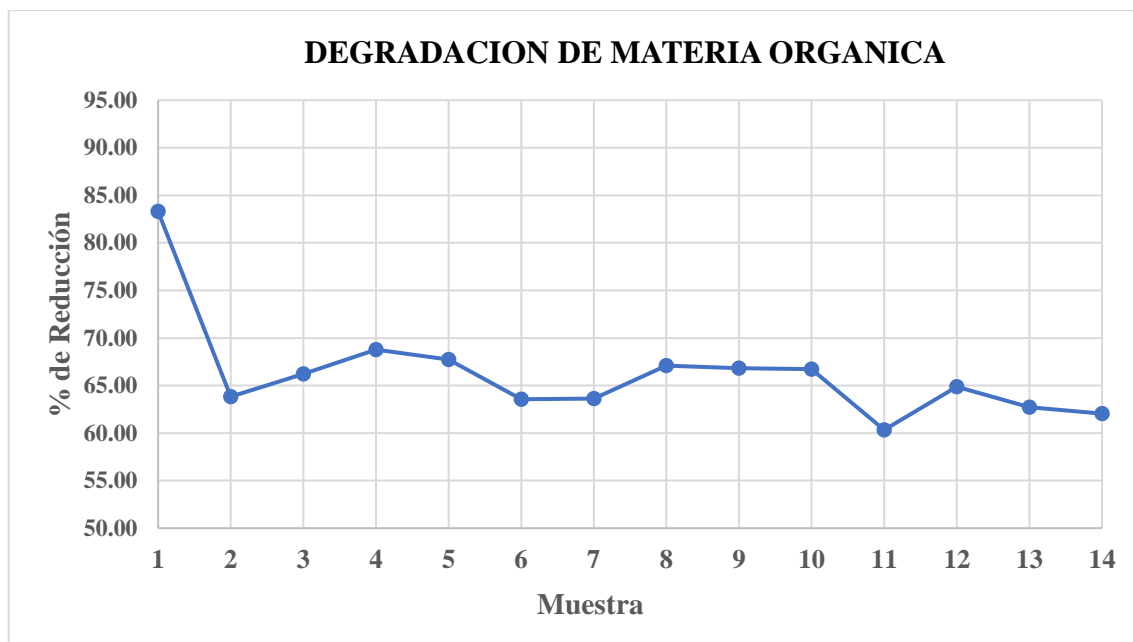


Figura 10. Eficiencia alcanzada en la reducción de la materia orgánica

En la tabla 21 y figura 10 se evidencia que los valores máximo y mínimo de porcentaje de reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) de los lixiviados de residuos sólidos de la celda transitoria de Huanuyo, fueron de 83.29% (Experimento 1) y 60.33 % (Experimento 11) respectivamente, demostrando que los niveles óptimos de eficiencia de tratamiento se alcanzaron en las condiciones de una dosis de 15 mL/L de H₂O₂ y 2000 mg/L de Fe²⁺, un pH de 4 y tiempo de contacto en la lampara UV de 30 minutos.

Estos resultados se pueden comparar con la investigación desarrollada por Yaranga (2021), quien alcanzó una eficiencia de 90.68% para un pH de 4 y una relación molar de 2 a 1 de H₂O₂ y Fe²⁺ con valores residuales de 5201.67 ppm de DQO para el proceso foto-fenton, el lixiviado crudo de su investigación presentaba un índice de biodegradabilidad de 0.2 lo que pudo facilitar su mayor eficiencia. Asimismo, Costa et al. (2015), lograron una degradación de la DQO entre 88 y 78%. Kwarciak & Krzywicka (2015), alcanzaron la remoción de la DQO al 75.3% (Fe²⁺/H₂O₂ = 0.33) en el proceso foto-fenton a un pH inicial de 3, además se observa que a un pH de 4 se remueve mayor porcentaje de DQO, tal como señalan Méndez et al. (2010), donde se evaluó la remoción de la materia orgánica de 74% a un pH de 4, sin embargo, a un pH de 2 y un pH de 3 hubo una remoción del 57% de DQO y 70% de DQO respectivamente que corresponde a una concentración de 600 mg/L de H₂O₂ y 1000 mg/L de Fe²⁺.

En resumen, para todas las investigaciones mencionadas a un valor de pH de 4 unidades se alcanza las mayores eficiencias de oxidación avanzada, variando las dosis de concentración fenton de acuerdo a la calidad del lixiviado crudo, siendo la variable de tiempo de contacto un valor irrelevante.

4.3. Diseño estadístico de la investigación

Las variables en estudio fueron la dosis de H₂O₂, pH y el tiempo de tratamiento, la variable respuesta fue la eficiencia de reducción de DQO. Las variables se evaluaron a través del diseño factorial que estuvo conformado de 2 variables, 2 niveles y 2 réplicas en el centro. Los resultados de la eficiencia de reducción de DQO en los diseños factoriales se muestran en las tablas 22 - 24.

Tabla 22

Matriz del diseño factorial para la eficiencia de reducción de DQO utilizando las variables dosis de H₂O₂ y pH.

N.º	Variables naturales		Variables codificadas		% Eficiencia de reducción de DQO
	H ₂ O ₂ (mL)	pH	x ₁	x ₂	
1	15	3.0	-1	-1	64.87
2	5	3.0	1	-1	66.71
3	5	4.0	-1	1	60.33
4	15	4.0	1	1	83.29
5	10	3.5	0	0	62.73
6	10	3.5	0	0	62.04

Tabla 23

Matriz del diseño factorial para la eficiencia de reducción de DQO utilizando las variables dosis de H₂O₂ y tiempo de tratamiento.

N.º	Variables naturales		Variables codificadas		% Eficiencia de reducción de DQO
	H ₂ O ₂ (mL)	Tiempo (min)	x ₁	x ₂	
1	15	15	-1	-1	63.81
2	5	15	1	-1	68.78
3	5	45	-1	1	66.21
4	15	45	1	1	67.72
5	10	30	0	0	61.30
6	10	30	0	0	61.50

Tabla 24

Matriz del diseño factorial para la eficiencia de reducción de DQO utilizando las variables pH y tiempo de tratamiento.

N.º	Variables naturales		Variables codificadas		% Eficiencia de reducción de DQO
	pH	Tiempo (min)	x ₁	x ₂	
1	4	15	-1	-1	63.57
2	3	15	1	-1	67.10
3	3	45	-1	1	63.62
4	4	45	1	1	66.81
5	3.5	30	0	0	62.30
6	3.5	30	0	0	62.60

De las interacciones de los factores evaluados de dosis de H₂O₂, pH y tiempo de contacto, se evidencia que las variables más importantes son la dosis de reactivo fenton y el pH, así como se observa en la tabla 22, en los niveles de 15 mL/L de H₂O₂ y 4 und. de pH se logró alcanzar la mayor eficiencia de 83.29, concluyendo del análisis estadístico que los factores más relevantes son la interacción de estas 2 variables, siendo el tiempo de contacto irrelevante.

4.3.1. Análisis estadístico

A) Diagrama de Pareto

Los diagramas de Pareto se graficaron utilizando el paquete Design Expert 7. En la figura 11, se muestra el diagrama de Pareto en la cual se representan los efectos estandarizados de las variables como la dosis de peróxido de hidrógeno, pH y tiempo de tratamiento para un nivel de confianza del 95% ($p = 0.05$).

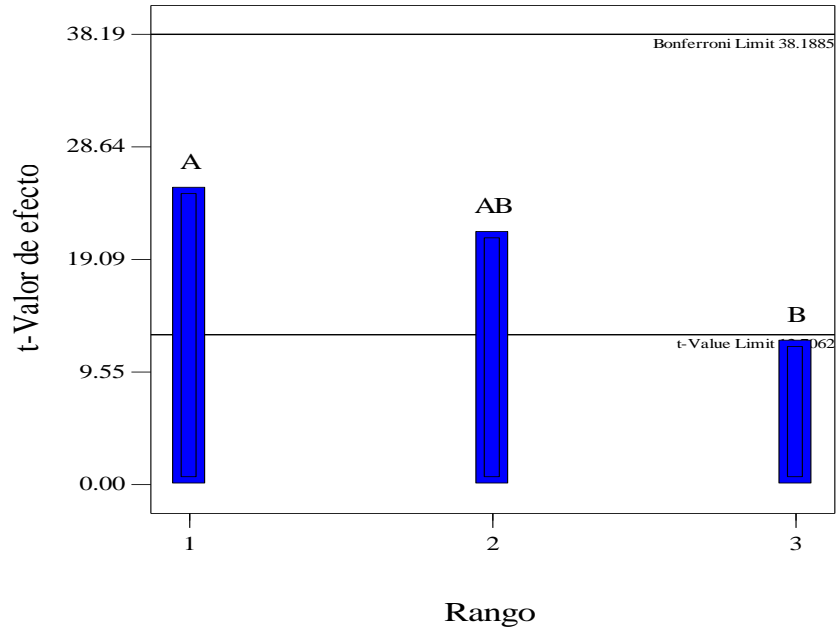


Figura 11a. Diagrama de Pareto para las variables dosis de H_2O_2 y pH.

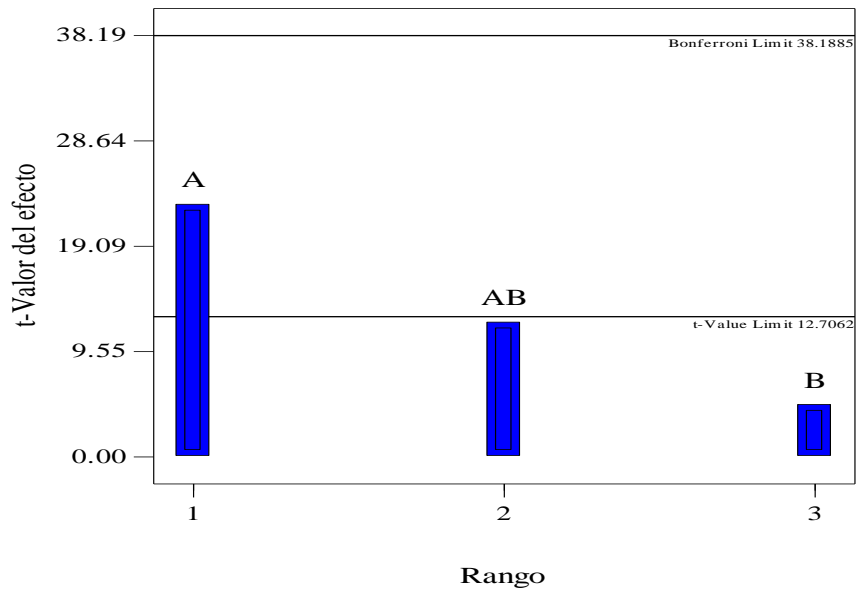


Figura 11b. Diagrama de Pareto para las variables dosis de H_2O_2 y tiempo de tratamiento.

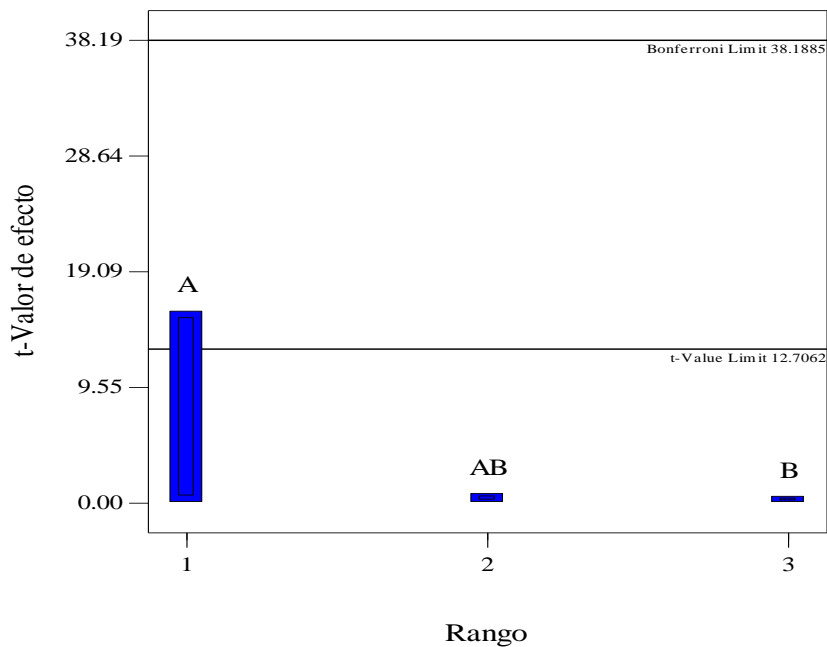


Figura 11c. Diagrama de Pareto para las variables pH y tiempo de tratamiento.

Figura 11. Diagrama de Pareto para la eficiencia de reducción de DQO

En la figura 11a, se visualiza que el factor dosis de peróxido de hidrogeno y la interacción peróxido de hidrógeno y pH son significativos; mientras que el factor pH (únicamente) resultó no ser muy significativa en el rango de pH estudiado. Según la figura 11b, la variable dosis de peróxido de hidrógeno resulto ser significativa y el factor tiempo de tratamiento y su interacción no fueron significativas. Así mismo, en la figura 11c, el pH resulto ser significativa y la variable tiempo de tratamiento y la interacción de ambas variables no son significativas.

B) Estimación de efectos

Los gráficos de los efectos de las variables se graficaron utilizando el paquete estadístico Statgraphics Centurion 16.1.18. Los gráficos efectos de las variables como la dosis de peróxido de hidrógeno [H₂O₂], el pH y el tiempo de tratamiento para el porcentaje de Eficiencia de reducción de DQO de los lixiviados se muestra en la figura 12.

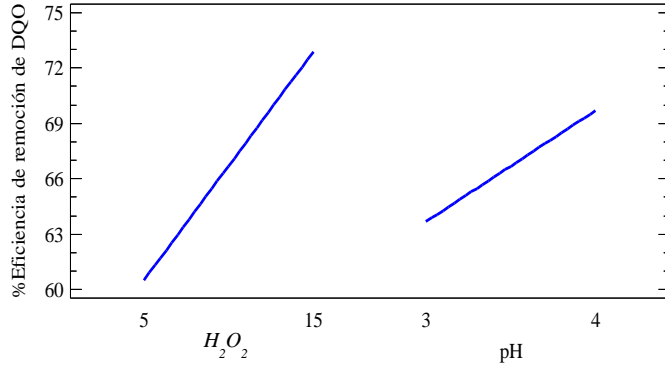


Figura 12a. Efectos de la dosis de peróxido de hidrógeno y pH

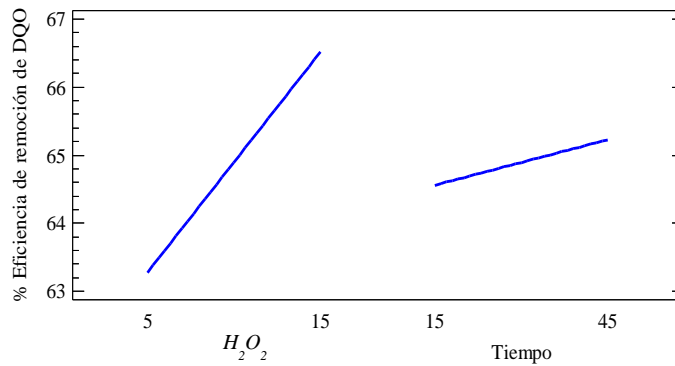


Figura 12b. Efectos de la dosis de H_2O_2 y tiempo de tratamiento

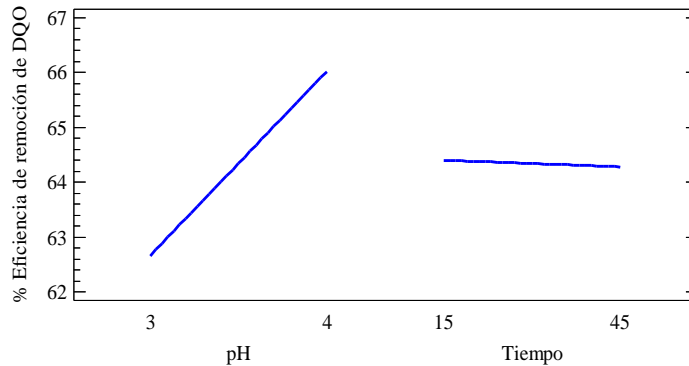


Figura 12c. Efectos de pH y tiempo de tratamiento

Figura 12. Relación de los efectos principales para el porcentaje de eficiencia de reducción de DQO

En la figura 12a, se observa que la dosis de peróxido de hidrógeno [H_2O_2] tiene una relación directamente proporcional con el porcentaje de eficiencia de reducción de DQO, esto quiere decir que al incrementa la dosis de peróxido de hidrogeno de 5 a 10 mL provoca un incremento en el porcentaje de eficiencia de reducción de DQO. Así mismo,

el pH también tiene una relación directamente proporcional con el % eficiencia de reducción de DQO, un aumento del pH de 3 a 4 ocasiona un aumento en el porcentaje de eficiencia de reducción de DQO.

En la figura 12b, se observa que la dosis de peróxido de hidrógeno [H_2O_2] es directamente proporcional con el porcentaje de eficiencia de reducción de DQO, al incrementa la dosis de peróxido de hidrógeno de 5 a 10 mL provoca un incremento en el porcentaje de eficiencia de reducción de DQO. El tiempo de tratamiento es directamente proporcional con el porcentaje de eficiencia de reducción de DQO, un incremento del tiempo de tratamiento de 15 a 45 minutos aumenta levemente en el porcentaje de eficiencia de reducción de DQO.

En la figura 12c, se visualiza que el pH es directamente proporcional con el porcentaje de eficiencia de reducción de DQO, al incrementar el pH de 3 a 4 aumenta el porcentaje de eficiencia de reducción de DQO. El efecto del tiempo de tratamiento directamente no tiene significancia en porcentaje de eficiencia de reducción de DQO.

C) Estimación de interacciones

Los gráficos de las interacciones de las variables se graficaron utilizando el paquete estadístico Statgraphics Centurion 16.1.18. En la figura 13, se representa las gráficas de las interacciones de las variables dosis de peróxido de hidrógeno, pH y tiempo.

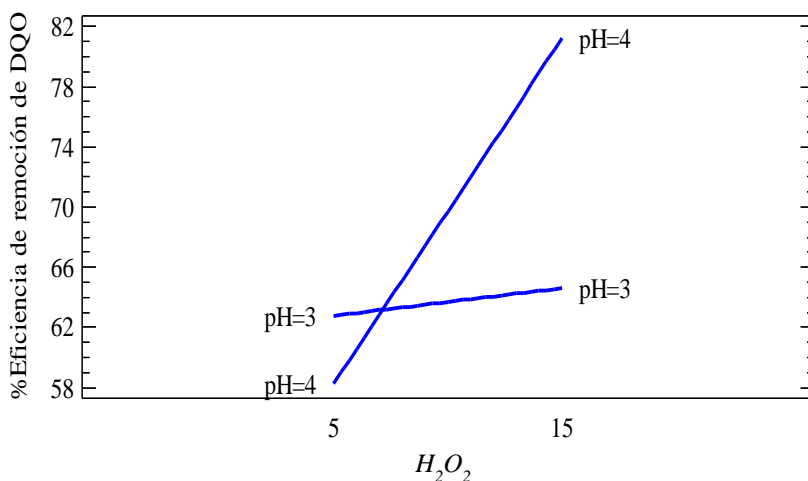


Figura 13a. Interacción de la dosis de peróxido de hidrógeno y pH

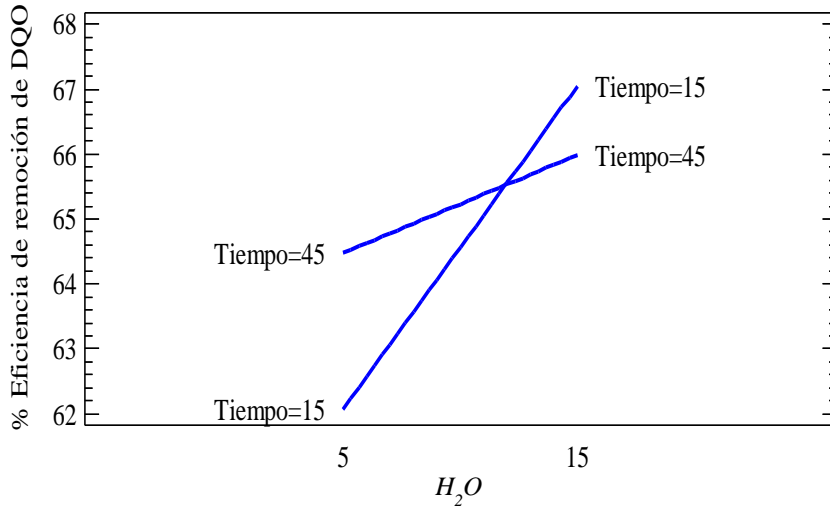


Figura 13b. Interacción de la dosis de H₂O₂ y tiempo de tratamiento

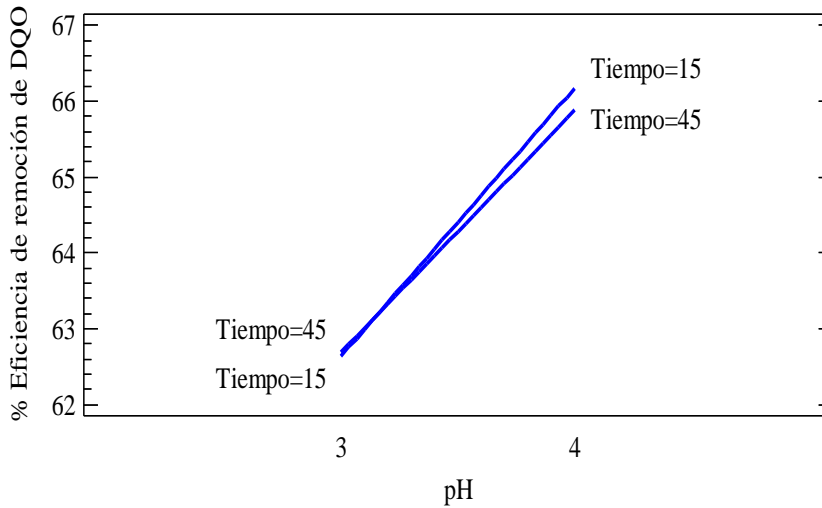


Figura 13c. Interacción del pH y tiempo de tratamiento

Figura 13. Estimación de interacción para el % eficiencia de reducción de DQO

Según la figura 13a, se destaca que existe interacción entre las variables dosis de peróxido de hidrógeno y pH, esto quiere decir la dosis de peróxido de hidrógeno presenta una afectación distinta al interactuar con un pH distinto. En la figura 13b, se destaca que existe interacción entre las variables dosis de peróxido de hidrógeno y tiempo de tratamiento, es decir la dosis de peróxido de hidrógeno presenta una afectación distinta al interactuar con un tiempo de tratamiento distinto. En la figura 13c, se destaca que existe interacción entre las variables pH y tiempo de tratamiento, esto quiere decir que el pH presenta una afectación distinta al interactuar con un tiempo de tratamiento distinto.

D) Modelos de regresión

Se utilizó el paquete Design Expert 7 para la determinación de los coeficientes de regresión del modelo. Los resultados se muestran en la siguiente tabla 25 a 27.

Tabla 25

Coefficientes del modelo de regresión para las variables dosis de peróxido de hidrógeno y pH

Factor	Coeficiente estimado	
	Variable codificada	Variable natural
Intercepto	68.80	109.21
x ₁ : [H ₂ O ₂]	6.20	-6.15
x ₂ : pH	3.01	-15.10
x ₁ x ₂	5.28	2.11

El modelo regresión en términos de sus variables codificadas para la dosis de peróxido de hidrógeno y pH es la siguiente:

$$y = 68.80 + 6.20x_1 + 3.01x_2 + 5.28x_1x_2 \quad (11)$$

Así mismo, el modelo de regresión en términos de sus variables naturales se representa mediante la siguiente expresión:

$$\%Efic. de remoc. de DQO = 109.21 - 6.15 [H_2O_2] - 15.10 pH + 2.11 [H_2O_2] pH \quad (12)$$

Tabla 26

Coefficientes del modelo de regresión para las variables dosis de peróxido de hidrógeno y tiempo de tratamiento

Factor	Coeficiente estimado	
	Variable codificada	Variable natural
Intercepto	66.63	59.26
x ₁ : [H ₂ O ₂]	1.62	0.67
x ₂ : Tiempo	0.34	0.14
x ₁ x ₂	-0.86	-0.01

El modelo regresión en términos de sus variables codificadas para la dosis de peróxido de hidrógeno y tiempo de tratamiento es la siguiente:

$$y = 66.63 + 1.62x_1 + 0.34x_2 - 0.86x_1x_2 \quad (13)$$

Así mismo, el modelo de regresión en términos de sus variables naturales se representa mediante la siguiente expresión:

$$\%Efic. de remoc. de DQO = 59.26 + 0.67 [H_2O_2] - 0.14 Tiempo - 0.01 [H_2O_2]Tiempo \quad (14)$$

Tabla 27

Coefficientes del modelo de regresión para las variables dosis de peróxido de hidrógeno y tiempo de tratamiento

Factor	Coeficiente estimado	
	Variable codificada	Variable natural
Intercepto	65.28	52.45
x ₁ : pH	1.68	3.70
x ₂ : Tiempo	-0.06	0.04
x ₁ x ₂	-0.085	-0.01

El modelo regresión en términos de sus variables codificadas para el pH y el tiempo de tratamiento es la siguiente:

$$y = 65.28 + 1.68x_1 - 0.06x_2 - 0.085x_1x_2 \quad (15)$$

Así mismo, el modelo de regresión en términos de sus variables naturales se representa mediante la siguiente expresión:

$$\%Efic. de remoc. de DQO = 52.45 + 3.70 pH + 0.04 Tiempo - 0.01 pH Tiempo \quad (16)$$

E) Análisis de varianza

En las tablas 28 a 30 se muestran los análisis de varianza para el % eficiencia de reducción de DQO. En el análisis de varianza, se evaluó la significancia de todos los efectos e interacciones del modelo de regresión obtenido para un nivel de probabilidad del 5 %.

Tabla 28
Análisis de varianza para el % de eficiencia de reducción de DQO utilizando las variables dosis de peróxido de hidrógeno y pH

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F_0
Modelo	301.51	3	100.50	415.29
x_1 : [H ₂ O ₂]	153.83	1	153.83	635.65
x_2 : pH	36.26	1	36.26	149.82
x_1x_2	111.42	1	111.42	460.40
Curvatura	54.91	1	54.91	226.89
Error puro	0.24	1	0.24	
Total	356.66	5		

Según la tabla 28 de puntos porcentuales de la distribución F (anexo 5), para un nivel de confianza del 95%, grados de libertad del numerador (v_1) 1 (efectos e interacciones) y grados de libertad del denominador (v_2) 1 (error) el estadístico $F_{0.05,1,1}$ es igual a 161.4.

Realizando la comparación del estadístico $F_{0.05,1,1}$ con los resultados de F_0 de la Tabla 28 de análisis de varianza se observa que:

- El modelo ajustado es significativo, debido a que el estadístico F_0 calculado fue mayor al $F_{0.05,1,1}$ ($F_0 > F_{0.05,1,1}$).
- En relación a la dosis de peróxido de hidrógeno (x_1), su efecto fue significativo en el rango de dosis agua oxigenada evaluado. El estadístico F_0 calculado fue mayor que el $F_{0.05,1,1}$ ($F_0 > F_{0.05,1,1}$).
- En cuanto al pH (x_2), su efecto no fue significativo en el rango de pH estudiado. El estadístico F_0 calculado fue menor a $F_{0.05,1,3}$ ($F_0 < F_{0.05,1,3}$).
- La interacción de 2 términos (x_1x_2), su efecto fue significativa. El estadístico F_0 calculado fue mayor que el $F_{0.05,1,1}$ ($F_0 > F_{0.05,1,1}$).

Tabla 29

Análisis de varianza para el % eficiencia de reducción de DQO utilizando las variables dosis de peróxido de hidrógeno y tiempo de tratamiento

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F_0
Modelo	13.92	3	4.64	232.06
x_1 : [H ₂ O ₂]	10.49	1	10.49	524.44
x_2 : Tiempo	0.45	1	0.45	22.56
x_1x_2	2.98	1	2.98	149.18
Curvatura	36.47	1	36.47	1823.44
Error puro	0.020	1	0.02	
Total	50.41	5		

El estadístico Fisher es igual a 161.4, según la tabla de puntos porcentuales de la distribución F (anexo 5), para un nivel de confianza del 95%, grados de libertad del numerador (v_1) 1 (efectos e interacciones) y grados de libertad del denominador (v_2) 1 (error).

Según la tabla 29 de análisis de varianza se concluye que:

- El modelo ajustado es significativo debido a que el estadístico F_0 calculado fue mayor al $F_{0.05,1,1}$ ($F_0 > F_{0.05,1,1}$).
- La dosis de peróxido de hidrógeno (x_1), fue significativo en el rango de dosis de peróxido de hidrógeno. El estadístico F_0 calculado fue mayor que el $F_{0.05,1,1}$ ($F_0 > F_{0.05,1,1}$).
- El tiempo de tratamiento (x_2), su efecto no fue significativo. El estadístico F_0 calculado fue menor a $F_{0.05,1,3}$ ($F_0 < F_{0.05,1,3}$).
- La interacción de 2 términos (x_1x_2), su efecto no fue significativa. El estadístico F_0 calculado fue menor que el $F_{0.05,1,1}$ ($F_0 < F_{0.05,1,3}$).

Tabla 30

Análisis de varianza para el % eficiencia de reducción de DQO utilizando las variables pH y tiempo de tratamiento

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F_0
Modelo	11.33	3	3.78	83.95
x_1 : pH	11.29	1	11.29	250.88
x_2 : Tiempo	0.014	1	0.014	0.32
x_1x_2	0.029	1	0.029	0.64
Curvatura	10.64	1	10.64	236.46
Error puro	0.045	1	0.045	
Total	22.02	5		

Para un nivel de confianza del 95%, grados de libertad del numerador (v_1) 1 (efectos e interacciones) y grados de libertad del denominador (v_2) 1 (error) el estadístico $F_{0.05,1,1}$ es igual a 161.4.

Según la tabla 30 de análisis de varianza se destaca los siguiente:

- El modelo ajustado no se ajusta a los datos experimentales, debido a que el estadístico F_0 calculado fue menor al $F_{0.05,1,1}$ ($F_0 < F_{0.05,1,1}$).
- El efecto del pH (x_1) fue significativo en el rango evaluado. El estadístico F_0 calculado fue mayor que el $F_{0.05,1,1}$ ($F_0 > F_{0.05,1,1}$).
- El efecto del tiempo de tratamiento (x_2) no fue significativo. El estadístico F_0 calculado fue menor a $F_{0.05,1,3}$ ($F_0 < F_{0.05,1,3}$).
- La interacción de 2 términos (x_1x_2), su efecto no fue significativa. El estadístico F_0 calculado fue menor que el $F_{0.05,1,1}$ ($F_0 < F_{0.05,1,3}$).

F) Superficie de respuesta y gráfico de contorno

En las figuras 14 a 16 se representan las superficies de respuesta y gráficos de contorno de los modelos de regresión para el porcentaje de la eficiencia de reducción de la DQO.

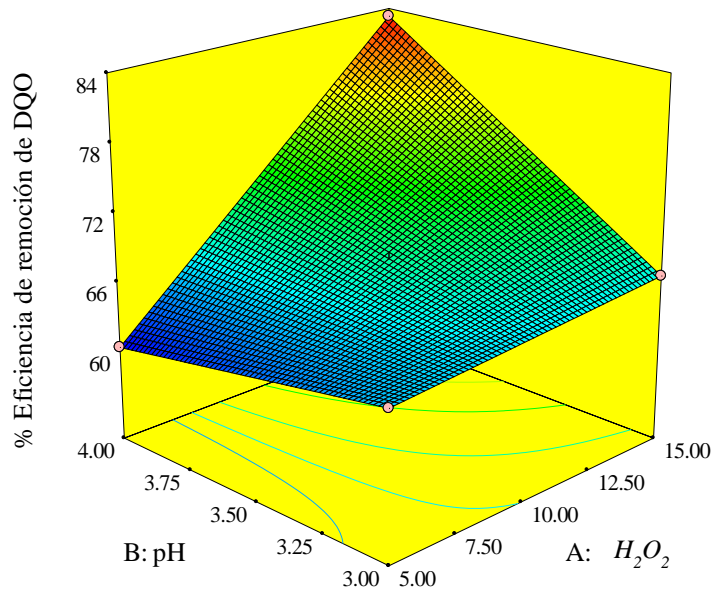


Figura 14a. Superficie de respuesta

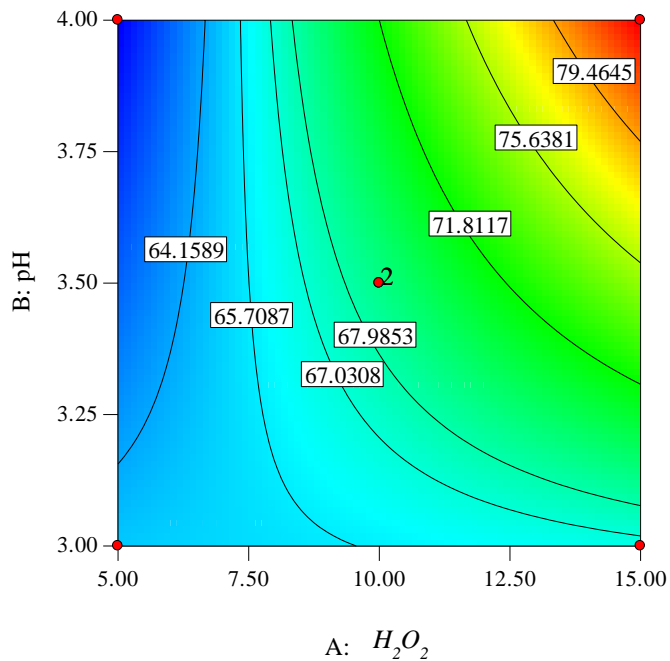


Figura 14b. Grafica de contorno

Figura 14. Efecto de la dosis de $[H_2O_2]$ y pH para el % eficiencia de reducción de DQO.

En la Figura 14, se visualiza que se pueden obtener un alto porcentaje de eficiencia de reducción de DQO de 79.46% en el intervalo de dosis de peróxido de hidrógeno de 13 a 15 mL y pH de 3.75 a 4.00.

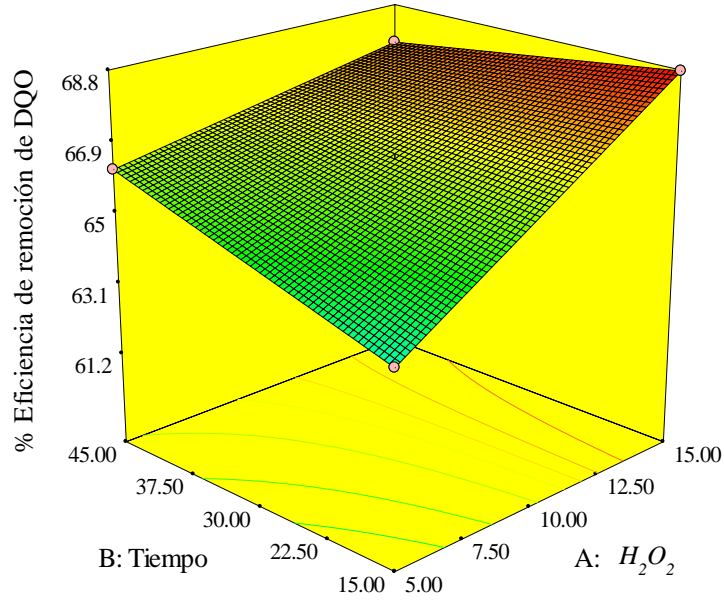


Figura 15a. Superficie de respuesta

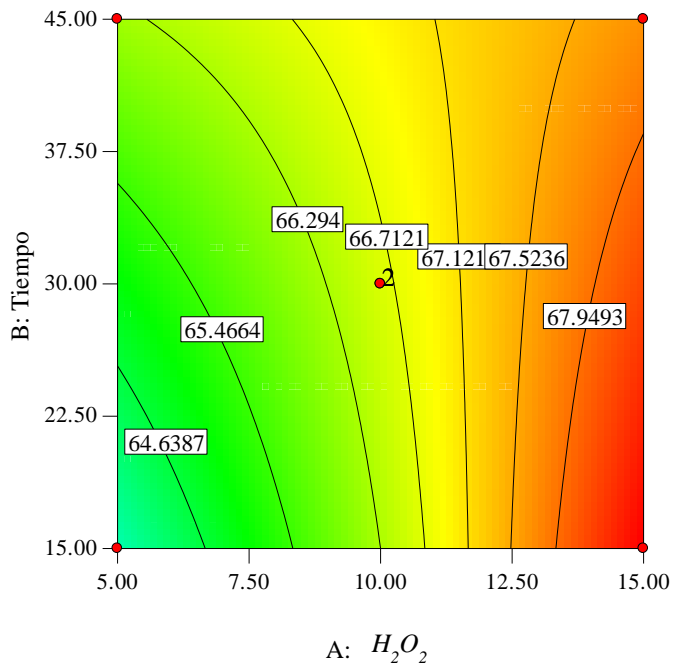


Figura 15b. Grafica de contorno

Figura 15. Efecto de la dosis de $[H_2O_2]$ y tiempo de tratamiento para el % eficiencia de reducción de DQO.

En la figura 15, se observa que el intervalo dosis de peróxido de hidrógeno 13 a 15 mL y tiempo de tratamiento de 15 a 37.5 minutos se obtiene un porcentaje de eficiencia de reducción de DQO de 67.95%.

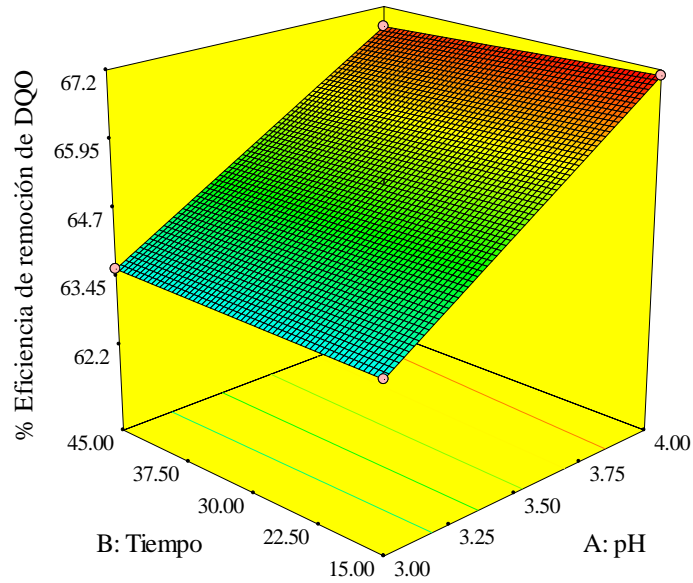


Figura 16a. Superficie de respuesta

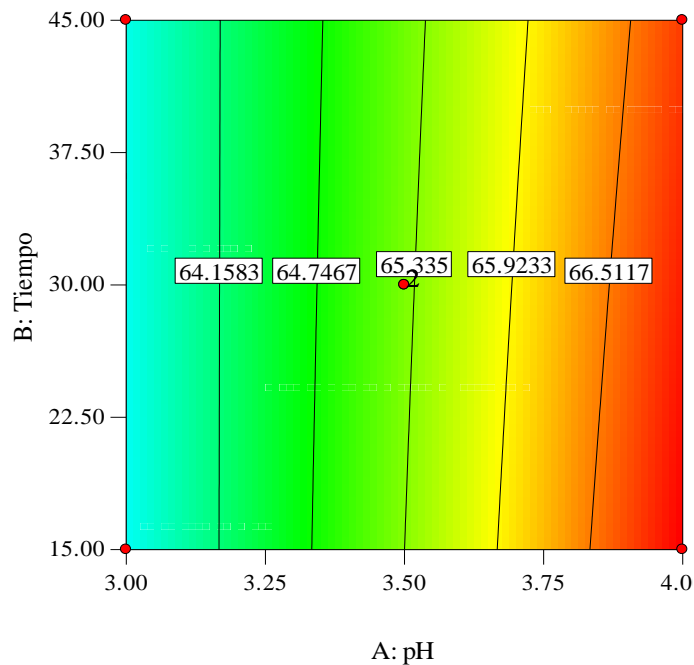


Figura 16b. Grafica de contorno

Figura 16. Efecto de la dosis de pH y tiempo de tratamiento para el % eficiencia de reducción de DQO.

En la Figura 16, se observa que en el rango de pH de 3.8 a 4 y tiempo de tratamiento de 15 a 45 minutos se obtiene un porcentaje de eficiencia de reducción de DQO de 66.51%.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- 5.1.1. Los valores determinados mediante la caracterización físico-química de los lixiviados de residuos sólidos de la celda transitoria de Huanuyo, señalan elevadas concentraciones de materia orgánica con valores de parámetros resaltantes como la DBO₅ de 5140 mg/L y la DQO de 61300 mg/L, evidenciando ser un aspecto ambiental significativo de contaminación de los cuerpos receptores si este llegara a verterse sin previo tratamiento, alterando el correcto y natural desarrollo del ecosistema. Se determinó también un valor inicial de 6.8 para el pH; así como el índice de biodegradabilidad del lixiviado crudo, alcanzando un valor de 0.08 lo que denota que el agua residual es “no biodegradable”, concluyendo que utilizar tratamientos basados en tecnologías biológicas serian ineficientes y las menos adecuadas para tratar lixiviados con altas concentraciones de materia orgánica.
- 5.1.2. El mayor porcentaje de eficiencia de reducción de la materia orgánica se obtuvo en las condiciones evaluadas de una dosis de 15 mL/L de peróxido de hidrogeno (H₂O₂ al 50%) y 2000 mg/L de Fe²⁺ (FeSO₄.7H₂O al 99.9%), un pH de 4 y tiempo de contacto de 30 minutos; logrando reducir el lixiviado crudo con valores de 61300 mg/L a 10243 ppm de DQO final, lo que representa un valor de 83.29% de eficiencia del tratamiento por oxidación avanzada foto-fenton, que si bien contiene aun altas concentraciones de contaminante orgánico, este efluente pasó a ser un agua residual “biodegradable” con un IB = 0.5, lo que significa que puede acompañarse procesos biológicos como tratamientos posteriores al de oxidación avanzada. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula y se comprueba que los procesos de oxidación avanzada tipo foto-fenton cuentan con un elevado potencial para el tratamiento de aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica como son los lixiviados de residuos sólidos, mejorando a su vez el color y olor, así como la biodegradabilidad del efluente tratado.

5.2. RECOMENDACIONES

- 5.2.1. Debido a que el residual de los lixiviados tratados contienen aun altas concentraciones de materia orgánica, se recomienda aplicar tratamientos adicionales fundamentados en procesos biológicos, debido a que este efluente mejoró también su índice de biodegradabilidad, además que un post-tratamiento biológico posibilitará la reducción de otro de los contaminantes más resaltantes de los lixiviados que es el nitrógeno amoniacal, con el fin de estudiar la combinación de ambos métodos de tratamiento y evaluar su viabilidad técnica y económica.
- 5.2.2. Antes de realizar las pruebas de oxidación foto-fenton en lixiviados, se recomienda ablandar estas aguas, debido a que en su mayoría presentan alta dureza, actuando como soluciones buffer y requiriendo la adición de volúmenes considerables de reactivos como H_2SO_4 , lo que se traduce en costos de operación.
- 5.2.3. Asimismo, se recomienda ampliar la investigación del tratamiento foto-fenton a una escala de planta piloto, experimentando el empleo de la radiación solar como fuente de radiación UV, reemplazando la lampara UV en el tratamiento de oxidación avanzada foto-fenton, determinando a su vez las ventajas tecnológicas, económicas y ambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulhussain, A., Guo, J., Liu, Z., Pan, Y. y Wisaam, S. (2009). Journal of applied sciences research, 5 (5), 534-545.
- Ayala, J. & Pardo, R. (1995). Optimización por diseños experimentales. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Editorial A&B S.A. Lima, Perú.
- Amiri, A., & Sabour, M. (2014). Multi-response optimization of fenton process for applicability assessment in landfill leachate treatment. Waste Management, 34(12), 2528-2536.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.010>
- Astorga, C. (2018). Tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario: Propuesta y evaluación de un sistema de humedales artificiales. Trabajo de fin de grado, Universidad de Chile.
<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152920>
- Astorga, E. (2018). Tratamiento de lixiviados del botadero de residuos sólidos de la ciudad de Puno con surfactantes aniónicos. Universidad Nacional de Altiplano.
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/10647>
- Bakare, A., Mosuro, A., y Osibanjo, O. (2005). An in vivo evaluation of induction of abnormal sperm morphology in mice by landfill leachates. Mutation Research, 582(1– 2), 28–34.
<https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2004.12.007>
- Barrantes, N. (2020). Reducción de tres parámetros fisicoquímicos del lixiviado del botadero controlado “La Pushura”, mediante proceso de oxidación avanzada (POA). Jaén - Cajamarca.
- Bes, S. Silva, A. Bengoa, C. (2016). Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales. Pags 60.
https://www.cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf
- Bigda, R. (1995). Consider fenton’s chemistry for wastewater treatment. Chem. Eng. Prog. 91, 62–66
- Borzacconi L., López I. y Anido C. (1996). Metodología para la estimación de la producción y concentración de lixiviado de un relleno sanitario. XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. México D.F. Tomo III.

- Box, G. and Behnken, D. (1960). Some new three level designs for the study of quantitative variables, *Technometrics*.
- Cerda, I. (2007). Aplicación de foto-fenton a lixiviados de rellenos sanitarios. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/360823>
- Chávez, W. (2011). Tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario de la ciudad de Chihuahua, México. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados. Chihuahua, Chihuahua, 102 pp.
- Corena, L. (2008). Sistemas de tratamientos para lixiviados generados en rellenos sanitarios. Tesis, Universidad de Sucre. Recuperado de: <https://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/001/304/2/628.44564C797.pdf>
- Costa, F., Campos, J., Fonseca, F., & Bila, D. (2015). Tratamiento de lixiviados de aterros de residuos sólidos utilizando procesos fenton e fotofenton Solar. *Revista Ambiente & Água*, 10, 107-116. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1483>
- De Soto, I., Ruiz, A., Ayora, C., García, R., Regadio, M. y Cuevas, J. (2012). Diffusion of landfill leachate through compacted natural clays containing small amounts of carbonates and sulfates. *Applied Geochemistry*, 27(6), 1202–1213. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.02.032>
- Deng, Y. & Englehardt, J. (2006). Treatment of landfill leachate by the fenton process. *Water research*, 40 (20), 3683-3694.
- Dianderas, C. (2011). Biolixiviación o lixiviación bacteriana. Tesis para el grado de Magister, UNSD-Chile.
- Domènech, W Jardim, M Litter. (2001). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. En: Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea. (M. Blesa, Ed.). Pp. 3-25. Red CYTED VIII-G, Buenos Aires, Argentina.
- Faggiano, A., Carluccio, M., Cerrato, F., Garcia, C., Proto, A., Fiorentino, A. y Rizzo, L. (2023). Improving organic matter and nutrients removal and minimizing sludge production in landfill leachate pre-treatment by fenton process through a comprehensive response

surface methodology approach. *Journal of Environmental Management*. Volume 340. 117950. ISSN 0301-4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117950>

Fuentes, R., Ramos, J., Jiménez, M., & Esparza, M. (2015). Caracterización de la materia orgánica disuelta en agua subterránea del Valle de Toluca mediante espectrofotometría de fluorescencia 3D. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 31(3), 253-264.

Fuentes y Muñoz (2021) Formulación de alternativas para el manejo adecuado de los lixiviados generados en el relleno sanitario regional de la madera en el municipio de Ocaña Norte de Santander. Ocaña – Colombia.

García, J. (2007). Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for commercial reactive azo dyes removal. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona. España.

García, P. (2018). Manejo y tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios. Universidad de Santiago de Cali. Colombia.

Gamarra, C. y La Rosa, A. (2014). Decoloración del anaranjado de metilo empleando el sistema fenton. *Rev Soc Quím Perú*.

Hirata, R. (2002). Carga contaminante y peligros a las aguas subterráneas. *Revista Latino-Americana de hidrogeología*. 2, 81-90. Recuperado de: <https://revistas.ufpr.br/hidrogeologia/article/view/2624>

IDEAM. (2007). Subdirección de hidrología – Grupo laboratorio de calidad ambiental. Código: TP0087. Versión 02.

Jaramillo, A., Echavarría, A. & Hormaza, A. (2013). Diseño Box-Behnken para la optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores. *Ingeniería y Ciencia*, 9(18), 75-91.

Jerez, J. (2013). Reducción de metales pesados en lixiviados mediante fitorremediación. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ciencias. Escuela de Química. San José. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/1890>

- Kjeldsen, Barlaz, M. Rooker, A. Baun, A. Ledin A. & Christensen, T. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review, critical reviews in environmental science and technology, 32:4, 297-336, DOI: [10.1080/10643380290813462](https://doi.org/10.1080/10643380290813462)
- Kwarciak & krzywicka (2015). Effect of ultrasonic field to increase the biodegradability of coke processing wastewater. archives of waste management and environmental protection. Vol. 17, 3: 133-142.
- Lau I., Wang P. y Fang H. (2001). Organic removal of anaerobically treated leachate by Fenton coagulation. J. Environ. Eng.7, 666-669.
- Legrini, O., Oliveros, E. and Braun, A. (1993). Photochemical process for water-treatment. Chemical Reviews, 93, 671 - 698. <http://dx.doi.org/10.1021/cr00018a003>
- León, J. G., Godoy, S. C., & Guevara, M. A. (2020). Eficiencia socio ambiental de la reacción fenton en el tratamiento de lixiviados. Ciencia digital, 4(3), 271-285. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i3.1334>
- León, H., Cruz, C., Dávila, A., Velazco, F., y Chapa, J. (2015). Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 32 (3), 514-526.
- Litter, M. Dwojak, A. López, I. Escalada, G. Vera, M & Traid, H. (2022) Application of a fenton process after a biological nitrification treatment: A successful case for leachate treatment. ScienceDirect <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100208>
- Loza, T. (2020). Análisis del conflicto socioambiental originado por la gestión y disposición final de residuos sólidos municipales en el botadero del centro poblado de Chilla, Juliaca, 2019. Pontificia Universidad Católica del Perú – PUCP. Lima, Perú.
- M. S. Eljaiek, Torres, L y Bermúdez, W. (2013) Alternativas de tratamiento de lixiviados aplicables al relleno sanitario parque ambiental Loma de los Cocos de la ciudad de Cartagena, Colombia. Hacia un sistema de gestión integral de los residuos sólidos, Cartagena: Redisa, pp. 1-6.
- Mahtab, M., Islam, D., & Farooqi, I. (2020). 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://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098620312234>

Martínez, A., Padrón, W., Rodríguez, O., Chiquito, O., Escarola, M., Hernández, J., Elvira, E., Méndez, G., Tinoco, J., & Martínez, J. (2014). Alternativas actuales del manejo de lixiviados. Avances en química Vol. 9 núm. 1. Mérida – Venezuela. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93330767005>

Medrano, R. (2017). Tratamiento de lixiviados del botadero de residuos sólidos de la ciudad de Puno por el proceso de coagulación y floculación. Universidad Nacional del Altiplano. Pags. 1 - 89.

Medina, C., Montero, E., y Cruz, L. (2016). Optimización del proceso fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Rev Soc Quím Perú, 8(4), 454–466. Retrieved from <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v82n4/a07v82n4.pdf>

Méndez, R., García, R., Castillo, E., & Sauri, M. (2010). Tratamiento de lixiviados por oxidación fenton. Ingeniería e Investigación, 30(1),80-85. ISSN: 0120-5609. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64312498015>

Méndez, R., May, A., San Pedro, L., & Rojas, M., Giácoman, G. (2019). Leachate treatment with a combined fenton/filtration/adsorption processes. Ingeniería Investigación y Tecnología, 20(2), 1-9. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.013>

Méndez, R. Novelo, A. Coronado, V. Castillo, E. y Sauri, M. R. (2008) Reducción de materia orgánica y metales pesados de lixiviados por flotación con aire disuelto.

Méndez, R., Pietrogiovanna, J., Santos, B., Sauri, M., Giácoman, G. y Castillo, E. (2010). Determinación de la dosis óptima de reactivo fenton en un tratamiento de lixiviados por fenton-adsorción. Revista internacional de contaminación ambiental, 26(3), 211-220. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37014384004>

Metcalf & Eddy Inc. (2004). Wastewater engineering. Boston, USA: McGraw_Hill.

Municipalidad Provincial de San Román (2015). Estudio de caracterización de residuos sólidos del distrito de Juliaca. Puno, Perú.

- Municipalidad Provincial de San Román. (2016). Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la provincia de San Román. Puno, Perú.
- Municipalidad Provincial de San Román. (2022). Manual de operación y mantenimiento de las celdas transitorias de Huanuyo. Puno, Perú.
- Muñoz I. (2006). Life cycle assessment as a tool for green chemistry: application to different advanced oxidation processes for wastewater treatment. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona. España.
- Nawaz, T., Rahman, A., Pan, S., Dixon, K., Petri, B., Selvaratnam, T. (2020). A review of landfill leachate treatment by microalgae: Current status and future directions. *processes*, 8, 384.
- Nercolini J., Hoefling D., Trevisan V., & Skoronski, E. (2019). Application of the fenton and fenton-like processes in the landfill leachate tertiary treatment. *Journal of environmental chemical engineering*, 7(5). 103352. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103352>
- Noguera, K y Olivero, J. (2020) Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano. *Acad. Colomb. Cienc. Exact. Fis. Nat.*, vol. 34, n° 132, pp. 347-356.
- OEFA (2015). Fiscalización ambiental en residuos sólidos de gestión municipal provincial. Índice de cumplimiento de los municipios provinciales a nivel nacional. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Ministerio del Ambiente. Lima, Perú. 135 p.
- Oppenlander T. (2003). Photochemical purification of water and air. Advanced oxidation processes (AOPs): principles, reaction mechanisms, reactor concepts. Wiley-VCH, Weinheim, Alemania.
- Organización Panamericana de la Salud - OPS. (2010). Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe.
- Pérez, R. (2017). Plan de cierre y recuperación de áreas degradadas por residuos sólidos municipales en el botadero de San José - Andahuaylas, Apurímac. Tesis de Fin de Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina.

- Primo, O. (2008). Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada. Tesis Doctoral. Santander: Universidad de Cantabria.
- Quintero, A., Valencia, Y., Lara, L. (2017). Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en un suelo tropical. DYNA, 84 (203), 283- 290.
- Red Muqui (2020). Inadecuada gestión y manejo de los residuos sólidos y el coronavirus en Puno. Muqui.org. Lima, Perú. <https://muqui.org/noticias/inadecuada-gestion-y-manejo-de-los-residuos-solidos-y-el-coronavirus-en-puno/>
- Regadío, M. Ruiz, A. De Soto, I., Rodriguez Rastrero, M., Sánchez, N., Gismera, M. J., Cuevas, J. (2012). Pollution profiles and physicochemical parameters in old uncontrolled landfills. Waste Management, 32(3), 482–497. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.008>
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P. (2008). Lanfill leachate treatment: Review and opportunity. Journal of Hazardous Materials. 150, 468-493.
- REMTAVARES (2012). Biodegradabilidad de efluentes resultantes del tratamiento de clorofenoles mediante hidrodechloración catalítica. Recuperado de: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2012/12/10/131836>
- Robles M. F. (2005). Generación de biogás y lixiviados en los rellenos sanitarios. 1ª ed. Instituto Politécnico Nacional. México 108 p.
- Rosales, R. (2017). Reducción del contenido de colorantes en efluentes de la industria textil usando el proceso fenton, Zarate, 2017. Lima Perú.
- Sáez, Alejandrina, & Urdaneta G., Joheni A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. Omnia, 20(3),121-135. ISSN: 1315-8856. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73737091009>
- Salas, A. (2008). Tratamiento de las aguas residuales de una refinería de petróleo por oxidación avanzada (AOX), usando el reactivo fenton (H_2O_2 / FE^{2+}). Rev Per Quim Ing Quim.
- Salas G. (2010). Tratamiento por oxidación avanzada (reacción fenton) de aguas residuales de la industria textil. Rev Per Quim Ing Quim. 2010; 13 (1): 30-38. 9.

- Sandoval, L. (2009). Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de mantenimiento de relleno sanitario mecanizado. Lima, Perú.
- San Pedro, L., Méndez, R., Hernández, E., Giacomán, G., & Bassama, A. (2019). Removal of BPA from landfill leachates using fenton-adsorption process. *Química nova*, 42(4), 418-424. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170354>
- Seibert, D., Quesadaa, H., Bergamascoa, R., Borba, F. H., & Pellenz, L. (2019). Presence of endocrine disrupting chemicals in sanitary landfill leachate, its treatment and degradation by fenton based processes: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 131, 255–267. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582019315101>
- Sharma, S., Ruparelia, J. P., & Patel, M. L. (2011). A general review on Advanced Oxidation Processes for waste water treatment. In Nirma University International Conference, Ahmedabad, Gujarat.
- Tchobanoglous, George (1997). *Gestión integral de residuos sólidos*. Madrid. Editorial Mc Graw - Hill.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1998). *Gestión Integral de residuos sólidos*. Madrid: McGraw Hill.
- Tchobanoglous, G., Kreith, F. (2002). *Handbook of Solid waste management*. Segunda edición. 834 pp.
- Torres, P., Barba, L., Ojeda, C., Martínez, J., Castaño, Y. (2014). Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico química y su potencial de toxicidad. *Actualidad y divulgación científica*, 17 (1), 245-255.
- USEPA (2004). EPA-822R04005. Drinking water standards and health advisories. National Primary Drinking Water Standards. United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C., EUA, 20 pp.
- Valderrama, J. (2018). Evaluación ambiental del botadero de Haqira, distrito de Santiago Cusco, mediante la metodología Eviave. Tesis de Fin de Grado, Universidad Nacional Federico Villarreal. <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2252>

- Vásquez, A., Iannacone, J., Peña, A., Romero, L. (2022). Tratamiento de lixiviados por oxidación avanzada: Una revisión. Lima, Perú. <https://doi.org/10.24265/campus.2022.v27n33.04>
- Wadley S. y Waite T.D. (2004). Fenton processes, en Parsons S. (Ed.) Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. IWA Publishing, Londres, UK. Capítulo 5, 111 – 136.
- Yaranga, J. (2021) Eficiencia de la oxidación fenton y foto fenton en la reducción de DQO en lixiviados del botadero “El Porvenir”, distrito de El Tambo, Huancayo, Junín. Universidad Cesar Vallejo. URI <https://hdl.handle.net/20.500.12692/63563>
- Ye, Z. Zhang, H. Yang, L. Wu, L. Qian, Y. Geng, J. y Chen, M. (2016). Effect of a solar Fered-Fenton system using a recirculation reactor on biologically treated landfill leachate. J. Hazard Mat, vol. 319, pp. 51-60.
- Yoo H., Cho S. y Ko S. (2001). Modification of coagulation and fenton oxidation processes for cost-effective leachate treatment. J. Environ. Sci. Heal.A36, 39-48
- Zafra, C. y Romero, D. (2019). Tendencias tecnológicas de depuración de lixiviados en rellenos sanitarios iberoamericanos. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Vol 18. Pags 125 – 14
- Ziyang, L., Youcai, Z., Tao, Y., Yu, S., Huili, C., Nanwen, Z., Renhua, H. (2009). Natural attenuation and characterization of contaminants composition in landfill leachate under different disposing ages. Science of the Total Enviroment, 407, 3385-3391.

ANEXOS

Anexo 1.
Registro fotográfico



Figura 17. Visita de diagnóstico a las celdas transitorias de Huanuyo



Figura 18. Muestreo de lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo para su caracterización y tratamiento.

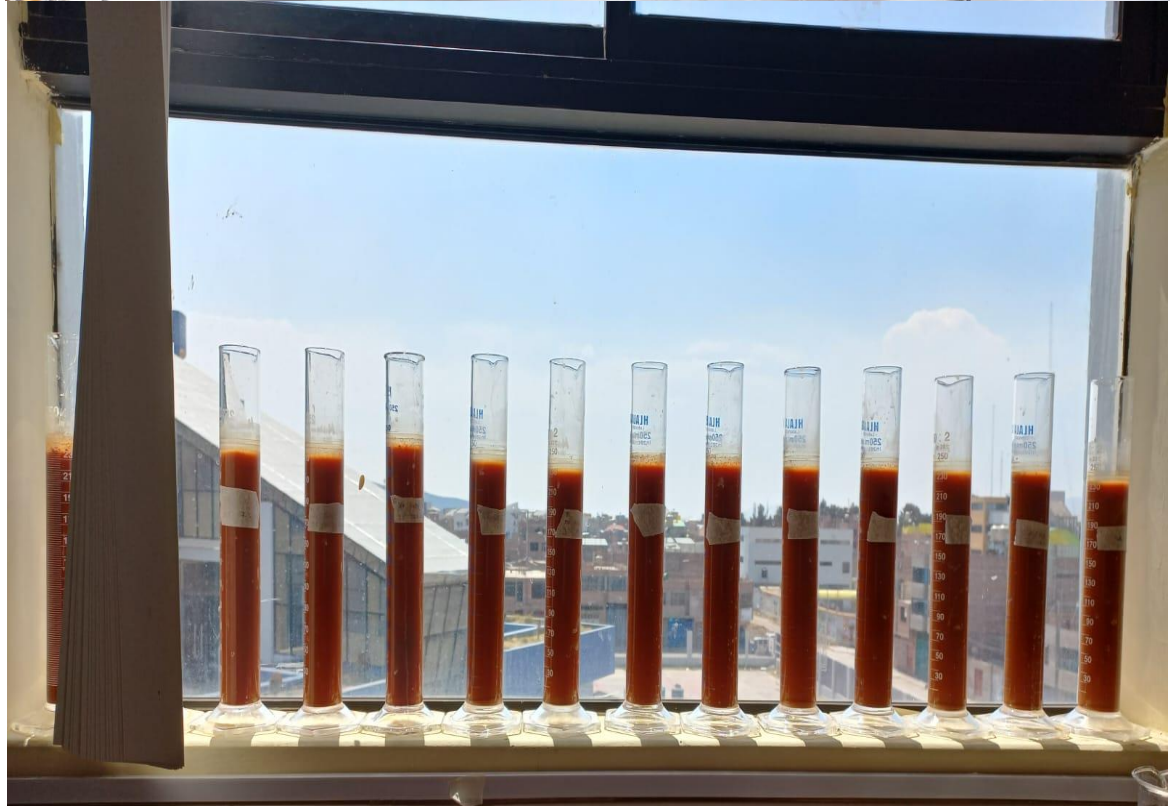


Figura 19. Proceso de tratamiento de oxidación avanzada foto-fenton



Figura 20. Calidad de las muestras luego del tratamiento de oxidación foto-fenton



Figura 21. Preparación de solución digestora y viales para determinación de DQO



Figura 22. Lectura de viales digeridos para determinación de la DQO mediante absorbancia en el espectrofotómetro UV

Anexo 2.
Informes de ensayo de laboratorio

INFORME DE ENSAYOS N° 5684- 2022
PÁGINA 1 DE 4

SOLICITANTE : JHOEL TICONA RAMOS
DIRECCIÓN : JR. SANDIA 1557 - JULIACA - PUNO
PRODUCTO DECLARADO : AGUA RESIDUAL (LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO)
DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO : Líquido muy turbio color negro.
CODIFICACIÓN / MARCA : Lixiviados - Celda transitoria de Huanuyo. (M - 01)
DATOS DECLARADOS POR EL CLIENTE : 27/10/2022 10:30 Procedencia: N:8264262 - E: 334304 / Puno - San Román - Cabanillas.
TAMAÑO DE MUESTRA RECIBIDA : 01 muestra de 4000 mL aprox. Compuesta de 01 envase PET de 1000 mL para análisis MB y 01 envase PET de 1000 mL, 04 envases PET de 500 mL c/u. para análisis FQ.
PRESENTACIÓN, ESTADO Y CONDICIÓN : En envases PET cerrados. En contenedor isotérmico a una temperatura de 4.3°C.
CONDICIONES DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : Recibida en el Laboratorio (Envases Proporcionados)
CONTRAMUESTRA Y PERIODO DE CUSTODIA : Ninguna (por ser muestra única)
FECHA PRODUCCIÓN : No especificada
FECHA DE VENCIMIENTO : No especificada
CONTRATO N° : 1762-2022
FECHA DE RECEPCIÓN : 27/10/2022

CONDICIONES DE USO DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS:

- El presente Informe de Ensayos tan sólo es válido únicamente para la Muestra analizada / el Lote muestreado , según sea el caso.
- No deben inferirse a la Muestra analizada o al Lote muestreado otros parámetros que no estén consignados en el presente Informe de Ensayos.
- En caso de que el producto haya sido muestreado por el cliente (Muestra recibida en laboratorio), BHIOS LABORATORIOS no se responsabiliza si las condiciones de muestreo no fueron las adecuadas, los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
- En caso de que el producto haya sido muestreado por BHIOS LABORATORIOS , la presentación, estado y condición del lote corresponden a las encontradas al momento del muestreo.
- Los datos declarados por el cliente son consignados a solicitud expresa del mismo cliente y no son necesariamente verificados por el Laboratorio, por lo que BHIOS LABORATORIOS no asume responsabilidad por el uso de los mismos.
- El Período de Custodia es dependiente del tipo de ensayo y de la disponibilidad de la Muestra.
- BHIOS LABORATORIOS no guarda contramuestras de productos perecibles o de productos cuyas características pudieran variar durante el almacenamiento.
- El presente Informe de Ensayos no es un certificado de conformidad, ni certificado del sistema de calidad del productor.
- Está terminantemente prohibida la reproducción parcial de este Informe de Ensayos sin el conocimiento y la autorización escrita de BHIOS LABORATORIOS.
- Cualquier modificación, borrón o enmienda, anula el presente Informe de Ensayos.

INFORME DE ENSAYOS N° 5684- 2022
PÁGINA 2 DE 4

RESULTADOS

LAB	DETERMINACIÓN	AGUA RESIDUAL (LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO)	UNIDADES
		Lixiviados - Celda transitoria de Huanuyo. (M - 01)	
MB	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)**	5140	mg/L
FQ	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	61300	mg/L
FQ	Nitrógeno (Amoniac) (NH ₃ -N)*	2220.81	mg/L
FQ	Sólidos Totales	83413	mg/L
FQ	Alcalinidad (CaCO ₃)*	1623581.25	mg/L
FQ	Dureza Total (como CaCO ₃)*	8350.72	mg/L

ABREVIATURAS:

mg/L

: Miligramos por litro

MÉTODOS UTILIZADOS :

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WEF Part 5000. 5210-B Biochemical Oxygen Demand (BOD): 5 day BOD Test. 23rd Ed. 2017.
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WEF. Part 5000 Method 5220 D Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method. 23rd Ed. 2017.
Nitrógeno (Amoniac) (NH ₃ -N)	: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WEF. Method 4500-NH3D. Nitrogen (Ammonia). Ammonia-Selective Electrode Method. 23rd Ed. 2017.
Sólidos Totales	: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WEF. Part 2000. Method 2540-B. Solids. Total Solids Dried at 103-105°C. 23rd Ed. 2017.
Alcalinidad (CaCO ₃)	: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WEF. Method 2320 B. Alkalinity Titration Method 23rd Ed. 2017.
Dureza Total (como CaCO ₃)	: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WEF. Part 2000. Method 2340-C. EDTA Titrimetric Method 23rd Ed. 2017.

OBSERVACIONES :

* Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL-DA

**Estos métodos quedan fuera del alcance de la acreditación del INACAL-DA debido a las siguientes observaciones a la aptitud de la muestra al momento de la recepción (Autorizado y aceptado por el cliente):

LD: Límite de detección del método.

LC: Límite de cuantificación del método.

Demanda Bioquímica de Oxígeno: Frasco de polietileno primer uso o vidrio limpio (completamente lleno, sin burbujas), muestra en envase con burbujas.

campo en blanco dejado intencionalmente

INFORME DE ENSAYOS N° 5684 - 2022
PÁGINA 3 DE 4

Metales Totales por ICP-MS

LAB	DETERMINACIÓN	LD	LC	AGUA RESIDUAL (LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO)	UNIDADES
				Lixiviados - Celda transitoria de Huanuyo. (M - 01)	
FQ	Ag (Plata)*	0,00001	0,01900	0.00031	mg/L
FQ	Al (Aluminio)*	0,004	0,219	1.27	mg/L
FQ	As (Arsénico)*	0,000004	0,02200	0.19846	mg/L
FQ	B (Boro)*	0,001	0,368	4.946	mg/L
FQ	Ba (Bario)*	0,0001	0,0500	1.446	mg/L
FQ	Be (Berilio)*	0,000003	0,02000	0.00026	mg/L
FQ	Bi (Bismuto)*	0,00002	0,02000	0.0006	mg/L
FQ	Ca (Calcio)*	0,010	18,333	2199	mg/L
FQ	Cd (Cadmio)*	0,000001	0,02100	0.00493	mg/L
FQ	Ce (Cerio)*	0,000003	0,02000	0.03454	mg/L
FQ	Co (Cobalto)*	0,000001	0,02000	0.40985	mg/L
FQ	Cr (Cromo)*	0,00001	0,02000	0.64190	mg/L
FQ	Cs (Cesio)*	0,000002	0,02000	0.10979	mg/L
FQ	Cu (Cobre)*	0,0002	0,021	0.086	mg/L
FQ	Fe (Hierro)*	0,002	4,023	334.3	mg/L
FQ	Hg (Mercurio)*	0,0001	0,0020	0.0013	mg/L
FQ	K (Potasio)*	0,004	7,548	3284	mg/L
FQ	Li (Litio)*	0,00002	0,03600	0.65491	mg/L
FQ	Mg (Magnesio)*	0,004	8,166	470.30	mg/L
FQ	Mn (Manganeso)*	0,00003	0,0260	102.8	mg/L
FQ	Mo (Molibdeno)*	0,00002	0,0210	0.0118	mg/L
FQ	Na (Sodio)*	0,010	15,356	2907	mg/L
FQ	Ni (Niquel)*	0,00001	0,02100	0.7761	mg/L
FQ	P (Fosforo)*	0,004	0,201	29.65	mg/L
FQ	Pb (Plomo)*	0,00004	0,0200	0.0838	mg/L
FQ	Sb (Antimonio)*	0,00002	0,02100	0.0541	mg/L
FQ	Se (Selenio)*	0,00002	0,0200	0.0077	mg/L
FQ	Si (Silicio)*	0,020	4,578	43.54	mg/L
FQ	Sn (Estaño)*	0,00002	0,02000	0.1518	mg/L
FQ	Sr (Estroncio)*	0,0001	0,3720	6.199	mg/L
FQ	Ti (Titanio)*	0,00004	0,0200	0.3174	mg/L
FQ	Tl (Talio)*	0,000004	0,02000	0.00103	mg/L
FQ	U (Uranio)*	0,000003	0,02000	0.00067	mg/L
FQ	V (Vanadio)*	0,0001	0,0210	0.0804	mg/L
FQ	Zn (Zinc)*	0,001	0,027	1.747	mg/L

ABREVIATURAS:

mg/L : Miligramos por litro

MÉTODOS UTILIZADOS :

Metales Totales por ICP-MS : EPAMETHOD 6020 B, Rev. 22014 Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (VALIDADO - Modificado) (VALIDADO - Aplicado fuera del alcance) 2020

OBSERVACIONES :

* Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL-DA

**Estos métodos quedan fuera del alcance de la acreditación del INACAL-DA debido a las siguientes observaciones a la aptitud de la muestra al momento de la recepción (Autorizado y aceptado por el cliente):

LD: Límite de detección del método.

LC: Límite de cuantificación del método.

Demanda Bioquímica de Oxígeno: Frasco de polietileno primer uso o vidrio limpio (completamente lleno, sin burbujas), muestra en envase con burbujas.

INFORME DE ENSAYOS N° 5684- 2022
PÁGINA 4 DE 4

FECHAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS : FQ 27/10/2022 al 04/11/2022

MB 27/10/2022 al 03/11/2022

FECHA DE EMISIÓN DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS : 07/11/2022



[Signature]
Bto. Miguel Valdivia Martínez
Gerente Técnico

Fin del Informe

Anexo 3.
Cadena de custodia



REGISTRO DE ENVIO DE MUESTRAS DEL CLIENTE

Estimado cliente: Agradecemos complete los datos solicitados.

Cliente / Razón Social	JHOEL AMAORR TICONA RAMOS / UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA	
Dirección	AV. NUEVA ZELANDIA N° 631 RUC: 20448261272	
Nombre del muestreador	JHOEL AMAORR TICONA RAMOS	
Cotización de referencia	A-3236-2022	

Numeración	NOMBRE DE LA MUESTRA (Identifique la muestra de acuerdo a como desea que aparezca en el Informe de Ensayos)	CODIFICACIÓN (opcional)	MATRIZ (Identifique la Matriz según el cuadro *) Nota: Solo para agua	PROCEDENCIA (Coordenadas, Departamento, Provincia, Distrito, etc) (Opcional)	FECHA DEL MUESTREO	HORA DEL MUESTREO	Colación N°	Determinaciones solicitadas		Total de envases por muestra (Und)	Cantidad Total (ml o g por Muestra)
01	LIXIVIADOS CELDA TRANSITORIA DE HUANCAYO	M-01	ARM (Minúsculas) N: 824262 E: 334304 PUNO - SAN ROMAN - CADAVILLAS		27/10/22	10:30	3236-22			06	3L.
02											
03											
04											
05											

NOTAS IMPORTANTES:

- En cada fila ingresar una muestra (frasco y conjunto de frascos tomados en un mismo punto)
- Condiciones de envío (**Para Aguas**) : En contenedor isotérmico con icepacks o gepacks que proporcione una temperatura de 4±2°C durante todo el transporte

** Matrices de agua (Indique las iniciales correspondientes en el cuadro de detalle de muestras)	Natural ASM: Subterránea de Manantial AST: Subterránea Termal ASR: Superficial de Río ASL: Superficial Lago/Laguna ASD: Deposition Atmosférica	Para Uso y Consumo Humano ACB: Bebida - Potable ARI: Industrial ARM: Municipal	Residual ARD: Doméstica ARI: Industrial ARM: Municipal	De Proceso APR: Inyección y reinyección APC: Circulación o enfriamiento APA: Alimentación pl calderas APCL: Calderas	Salina ANAR: Mar ASSB: Salobre ASSL: Salmuera ASIR: Inyección y Reinyección
--	---	---	---	--	---

Observaciones:	Fecha y Hora de Envío de Muestras: 27/10/2022
	Via Utilizada: Terrestre
	Posibles Sustancias Interferentes: Temperatura y Movimiento

RECIBIDO POR:	Fecha:	Hora:	Temperatura Recepción (°C)
OBSERVACIONES			

Anexo 4.
Método de determinación de la DQO

Método simplificado para la determinación de la DQO

1. Reactivos:

a. Solución patrón de biftalato de potasio

- Se pesa 0.6802 g. de biftalato de potasio y se diluye con agua destilada aforando en una fiola de 1L.

b. Reactivo de digestión

- Se prepara disolviendo en una fiola de 1L., 500 ml de agua destilada, 12.259 g. de dicromato de potasio, 167 ml de ácido sulfúrico y 33.3 g. de sulfato de mercurio, se presenta una reacción exotérmica en la cual se tiene que agitar con mucho cuidado hasta lograr disolver por completo el sulfato de mercurio.
- Luego se enrasa con agua destilada hasta completar 1L. de solución digestora que toma una coloración anaranjada.



c. Solución de ácido sulfúrico

- Se disuelve 22 g. de sulfato de plata en 2.5 litros de ácido sulfúrico concentrado.

2. Procedimiento

- Se coloca 2.5 ml de la muestra en el tubo o vial
- Se adiciona 1.5 ml de la solución digestora.
- Se agrega 2.5 ml de la solución de ácido sulfúrico que contiene sulfato de plata.
- Se coloca la tapa del vial y se agita la solución para producir una buena mezcla.
- Se lleva los viales al block de calentamiento (termo-reactor) a 150°C durante 2 horas.

- Pasada las 2 horas se espera a que enfríen las muestras digestadas, para que luego se determine el dicromato residual por titulación o colorimetría a una longitud de onda de 440 nm.

3. Preparación de la curva de calibración

- Se prepara los patrones para la curva de estandarización de la siguiente manera:

N.º	Dilución de solución patrón ml/100ml	DQO mg/l	ABS
1	5	40	—
2	10	80	—
3	20	160	—
4	30	180	—
5	40	240	—
6	50	300	—
7	60	360	—
8	70	420	—
9	80	480	—

- Se prepara una curva de calibración, unidades de absorbancia vs DQO.

Anexo 5.
Procesamiento de la data estadística

Puntos porcentuales de la distribución F: $F_{0.05, v_1, v_2}$

$v_2 \backslash v_1$	Grados de libertad del numerador (v_1)																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
2	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
3	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
4	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
5	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
6	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
7	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
8	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
9	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
10	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
11	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
12	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
13	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
14	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
15	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
16	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
17	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
18	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
19	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
20	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
21	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
22	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
23	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
24	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
25	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
26	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
27	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
28	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
29	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
30	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
40	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
60	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
∞	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39

Fuente: Montgomery (2004)

Anexo 6.
OFICIO N.º 092-2022/P-CO-UNAJ



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

Creada por ley N° 29074

Universidad Pública de Calidad

CARGO

"Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional"

Juliaca, 14 de junio del 2022

OFICIO N° 092-2022/P-CO-UNAJ

SEÑOR:

Sr. David Sucacahua Yucra

Alcalde de la Municipalidad Provincial de San Román

Juliaca/Puno

ATENCIÓN:

Blga. Luz Nancy Gallegos Fuentes

Jefa de la Unidad de Gestión de Residuos Sólidos



ASUNTO: Carta de Presentación de estudiante para desarrollar investigación en: Tratamiento de lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo.

Tengo el honor de dirigirme a usted, para saludarlo cordialmente a nombre de la Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ), para manifestarle que es deber de la Universidad Nacional de Juliaca, desarrollar Producción Científica, por ello presento al Bachiller Jhoel Amador Ticona Ramos, identificado con DNI N° 70756969, egresado de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Ambiental y Forestal de ésta Universidad; quien viene realizando una investigación científica en la línea del tratamiento de lixiviados de Residuos Sólidos.

Si bien es cierto, uno de los problemas más álgidos de la ciudad de Juliaca, es la gestión y manejo de los residuos sólidos, lo que ha generado la necesidad de desarrollar investigaciones en esta línea, teniendo como propuesta ejecutar el proyecto de Investigación: "Eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton para el tratamiento de los lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo - Juliaca 2022". En correspondencia, solicito tenga la amabilidad de otorgar al Investigador las **FACILIDADES PARA EL DESARROLLO DE ESTA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA, en el marco del convenio Interinstitucional**, consistentes en la visita a ésta infraestructura de disposición final de RRSS, así como la toma de muestras de la poza de lixiviados; para su posterior caracterización y tratamiento, de ésta manera tener resultados favorables como propuesta para el control de estos fluidos que se puedan aplicar en nuestra realidad.

Sin más, hago propicia la ocasión para expresarle las muestras de mis más sinceras consideraciones.

Atentamente.



Dr. Freddy Martin Marrero Saucedo
PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ORGANIZADORA

FVMS/jmr (Egresado EPLAy)
Cc / Arch.

Av. Nueva Zelanda N° 631 - Urb. La Capilla
Telf. 051 323200 - Juliaca - Perú
www.unaj.edu.pe

Universidad
LICENCIADA 

Anexo 7.

CARTA N.º 588-2022-MPSRJ/UGRS



Juliaca, 23 de setiembre de 2022.

CARTA N° 588 -2022-MPSRJ/UGRS

SEÑOR:

JHOEL AMADOR TICONA RAMOS

Presente. –

Asunto : Autorización para visita a la celda transitoria de Huanuyo

De mi especial consideración, mediante el presente me dirijo a usted, para saludarlo cordialmente y al mismo tiempo dar respuesta al documento de la referencia donde solicita autorización para la toma de muestra de lixiviados en la celda transitoria de Huanuyo.

Al respecto en atención a la solicitud de autorización a la disposición final de Huanuyo del distrito de Cabanillas, se queda a la espera para la toma de lixiviados para el día martes 27 de setiembre del presente a horas 10:00 am, para lo cual deberá contar con los siguientes puntos.

- ✓ El visitante deberá de estar 15 minutos antes de la hora acordada.
- ✓ El visitante deberá contar con su DNI físico para su previa confirmación documentaria.
- ✓ El visitante deberá portar su carnet de vacunación físico y/o virtual contra el Covid-19 (tercera dosis).
- ✓ El visitante deberá contar con sus respectivos EPPs adecuados para el ingreso a la disposición final (zapatos de seguridad, casco y lentes)

Asi mismo se le pone de conocimiento que al no contar con los parámetros importantes, no podrá ingresar a la disposición final, esto se da con la finalidad de salvaguardar su salud y seguridad del visitante y de los trabajadores que laboran en la celda transitoria de Huanuyo.

Sin otro particular, es todo cuanto informo a Ud. Para los trámites que correspondan.

Atentamente,



MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS
UNIDAD DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
Dña. Luz Nancy Galeas Fuentes
JEFE DE UGRS

Anexo 8.
Matriz de consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGIA	
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	V.D.				
¿Cuál será la eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton en la reducción de materia orgánica de los lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo?	Determinar la eficiencia del proceso de oxidación avanzada foto-fenton en la reducción de la materia orgánica del lixiviado de la celda transitoria de Huanuyo.	Debido a que el proceso de oxidación avanzada foto-fenton opera bajo parámetros optimizados, es factible que se alcance una eficiencia superior al 80% medible en reducción de materia orgánica en términos de DQO presente en el lixiviado de la celda transitoria de Huanuyo.	Tratamiento de Lixiviados		Eficiencia de Reducción de Materia Orgánica	DQO inicial – DQO final	<ul style="list-style-type: none"> i. Muestreo de lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo. ii. Caracterización física y química de los lixiviados. iii. Tratamiento de lixiviados por oxidación avanzada foto-fenton. iv. Análisis estadístico de resultados.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	V.I.				
<p>-¿Cuáles serán las características fisicoquímicas de los lixiviados generados en la Celda Transitoria de Huanuyo?</p> <p>-¿Cuáles serán las condiciones óptimas de eficiencia en función a la relación fenton, pH y tiempo de tratamiento para la reducción de la materia orgánica del lixiviado de la celda transitoria de Huanuyo mediante oxidación avanzada foto-fenton?</p>	<p>-Determinar las características físicas y químicas de los lixiviados generados en la celda transitoria de Huanuyo.</p> <p>-Evaluar y determinar las condiciones óptimas de la relación fenton, pH y tiempo de tratamiento para la reducción de la materia orgánica del lixiviado de la celda transitoria de Huanuyo mediante oxidación avanzada foto-fenton.</p>	<p>-Las características fisicoquímicas de los lixiviados de la celda transitoria de Huanuyo, serán de carácter no biodegradable que condicionan su tratamiento mediante procesos químicos de oxidación avanzada foto-fenton.</p> <p>-Se alcanzará la mayor eficiencia en determinados rangos de observación: dosis de [H₂O₂] de 15 ml/L, pH de 4 y tiempo óptimo de tratamiento de 45 minutos.</p>	Oxidación Foto-fenton		Condiciones de Tratamiento y Niveles de Observación	<p>Dosis de [H₂O₂]: 5, 10 y 15 ml/L</p> <p>pH: 3, 3.5 y 4</p> <p>Tiempo: 15, 30 y 45 min</p> <p>Fe²⁺: 2000 mg/L (cte.)</p>	

Anexo 9.
Operacionalización de variables

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICION
INDEPENDIENTE Oxidación foto-fenton	El proceso foto-fenton es una tecnología de tratamiento químico avanzado que se fundamenta en la generación de radicales OH^\cdot a partir del H_2O_2 , oxidando la materia orgánica no biodegradable.	Parámetros físico-químicos	H_2O_2	5 – 10 – 15 mg/L
			Fe^{2+} (cte.)	2000 mg/L
			pH	3 – 3.5 - 4 und
			TRH	15 - 30 – 45 min
DEPENDIENTE Tratamiento de lixiviados	Proceso técnico que sirve para mejorar la calidad de los cuerpos hídricos para su reaprovechamiento con otros propósitos.	% Eficiencia en reducción de materia orgánica	DQO	>80%



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

“Universidad Pública de Calidad”



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA

"Universidad Pública de Calidad"