



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL MEDIANTE  
FOTOCATÁLISIS EN LA LAGUNA DE OXIDACIÓN DE LA  
CIUDAD DE PUNO – 2024**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. ABRAHAM JIMENEZ PAYE**

**Bach. DORIS SONIA AÑACATA PACCARA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PUNO – PERÚ**

**2024**



# ABRAHAM JIMENEZ PAYE

## TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL MEDIANTE FOTOCATÁLISIS EN LA LAGUNA DE OXIDACIÓN DE LA CIUD...

 Universidad Nacional del Altiplano

### Detalles del documento

Identificador de la entrega  
trn:oid:::8254:417034998

Fecha de entrega  
17 dic 2024, 4:38 p.m. GMT-5

Fecha de descarga  
17 dic 2024, 4:42 p.m. GMT-5

Nombre de archivo  
4. Borrador DE TESIS TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL MEDIANTE FOTOCATÁLISIS EN LA LAG....docx

Tamaño de archivo  
17.8 MB

127 Páginas

16,066 Palabras

89,315 Caracteres





## 12% Similitud general

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

### Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

### Fuentes principales

- 11% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 7% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

### Marcas de integridad

#### N.º de alerta de integridad para revisión

- Caracteres reemplazados**  
71 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

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

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



Firmado digitalmente por PALOMINO  
CUELA Gregorio FAU 20145496170  
soft.  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 17.12.2024 20:21:17 -06:00



Firmado digitalmente por QUILLE  
CALZAYA German FAU  
20145496170 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 17.12.2024 16:44:16 -05:00





## DEDICATORIA

A Dios, quien me ha cuidado y guiado cada día, brindándome la fuerza y la sabiduría necesaria para superar cada obstáculo en este camino.

A mi madre, Jesusa Paccara, por su apoyo incondicional, por sus sacrificios y su entrega constante, que han sido mi inspiración para seguir adelante y alcanzar mis metas. A mi padre Samuel Añacata, por su respaldo y fortaleza moral en cada paso de este proceso.

A mis hermanos (as) Washington, Yoel y Margareth, quienes con su cariño y apoyo me acompañaron en cada desafío. Y, en especial, a mi hermana Danny Añacata, quien fue una amiga por brindarme sus consejos y su generosidad para que pudiera continuar.

**Añacata Paccara Doris Sonia**



Dedico esta tesis a Dios por la sabiduría, por ser mi fortaleza y mi guía para alcanzar cada uno de mis logros.

A mi querida familia por su apoyo incondicional en cada logro de mis objetivos, en especial mi querida madre Rosaria Paye Peñaloza y a mi querido padre Paz George Jiménez Mamani por inculcarme los valores y fomentarme sobre la educación y a mis estimados hermanos y en especial a mis hermanos Gladiz, Norma, Olimpia, Omar por ser siempre mi apoyo como amigos y consejeros.

**Jiménez Paye Abraham**



## AGRADECIMIENTOS

A Dios por su infinita sabiduría y ser guía en cada paso de este proyecto, y a nuestra querida alma mater Universidad Nacional del Altiplano, en especial a nuestra querida facultad de Ingeniería Química, su plana de catedráticos por su gran capacidad de profesionalismo e impartir sus conocimientos y experiencias.

Agradecer al Laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química y al Megalaboratorio Químicos de los Andes S.A.C por facilitarnos su laboratorio y equipos.

También a nuestros queridos jurados y nuestro asesor de tesis Dr. Gregorio Palomino Cuela, por su valioso tiempo, orientación, paciencia y apoyo que contribuyeron a realizar cada paso de esta investigación.

**Doris Sonia Añacata Paccara**

**Abraham Jimenez Paye**



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b>	
<b>ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN .....</b>	<b>17</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>20</b>
1.1.1. Objetivo general .....	20
1.1.2. Objetivos específicos .....	20
<b>1.2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....</b>	<b>20</b>
1.2.1. Justificación ambiental.....	20
1.2.2. Justificación social .....	21
1.2.3. Justificación Científica y/o tecnológica .....	21
1.2.4. Justificación económica .....	21
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b>	
<b>2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>29</b>



2.2.1.	Tipos de aguas .....	29
2.2.1.1.	Agua residual domestica .....	29
2.2.1.2.	Agua residual municipal .....	29
2.2.1.3.	Agua residual industrial .....	29
<b>2.3.</b>	<b>BASES TEÓRICAS .....</b>	<b>29</b>
2.3.1.	Procesos de tratamiento de aguas residuales.....	29
2.3.1.1.	Pretratamiento .....	29
2.3.1.2.	Tratamiento primario: .....	30
2.3.1.3.	Tratamiento Secundario .....	30
2.3.1.4.	Tratamiento Terciario .....	31
<b>2.4.</b>	<b>PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA .....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.</b>	<b>CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA</b>	<b>32</b>
<b>2.6.</b>	<b>CATÁLISIS .....</b>	<b>33</b>
<b>2.7.</b>	<b>FOTOCATÁLISIS.....</b>	<b>34</b>
<b>2.8.</b>	<b>FOTOCATÁLISIS HOMOGÉNEA (FOTO-FENTON) .....</b>	<b>35</b>
<b>2.9.</b>	<b>PROCESOS FENTON Y FOTO-FENTON .....</b>	<b>35</b>
2.9.1.	Química del proceso del Foto-Fenton .....	36
<b>2.10.</b>	<b>DEFINICIÓN DE TÉRMINOS .....</b>	<b>37</b>
2.10.1.	Radiación ultravioleta (UV).....	37
2.10.2.	Agente oxidante (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) .....	38
2.10.3.	Catalizador (Fe <sup>+2</sup> ).....	39
2.10.4.	Hidróxido de Sodio .....	40
2.10.5.	Demanda Química de Oxígeno .....	40
2.10.6.	Demanda Bioquímica de Oxígeno .....	40
2.10.7.	Potencial de Hidrógeno .....	40



2.10.8. Foto degradación.....	41
2.10.9. Conductividad eléctrica (CE).....	41
2.10.10. Turbidez .....	41
2.10.11. Límites Máximos Permisibles (LMP).....	42
2.10.12. Degradación de materia orgánica.....	42
2.10.13. Cinética de reacción de Langmuir-Hinshelwood.....	43
2.10.13.1. Diseño Taguchi .....	44
2.11.13.2. Levenberg Marquardt.....	44
<b>2.11. FACTORES QUE CONDICIONAN LA EFICIENCIA DE LOS PROCESOS FENTON Y FOTO-FENTON .....</b>	<b>45</b>
2.11.1. Concentración de peróxido de hidrógeno y sales de hierro .....	45
2.11.2. Tiempo de reacción .....	46
2.11.1. Influencia de la presencia de aniones.....	47
2.11.4. Influencia de pH en proceso fotocatalítico.....	47
<b>2.12. MARCO LEGAL .....</b>	<b>48</b>

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>49</b>
<b>3.2. ÁMBITO DE ESTUDIO .....</b>	<b>49</b>
<b>3.3. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....</b>	<b>50</b>
<b>3.4. VARIABLES DE ESTUDIO.....</b>	<b>51</b>
<b>3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA.....</b>	<b>52</b>
3.5.1. Población.....	52
3.5.2. Muestra .....	52
3.5.3. Materiales .....	52



3.5.3.1. Materia experimental .....	52
3.5.3.2. Equipo de muestreo manual .....	53
3.5.3.3. Procedimiento de muestreo .....	53
3.5.3.4. Preservación de la muestra y transporte.....	53
3.5.3.5. Identificación de muestras .....	53
3.5.4. Equipos .....	54
3.5.4.1. Equipos de protección personal (EPPs) .....	54
3.5.4.2. Equipos de muestreo .....	54
3.5.4.3. Materiales de Laboratorio .....	54
3.5.4.4. Equipos e instrumentos en el laboratorio .....	55
3.5.4.5. Reactivos .....	56
<b>3.6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>56</b>
3.6.1. Diseño experimental.....	56
3.6.2. Técnicas analíticas .....	57
3.6.3. Instrumentos para la Recolección de la Información .....	58
3.6.3.1. Características del reactor fotocatalítico tubular espiral concéntrico .....	58
<b>3.7. PROCESO METODOLÓGICO.....</b>	<b>61</b>
3.7.1. Primera fase: Toma de muestras .....	61
3.7.2. Segunda fase: Caracterización de las muestras .....	62
3.7.3. Tercera fase: Pretratamiento de las aguas residuales .....	65
3.7.4. Cuarta fase: Tratamiento del agua residual .....	66
3.7.5. Determinación de la concentración óptima de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso.....	66
3.7.6. Quinta fase: Postratamiento .....	68



3.7.7. Determinación de la eficiencia de la remoción de la DQO.....	69
3.7.8. Modelo cinético de la DQO en el proceso fotocatalítico .....	69

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

<b>4.1. DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO Y SULFATO FERROSO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DE LA LAGUNA DE OXIDACIÓN EN LA CIUDAD DE PUNO.....</b>	<b>71</b>
<b>4.2. DETERMINAR LA EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE LA DQO EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA LAGUNA DE OXIDACIÓN EN LA CIUDAD DE PUNO.....</b>	<b>79</b>
<b>4.3. REALIZAR EL MODELO CINÉTICO DE LA DQO EN EL PROCESO FOTOCATALÍTICO.....</b>	<b>84</b>
4.3.1. Cinética de degradación .....	84
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>90</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>91</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>98</b>

**LÍNEA:** Tecnologías ambientales y recursos naturales

**ÁREA:** Tratamiento de aguas

**TEMA:** Tratamiento del agua residual mediante fotocatalisis

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 26 de diciembre del 2024



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Potenciales redox de algunos agentes oxidantes.....	32
<b>Tabla 2</b> Procesos de oxidación avanzada clasificados en procesos no fotoquímicos y procesos fotoquímicos. ....	33
<b>Tabla 3</b> Coordenadas del lugar de estudio .....	50
<b>Tabla 4</b> Variables de estudio.....	51
<b>Tabla 5</b> Diseño experimental de Taguchi para LOP-01.....	57
<b>Tabla 6</b> Diseño experimental de Taguchi para LOP-01.....	57
<b>Tabla 7</b> Técnica de análisis de la demanda química de oxígeno .....	58
<b>Tabla 8</b> Caracterización inicial de la muestra LOP-01 .....	63
<b>Tabla 9</b> Caracterización Inicial de la muestra LOP-02.....	64
<b>Tabla 10</b> Matriz factorial (factores y niveles del proceso Foto-Fenton) para LOP - 0167	
<b>Tabla 11</b> Matriz factorial (factores y niveles del proceso Foto-Fenton) para LOP - 0268	
<b>Tabla 12</b> Resultados de las concentraciones optimas en base a la DQO .....	72
<b>Tabla 13</b> Comparación con LMP en LOP-01 .....	75
<b>Tabla 14</b> Resultados de las dosificaciones óptimas en base a la DQO de LOP-02 .....	76
<b>Tabla 15</b> Comparación con LMP en LOP-02 .....	79
<b>Tabla 16</b> Resultados de la remoción en base a la DQO para LOP-01 .....	80
<b>Tabla 17</b> Eficiencia de la remoción en LOP-01 .....	81
<b>Tabla 18</b> Resultados de la remoción en base a la DQO para LOP-02 .....	82
<b>Tabla 19</b> Dosificación Óptima en LOP-02 .....	83
<b>Tabla 20</b> Registro de la concentración cinética de reacción para cada intervalo de tiempo en LOP-01.....	85
<b>Tabla 21</b> Cálculos del parámetro para LOP-01.....	86



<b>Tabla 22</b> Predicción de resultados para LOP-02.....	87
<b>Tabla 23</b> Registro de la concentración cinética de reacción para cada intervalo de tiempo en LOP-02.....	87
<b>Tabla 24</b> Cálculos del parámetro para LOP-02.....	89
<b>Tabla 25</b> Predicción de Resultados para LOP-02 .....	89



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág</b>
<b>Figura 1</b> Rango espectro electromagnético.....	38
<b>Figura 2</b> Laguna de Oxidación de la ciudad Puno.....	49
<b>Figura 3</b> Primer punto de muestreo LOP-01.....	50
<b>Figura 4</b> Segundo punto de muestreo LOP-02 .....	51
<b>Figura 5</b> Reactor Fotocatalítico .....	59
<b>Figura 6</b> Diagrama de flujo.....	60
<b>Figura 7</b> Equipos de monitoreo ambiental.....	61
<b>Figura 8</b> Punto de muestreo LOP-01 .....	62
<b>Figura 9</b> Punto de muestreo LOP-02 .....	62
<b>Figura 10</b> Toma de muestras para el análisis de caracterización LOP-01 .....	63
<b>Figura 11</b> Toma de muestras para el análisis de caracterización LOP-02.....	64
<b>Figura 12</b> Filtración de partículas LOP-01 MIT9 .....	65
<b>Figura 13</b> Filtración de partículas LOP-02 M2T11 .....	65
<b>Figura 14</b> Degradación de la DQO mediante Foto-Fenton de LOP-01 .....	73
<b>Figura 15</b> Dosificaciones de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> para LOP-01 .....	73
<b>Figura 16</b> Dosificaciones de FeSO <sub>4</sub> para LOP-01 .....	74
<b>Figura 17</b> Degradación de la DQO mediante Foto-Fenton de LOP-02.....	77
<b>Figura 18</b> Dosificaciones de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> para LOP-02 .....	77
<b>Figura 19</b> Dosificaciones de FeSO <sub>4</sub> para LOP-02 .....	78
<b>Figura 20</b> Resultados de la DQO Inicial VS DQO Final.....	81
<b>Figura 21</b> Resultados de la DQO Inicial VS DQO Final LOP-02.....	83
<b>Figura 22</b> Gráfico del modelo ajustado para la cinética de reacción LOP-01.....	86
<b>Figura 23</b> Gráfico del modelo ajustado para la cinética de reacción LOP-02.....	88



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO 1</b> Marco normativo .....	98
<b>ANEXO 2</b> Informe de ensayos de los laboratorios .....	109
<b>ANEXO 3</b> Evidencias fotográficas.....	116
<b>ANEXO 4</b> Declaración jurada de autenticidad de tesis.....	124
<b>ANEXO 5</b> Autorización para el depósito de tesis o trabajo de investigación en el repositorio institucional. ....	126



## ACRÓNIMOS

ANA	Autoridad Nacional del Agua
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
LMP	Límite Máximo Permisible
MINAM	Ministerio del Ambiente
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
FIQ	Facultad de Ingeniería Química
POA	Procesos de Oxidación Avanzada
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
pH	Potencial de Hidrógeno
TDS	Sólidos Totales Disueltos
TAO	Tecnologías de Oxidación Avanzada
UV	Radiación Ultravioleta
LOP	Laguna de Oxidación de Puno
CE	Conductividad Eléctrica
NPs	Nanopartículas de Polietileno
AM	Azul de metilo
CPC	Captadores Parabólicos Compuestos
ECA	Estándares de Calidad Ambiental



## RESUMEN

Esta investigación se desarrolló en la Laguna de Oxidación de la ciudad de Puno utilizando el proceso fotocatalítico por el método Foto-Fenton. Se planteó como objetivos determinar las concentraciones óptimas de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y sulfato ferroso ( $FeSO_4$ ) en el tratamiento de aguas residuales, determinar la eficiencia de la remoción de la DQO en las aguas residuales de la laguna de oxidación y realizar el modelo cinético de la DQO mediante el proceso fotocatalítico. La metodología Taguchi incluyó un diseño factorial ( $3^2$ ), evaluando 9 combinaciones de concentraciones del agente oxidante y catalizador por punto de muestreo (LOP-01 y LOP-02). Se realizó la eficiencia de la remoción de la DQO y se ajustaron al modelo cinético a través de la ecuación de Langmuir-Hinshelwood utilizando el método estadístico Levenberg-Marquardt. Los resultados indicaron que las concentraciones óptimas fueron 8 ml/L de  $H_2O_2$  y 2,4 g/L de  $FeSO_4$  para LOP-01, logrando una eficiencia de la remoción de la DQO en un 77,16%, y 8 ml/L de  $H_2O_2$  y 2,0 g/L de  $FeSO_4$  para LOP-02, con una eficiencia del 83,69%. En ambos casos, las DQO finales son (194,43 mg/L y 105,74 mg/L, respectivamente) y los resultados para el modelo cinético en coeficientes de determinación para LOP-01 es  $C = 808,699 * \exp(-0,03487 * t)$  y  $R^2 = 0,9066$ , para LOP-02 es  $C = 639,087 * \exp(-0,03512 * t)$  y  $R^2 = 0,9884$ . Se concluye que el proceso fotocatalítico no solo es eficiente para la remediación de aguas residuales, sino que además asegura el cumplimiento de los estándares ambientales, ofreciendo una solución viable y económica para el tratamiento de efluentes.

**Palabras claves:** Agua residual, Catalizador, Agente oxidante, Fotocatálisis, Foto-Fenton.



## ABSTRACT

This research was carried out in the Oxidation the city's lagoon of Puno using the photocatalytic process by the Photo-Fenton method. The objectives were set determine the optimal concentrations of hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) and ferrous sulfate ( $FeSO_4$ ) in wastewater treatment, determine the COD removal efficiency in the wastewater from the oxidation pond and perform the kinetic model of the COD by the photocatalytic process. The Taguchi methodology included a design factorial ( $3^2$ ), evaluating 9 combinations of oxidizing agent concentrations and catalyst per sampling point (LOP-01 and LOP-02). The efficiency COD removal and were adjusted to the kinetic model through the equation of Langmuir-Hinshelwood using the Levenberg-Marquardt statistical method. The results indicated that the optimal concentrations were 8 mL/L  $H_2O_2$  and 2,4 g/L of  $FeSO_4$  for LOP-01, achieving a COD removal efficiency of 77,16%, and 8 mL/L of  $H_2O_2$  and 2,0 g/L of  $FeSO_4$  for LOP-02, with an efficiency of 83,69%. In both cases, the final COD are (194,43 mg/L and 105,74 mg/L, respectively) and the results for the kinetic model on coefficients of determination for LOP-01 is  $C=808,699*\exp(-0,03487*t)$  and  $R^2=0,9066$ , for LOP-02 it is  $C=639,087*\exp(-0,03512*t)$   $R^2=0,9884$ . It is concluded that the photocatalytic process is not only efficient for the wastewater remediation, but also ensures compliance with the environmental standards, offering a viable and economic solution for the treatment of effluents.

**Keywords:**Waste water, catalyst, oxidizing agent, photocatalysis, PhotoFenton.

Dr. LUIS ALBERTO SUÑO QUISPE  
INGENIERO QUÍMICO  
CIP. 149015



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para el desarrollo de los ecosistemas y la vida en el planeta. Sin embargo, solo el 0,5% de los ríos, lagos, corrientes, reservas y aguas pluviales es accesible para su uso. Actualmente, el consumo de agua se ha incrementado el doble debido al crecimiento de la población, lo que no solo ha incrementado su demanda, sino que también ha provocado la aparición de agentes contaminantes en las fuentes de agua debido a la contaminación (Ortega & Sánchez, 2021).

El incremento en la demanda de tratamiento de aguas contaminadas de distintas fuentes, cual es el motivo por la implementación de regulaciones más estrictas, ha estimulado el avance de innovadoras tecnologías destinadas a la purificación del agua debido a su gran importancia.

El tratamiento de aguas residuales puede abordarse mediante diversas alternativas, dependiendo de las condiciones iniciales de estas. Los métodos más frecuentes incluyen los procesos biológicos, seguidos de los tratamientos fisicoquímicos. No obstante, en ciertos casos, debido a las características particulares de las aguas residuales, como su baja biodegradabilidad, los enfoques convencionales pueden no ser los más adecuados. En estos escenarios, se hace necesario recurrir a alternativas más avanzadas, como EL proceso de oxidación avanzada, que permiten tratar adecuadamente estos tipos de aguas (Robles et al., 2011).

El proceso Foto-Fenton es una técnica avanzada que se utiliza para tratar aguas residuales mediante la generación directa de radicales hidroxilos, que actúan como



agentes oxidantes eficaces para descomponer los contaminantes presentes (Robles & Cevallos, 2021).

## **1.1. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.1.1. Objetivo general**

- Desarrollar el tratamiento mediante la fotocatalisis en las aguas residuales de la laguna de oxidación en la Ciudad de Puno.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Determinar la concentración óptima de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso en el tratamiento del agua residual de la laguna de oxidación en la Ciudad de Puno.
- Determinar la eficiencia de la remoción de la DQO en las aguas residuales de la laguna de oxidación en la Ciudad de Puno.
- Realizar el modelo cinético de la DQO en el proceso fotocatalítico.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

### **1.2.1. Justificación ambiental**

Debido a que el agua residual que desemboca de la laguna de oxidación presenta una alta carga orgánica, por ello, se tuvo que buscar una opción para abordar el problema de las descargas de agua; este estudio plantea disminuir la DQO y la DBO<sub>5</sub>. Se estableció los tiempos de residencia pertinentes y la cantidad de agua a tratar en cada paso del proceso Foto- Fenton, los hallazgos ayudan a salvaguardar la diversidad biológica del Lago Titicaca, manteniendo la salud del



ecosistema acuático y de las especies que viven en la bahía. Por ello este estudio fotocatalítico ayuda a disminuir la contaminación del Lago Titicaca.

### **1.2.2. Justificación social**

La descarga de aguas residuales urbanas se origina en hogares, instalaciones públicas y el escurrimiento de áreas urbanas que se recoge en el sistema de drenaje. El tratamiento de aguas residuales mediante fotocátalisis en la laguna de oxidación de Puno busca mejorar la calidad del agua, protegiendo la salud pública y reduciendo enfermedades relacionadas con el consumo de agua contaminada. Además, fomenta el desarrollo social sostenible al preservar recursos esenciales para actividades económicas que sostienen a la población, como la pesca y el turismo.

### **1.2.3. Justificación Científica y/o tecnológica**

El proceso de fotocátalisis del método Foto-Fenton se convierte en una de las tecnologías más empleadas para tratar aguas contaminadas con materias orgánicas. En la laguna de oxidación se encontró una elevada concentración de materia orgánicas el mismo que se descompuso mediante el método Foto-Fenton.

### **1.2.4. Justificación económica**

El proceso de la fotocátalisis homogénea son empleadas a bajo costo de inversión y el tiempo de tratamiento, así mismo se obtuvo una reducción de gastos de operación en cuanto a otras tecnologías similares. Los métodos de oxidación avanzada representan una tecnología innovadora y ambientalmente amigable.



## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

León et al., (2020) realizaron un estudio de tratamiento mediante Foto-Fenton en agua residual de industria láctea en la cual hicieron la caracterización fisicoquímica para saber sus condiciones iniciales en su investigación trabajaron como variable dependiente la eficiencia de remoción y como variable independiente concentración de  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ , tiempo y lumínica. Analizaron parámetros como turbidez, sólidos suspendidos,  $\text{DBO}_5$ , DQO y coliformes fecales realizaron 12 tratamientos utilizando 1000 ml de agua residual, variando las concentraciones de  $\text{Fe}^{2+}$  (100 a 400 mg/L) y  $\text{H}_2\text{O}_2$  (4500 a 6000 mg/L) evaluaron la turbidez y la DQO como parámetros de respuesta. En sus resultados lograron reducir hasta un 90 % de coliformes fecales utilizando una potencia de 40 watts y un tiempo de 60 minutos. El método Foto-Fenton es altamente efectivo en el tratamiento de aguas residuales lácteas, alcanzando una eliminación superior al 90 % para cada parámetro evaluado.

Hube & Wu, (2021) discutieron las eficiencias y mecanismos de mitigación de micro contaminantes y patógenos emergentes en el proceso de tratamiento de las aguas residuales. La supresión de micro contaminantes en proceso de una sola etapa que son procesos de tratamientos de las aguas residuales que se dan en un tipo de eliminación de micro contaminantes en humedales construidos, procesos biológicos, biorreactores de membrana, POA y la eliminación de micro contaminantes en procesos de varias etapas son una serie de combinaciones de procesos físicos, químicos y biológicos que emplean para una mejora de eliminación de sustancias orgánicas. Determinaron que, en varios procesos descentralizados de tratamiento de agua residual, se integraron unidades de



operación en etapas múltiples para mejorar la eficacia del tratamiento de agua. Los humedales artificiales independientes o híbridos y los procesos biológicos son los procesos descentralizados de tratamiento de agua residual más informados respecto a los micro contaminantes, los micro plásticos y la mitigación de patógenos A.

Oller et al., (2022) investigaron el “tratamiento solar de aguas en la Plataforma Solar de Almería (CIEMAT, España)” mediante tecnologías destinadas a la regeneración de aguas residuales y la producción fotocatalítica de hidrógeno. Este tratamiento solar se llevó a cabo en la Plataforma Solar de Almería (PSA) perteneciente al CIEMAT, ubicada en Tabernas, Almería, España, con el objetivo de lograr la reutilización del agua. Las plantas piloto solares fueron construidas mediante módulos conectados en serie de foto reactores dispuestos en un lado de un espejo de aluminio anodizado con forma de Captadores Parabólicos Compuestos (CPC), optimizando así la captación de fotones solares en tubos de reactor. En el laboratorio estudiaron principalmente tratamientos que combinaban procesos reductores y oxidativos para degradar contaminantes resistentes a la oxidación de procesos avanzados.

López et al., (2021) en su investigación de “Advanced Oxidation as an Alternative Treatment for Wastewater”, el objetivo fue analizar la efectividad de los procesos de oxidación avanzada en la descontaminación de aguas residuales. La metodología que emplean en estos procesos, lo caracterizan por su capacidad fisicoquímica de transformar la estructura química de los contaminantes a través de especies oxidantes transitorias, principalmente el radical hidroxilo, que se genera mediante métodos fotoquímicos y otras fuentes de energía. Los resultados de esta revisión indican que el radical hidroxilo es altamente eficaz para oxidar y reducir la carga contaminante de las aguas residuales, logrando mejoras significativas en la calidad del agua. En conclusión, los procesos de oxidación avanzada ofrecen una solución prometedora y efectiva para el tratamiento de



aguas residuales, contribuyendo a la mitigación de la contaminación hídrica y adaptándose a los requerimientos legales y de sostenibilidad en la industria.

Becerra et al., (2020) investigaron la influencia de la concentración del dióxido de titanio en los cultivos de café y arroz y el tiempo de tratamiento en la reducción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) de agua residual. Hicieron un diseño no factorial 3 (tres niveles, dos factores) y sus variables evaluadas fueron pH, concentración y realizaron pruebas mediante un equipo fotocátalisis heterogénea en un Colector Cilíndrico Parabólico (CPC) de 0,83 m<sup>2</sup>.

Centeno et al., (2021) en su investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), en su filial de investigación en Los Teques, Estado Miranda, para el cumplimiento con las normas nacionales de descarga en cuerpos de agua naturales. Para ello, se analizaron datos históricos del efluente de 2003 a 2014 y se realizaron muestreos durante seis semanas, donde evaluaron las eficiencias de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub> y SST. Los resultados mostraron una eficiencia de 86,51% en DQO y 72,94% en DBO<sub>5</sub>. También se determinaron la proporción óptima de lodos biológicos y aguas agrias que requieren tratamiento mediante procesos de oxidación avanzada (POA) para mejorar la reducción de contaminantes. La mejor calidad alcanzada en el efluente fue de 222 mg/L de DQO y 32,15 mg/L de DBO<sub>5</sub>, cumpliendo con la normativa nacional y demostrando la efectividad del tratamiento aplicado en la PTAR.

Robles & Cevallos, (2021) el objetivo de su investigación fue optimizar el proceso Foto-Fenton para el tratamiento de aguas residuales utilizando peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y sulfato de ferroso (FeSO<sub>4</sub>) con irradiación UV. Se evaluaron diferentes dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (10, 15 y 20 ml/L) y FeSO<sub>4</sub> (100, 150 y 200 mg/L), encontrando que las condiciones óptimas lograron una remoción del 99,88% de DQO y más del 99% de otros



contaminantes en un tiempo de tratamiento de dos horas. Los resultados indican que combinar el foto-Fenton con la adsorción en carbón activado mejora la calidad del agua procesada, cumpliendo con las normas del ECA para agua de categoría 3. En conclusión, este enfoque no solo es eficaz en la eliminación de contaminantes, sino que también favorece la sostenibilidad del recurso hídrico para su reutilización.

Ramos & Torre, (2022), en su tesis su objetivo fue optimizar los parámetros de pH y concentración de  $H_2O_2$  en el proceso Foto-Fenton para degradar la carga orgánica en aguas residuales de salones de belleza ubicados en Huancayo y El Tambo. Para ello, se recolectaron muestras de los salones, generando una mezcla de 32 litros; parte de esta fue enviada a un laboratorio certificado para análisis y otra se empleó en pruebas experimentales en un reactor tubular de acero inoxidable con lámpara UV de 16 Watts. Las variables evaluadas incluyeron pH (3 y 5) y concentraciones de  $H_2O_2$  (50%, 70%, y 100% de la cantidad estequiométrica), manteniendo una relación  $H_2O_2/Fe^{2+}$  de 10/0,5. Los resultados de ANOVA mostraron que tanto el pH como la cantidad de  $H_2O_2$  influyen en la remoción de DQO, y las pruebas de Tukey indicaron que las condiciones óptimas se alcanzaron a pH 3 con remociones de DQO superiores al 92,5% para todas las concentraciones de  $H_2O_2$ . Estos resultados sugieren que el proceso Foto-Fenton, bajo las condiciones adecuadas, es eficaz para el tratamiento de aguas residuales de salones de belleza.

Mendoza, (2019) en su investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia del sistema Foto-Fenton combinado con adsorción para mejorar la calidad del agua residual proveniente de un laboratorio de química orgánica. Se diseñó un equipo tipo batch de 5 litros con sistema de recirculación de 8 L/min para realizar pruebas experimentales. En el proceso Foto-Fenton, se empleó un diseño factorial para determinar el efecto de diferentes dosis de  $H_2O_2$  (10, 15 y 20 ml/L) y  $FeSO_4$  (100, 150 y 200 mg/L) sobre la remoción de



DQO, usando también una lámpara UV de 16 W y un pH inicial de 2,88. Se encontró que la dosis óptima para maximizar la eficiencia de remoción de DQO fue de 15 ml/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 50% y 150 mg/L de FeSO<sub>4</sub> al 99%, con un tiempo de tratamiento de 2 horas, tras lo cual el pH fue ajustado a 7,97 con NaOH al 50%. En la etapa de adsorción, se utilizó un filtro de carbón activado de cáscara de coco de 500 g, lo cual permitió que el agua tratada cumpliera con los estándares de calidad para riego de vegetales y bebida de animales. Los resultados mostraron eficiencias de remoción de 99,88% en DQO, 99,61% en DBO<sub>5</sub>, 99,94% en aceites y grasas, 99,99% en detergentes y 90% en color, concluyendo que el sistema foto-Fenton seguido de adsorción es altamente eficaz para el tratamiento de estas aguas residuales.

Leal & Plazas, (2021) realizaron pruebas para determinar nanopartículas que funcionan como nano catalizador para descomponer colorantes al ser irradiados con la luz UV. Utilizaron como azul de metileno y nanopartículas de óxido de titanio (NPs) en solución de azul metileno (AM) de 100 mg/L mezclando con nanopartículas de óxido de titanio (NPs) de 1000; 100; 10 y 1 mg/L. Realizaron pruebas por triplicado para cada concentración con intervalos de tiempo de 60 minutos. Concluyeron que las nanopartículas de óxido de titanio (NPs) funciona como un catalizador en la degradación de azul metileno (AM), la fotocatalisis resulta efectivo en la remoción y tiempo de exposición de luz UV y alcanzaron remociones un promedio de 87,27% -98,54%. Las nanopartículas adquieren propiedades únicas y posibilitan la catálisis de las reacciones químicas.

Menéndez, (2018) en su investigación realizó una caracterización inicial del lactosuero, analizando parámetros como Demanda Química de Oxígeno (DQO), pH, Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), Sólidos Totales Disueltos (STD) y Conductividad Eléctrica en el laboratorio de la Universidad Nacional del Altiplano-Puno.



Mediante un diseño experimental Box-Behnken, se establecieron condiciones óptimas de tratamiento que incluyeron 30,84 g de peróxido de hidrógeno, 3,65 g de  $\text{Fe}^{2+}$ , un tiempo de reacción de 43,84 minutos, pH de entre 2,8 y 3, y una temperatura de 15 °C. Los resultados demostraron una reducción con disminuciones del 78,93 % en DQO, 73,20 % en ST, 84,40 % en SV, 63,45 % en STD y 63,35 % en Conductividad Eléctrica, ajustándose el modelo a una ecuación de segundo orden con un  $R^2$  de 0,9978. Estos hallazgos concluyen que el proceso Fenton es eficaz para mitigar el impacto ambiental del lactosuero, bajo condiciones específicas de la región altiplánica.

Bravo & Díaz, (2022) examinaron los mecanismos de degradación de compuestos orgánicos con el objetivo de mejorar la actividad fotocatalítica. Además, exploraron posibles aplicaciones en la descontaminación y detoxificación de aguas que contienen compuestos orgánicos. En sus objetivos del estudio comprenden el análisis del mecanismo de actividad fotocatalítica utilizando  $\text{TiO}_2$  en entornos acuosos y la consideración de sus aplicaciones en la descontaminación de aguas contaminadas con compuestos orgánicos. La metodología empleada adopta un enfoque mixto, que implica el análisis de datos numéricos provenientes de resultados de aplicaciones de fotocátalisis adquiridos en investigaciones previas. En sus resultados indican que la fotocátalisis con  $\text{TiO}_2$  en medios acuosos beneficia la descomposición de compuestos orgánicos, dando especies químicas como  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , junto con residuos inorgánicos inofensivos

Muñoz & Palomino, (2019) analizaron la concentración de óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y el tiempo que afectan la reducción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en aguas residuales de un camal mediante fotocátalisis heterogénea. Utilizaron dos módulos de fotocátalisis y prepararon 24 L de agua residual sintética con un 0,76 g/L de biftalato de potasio y consideraron variables del tiempo de (3; 4 y 5 horas) y concentraciones de dióxido de Titanio (1; 1,5 y 2 mg/L) para determinar condiciones óptimas del peróxido



de hidrógeno (3 mg/L) y el ácido clorhídrico para controlar el pH del agua. Determinaron una condición mejor de pH 6 y el tiempo óptimo de tratamiento y concentración de  $TiO_2$  de 4 horas y 1,2 mg/L respectivamente y el porcentaje de reducción de DQO en aguas residuales de 86,75%. El tiempo de tratamiento influye mucho en reducción de DQO, concentración de  $TiO_2$  y la interacción por el tiempo de tratamiento.

Vargas, (2022) en su investigación tuvo como objetivo reducir la demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) y coliformes fecales en aguas residuales municipales mediante el proceso Foto-Fenton, que combina peróxido de hidrógeno, sulfato ferroso y radiación UV. Utilizando el diseño en un fotorreactor, el proceso logró remover un 97,956 % de  $DBO_5$  y un 99,985 % de coliformes fecales en 30 minutos, cumpliendo con la normativa “D.S. N° 003-2010-MINAM”. Este tratamiento se presenta como una alternativa eficaz y prometedora para el tratamiento complementario de aguas residuales en industrias y pequeñas localidades.

Vadillo et al., (2018) estudiaron la oxidación en agua supercrítica (SCWO) como una tecnología prometedora para tratar una amplia variedad de aguas residuales industriales. La principal ventaja de SCWO sobre otros métodos de tratamiento como los vertederos es que es un método de destrucción basados en oxidación de materia orgánica incluye tratamiento biológico, incineración, POA, la oxidación con aire húmedo y la oxidación con agua supercrítica. La elección del método a utilizar depende del contenido orgánico de las aguas residuales para contenidos orgánicos de hasta el 1%, los tratamientos biológicos y POA son adecuados. Por otro lado, la incineración es adecuada para aguas residuales altamente concentradas, pero en el rango de 1% - 20% de materia orgánica. La SCWO es una mejor opción, debido a los gases tóxicos producidos y al alto costo de la incineración.



## **2.2. MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1. Tipos de aguas**

#### **2.2.1.1. Agua residual domestica**

Son aquellas provenientes de áreas residenciales y comerciales que contienen residuos biológicos, entre otros, generados por la actividad humana, y deben ser gestionadas de manera adecuada (OEFA, 2014).

#### **2.2.1.2. Agua residual municipal**

Son aguas residuales domésticas que están combinadas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial que han sido previamente tratadas, permitiendo su ingreso en los sistemas de alcantarillado combinados (OEFA, 2014).

#### **2.2.1.3. Agua residual industrial**

Son aquellas que se generan a partir de un proceso productivo, incluyendo las originadas en actividades mineras, agrícolas, energéticas, agroindustriales, entre otras (OEFA, 2014).

## **2.3. BASES TEÓRICAS**

### **2.3.1. Procesos de tratamiento de aguas residuales**

#### **2.3.1.1. Pretratamiento**

(Noyola et al., 2013) indica que esta etapa se encarga de retener los sólidos más grandes, los sólidos finos de mayor densidad y los materiales visibles, como ramas, plásticos, piedras, arenas, aceites y grasas, entre



otros. Para ello generalmente se utilizan canales con rejillas, desarenadores o flotadores. Estas unidades en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son fundamentales para evitar cualquier tipo de obstrucción o complicación en los sistemas de tratamiento.

#### **2.3.1.2. Tratamiento primario:**

El objetivo es reducir los sólidos suspendidos presentes en el agua residual, que están compuestos principalmente por materia orgánica. Además, se logra una disminución de la DBO<sub>5</sub> y una reducción de bacterias mediante procesos como la sedimentación y otros métodos. Es importante destacar que este proceso prepara el agua residual para la siguiente fase del tratamiento (Bermeo, 2016).

#### **2.3.1.3. Tratamiento Secundario**

Según (Bermeo, 2016) el tratamiento biológico tiene como principal objetivo reducir el compuesto orgánico en forma coloidal y la materia orgánica disuelta en gases y tejidos celulares. Dado que esta materia tiene un peso mayor que el del agua, se elimina mediante sedimentación. Este proceso consiste en adaptar a los microorganismos para que puedan consumir la materia orgánica sin problemas, lo cual se logra eficazmente a través de la coagulación. Después de esta fase biológica, el efluente pasa a la etapa de sedimentación secundaria, donde se eliminan los flóculos biológicos generados, logrando así la reducción de la DBO<sub>5</sub>.



#### **2.3.1.4. Tratamiento Terciario**

Cuando el efluente no cumple con los requisitos establecidos por las normativas ambientales para su descarga, es necesario aplicar un tratamiento terciario. Este tratamiento permite eliminar tanto los compuestos orgánicos como inorgánicos que puedan comprometer la calidad del efluente, y se aplica en función del proceso que se desee realizar. Con este tratamiento, es posible reducir microorganismos fecales, gérmenes patógenos y material orgánico refractario, como menciona (Bermeo, 2016). Además, según (Noyola et al., 2013), también se logra la depuración de sólidos suspendidos, nutrientes y materia orgánica no biodegradable que no fueron eliminados en el tratamiento secundario convencional.

Las tecnologías de oxidación avanzada (TAO o POA) se aplican principalmente en la etapa de tratamiento terciario, y su objetivo es eliminar compuestos difíciles de biodegradar y mejorar la depuración microbiológica. Estas tecnologías se basan en métodos fotoquímicos que pueden modificar los contaminantes presentes, alterando su estructura química y generando el radical hidroxilo ( $\text{OH}^*$ ), que es altamente efectivo para oxidar la materia orgánica, como explica (Chiva et al., 2017).

#### **2.4. PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA**

Los procesos avanzados de oxidación han sido ampliamente investigados y utilizados en las últimas décadas para tratar diversos tipos de aguas residuales con distintos objetivos específicos. Actualmente, el número de publicaciones científicas sobre este tema continúa en crecimiento. Los PAOs se distinguen por la producción de



oxidantes extremadamente reactivos y no selectivos, como el radical hidroxilo (OH<sup>\*</sup>). Como se muestra en la tabla 1, el radical hidroxilo tiene el segundo mayor potencial de oxidación, solo superado por el flúor (Castañeda & Romero, 2014).

**Tabla 1**

*Potenciales redox de algunos agentes oxidantes*

ESPECIE	E° (V, 25°C)
Flúor	3,03
Radical hidroxilo	2,80
Oxígeno atómico	2,42
Ozono	2,07
Peróxido de hidrógeno	1,78
Radical perhidroxilo	1,70
Permanganato	1,68
Dióxido de Cloro	1,57
Ácido hipocloroso	1,49
Cloro	1,36
Bromo	1,09
Yodo	0,54

*Fuente: (Jiménez, 2015)*

## **2.5. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA**

Los POA (Procesos de Oxidación Avanzada) pueden clasificarse según el método utilizado para generar radicales hidroxilos, como el uso de ozono, la irradiación solar, o el número de fases involucradas (Mireles, 2015).

**Tabla 2**

*Procesos de oxidación avanzada clasificados en procesos no fotoquímicos y procesos fotoquímicos.*

Procesos de Oxidación Avanzada	
Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
<ul style="list-style-type: none"><li>• Ozonización en medio alcalino (<math>O_3/OH^-</math>)</li><li>• Procesos Fenton (<math>Fe^{2+}/H_2O_2</math>) y relacionados</li><li>• Oxidación electroquímica</li><li>• Radiólisis <math>\gamma</math> y tratamiento con haces de electrones</li><li>• Plasma no térmico</li><li>• Descarga electrohidráulica – Ultrasonido</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Oxidación en agua sub/y supercrítica.</li><li>• Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)</li><li>• <math>UV/H_2O_2</math></li><li>• <math>UV/O_3</math></li><li>• Foto – Fenton y relacionados</li><li>• Fotocatálisis heterogénea</li></ul>

Fuente: (Mireles, 2015)

## 2.6. CATÁLISIS

Un catalizador es una sustancia que interactúa en las reacciones químicas, acelerando su velocidad sin ser consumido en el proceso. Las reacciones que involucran un catalizador se conocen como reacciones catalizadas o catalíticas, y el fenómeno se denomina catálisis (Spasiano et al., 2015).

La catálisis se considera una tecnología crucial para el desarrollo de procesos ambientalmente sostenibles, ya que el uso de catalizadores permite llevar a cabo reacciones de manera más eficiente y selectiva. Esto facilita la eliminación de subproductos y residuos típicos de las reacciones convencionales, permitiendo su



recuperación para reutilización. Además, contribuye a reducir el consumo energético del proceso (Bes et al., 2016).

## 2.7. FOTOCATÁLISIS

En los últimos años, la investigación sobre fotocátalisis se ha enfocado en la utilización de materiales semiconductores como fotocatalizadores para eliminar compuestos orgánicos e inorgánicos en sistemas acuosos o gaseosos. Esto tiene aplicaciones en la limpieza del medio ambiente, el tratamiento de agua potable y el tratamiento de aguas residuales industriales (Bes et al., 2016).

Según (Braslavsky et al., 2011), el término "fotocatálisis" se refiere a la aceleración de una fotorreacción gracias a la presencia de un catalizador que destacan que, entre las fotorreacciones solares, la fotocátalisis es la más investigada y se aplica en diversos sectores, incluyendo la producción de productos químicos finos, la arquitectura y construcción, el tratamiento de agua y aire, la higiene y el saneamiento, la protección del medio ambiente.

El proceso de fotocátalisis permite utilizar de manera directa la energía solar que incide sobre la Tierra. La aplicación de radiación solar en procesos fotoquímicos requiere de ciertos catalizadores y depende de la configuración del fotoreactor. Por ejemplo, se pueden usar cationes de hierro disueltos para la catálisis homogénea, o dióxido de titanio en fase sólida para la catálisis heterogénea. Esta tecnología produce oxidantes como el radical hidroxilo, que en un medio acuoso reaccionan con contaminantes orgánicos, descomponiéndolos en dióxido de carbono, agua y otras sales. Además, facilita promover la desinfección del agua (Bes et al., 2016).



## 2.8. FOTOCATÁLISIS HOMOGÉNEA (FOTO-FENTON)

La fotocatalisis homogénea conocida como Foto-Fenton se refiere a la reacción del peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) con sales de hierro, que produce radicales hidroxilos ( $HO^*$ ) en condiciones de pH generalmente ácidas y temperaturas moderadas, además de la degradación foto asistida del  $H_2O_2$  en presencia de sales ferrosas. El proceso Foto-Fenton se ha evidenciado como una de las técnicas más efectivas que se pueden aplicar bajo luz UV-visible (Bes et al., 2016).

## 2.9. PROCESOS FENTON Y FOTO-FENTON

Entre los diferentes Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs), los métodos Fenton y Foto-Fenton se destacan como los más prometedores debido a su alta eficiencia y bajo costo en la descontaminación de aguas con compuestos tóxicos y/o no biodegradables. El procedimiento de Fenton implica añadir uno o varios agentes oxidantes, como oxígeno y peróxido de hidrógeno, junto con un catalizador, como una sal soluble de hierro. Por esta razón, el  $H_2O_2$  suele activarse con un catalizador para generar radicales  $OH^*$  en fase homogénea. La activación del  $H_2O_2$  mediada por hierro ( $Fe^{2+}$ ) fue reportada por primera vez en 1894 por Henry J. Fenton, quien usó una mezcla de  $Fe^{2+}$  y  $H_2O_2$ , conocida como reactivo de Fenton, para oxidar el ácido tartárico (Caram, 2018).

Desde entonces, la reacción de Fenton ha despertado un gran interés en áreas como la química, biológica, los procesos de síntesis, la química del agua y el tratamiento de residuos peligrosos. Por otro lado, el proceso Foto-Fenton, también conocido como proceso de Fenton asistido por luz, además de estos componentes, incluye la irradiación con luz solar o artificial, lo cual acelera la reacción al convertir  $Fe^{3+}$  en  $Fe^{2+}$ , completando así el ciclo catalítico. Durante estas reacciones se generan diversos radicales libres que



tienden a reaccionar con cualquier compuesto orgánico presente. La alta reactividad del radical hidroxilo  $\text{OH}^*$  es fundamental en estos procesos y es característica de todos los procesos avanzados de oxidación. Además, durante el proceso Foto-Fenton, pueden ocurrir fenómenos como la fotólisis directa, especialmente con luz ultravioleta de longitud de onda menor a 300 nm, y la hidrólisis de compuestos orgánicos, especialmente en condiciones de pH extremadamente altas o bajas (Arroyo, 2016).

### 2.9.1. Química del proceso del Foto-Fenton

El proceso Foto-Fenton implica una serie de reacciones que aprovechan la generación de radicales libres para degradar compuestos orgánicos contaminantes.

El reactivo Fenton o sulfato ferroso se basa en la combinación de un oxidante fuerte y un catalizador para generar radicales hidroxilos ( $\text{OH}^*$ ). El catalizador es una sustancia que acelera una reacción química sin ser alterada en el proceso. El peróxido de hidrógeno es comúnmente utilizado como oxidante fuerte, aunque su descomposición en agua y oxígeno es termodinámicamente favorable, es muy lenta sin catalizador. La adición de un ion férrico, como el Sulfato ferroso ( $\text{Fe}_2\text{SO}_4$ ), aumenta significativamente la velocidad de reacción. La proteína hemoglobina, que contiene hierro, es aún más efectiva, ya que su capacidad para acelerar la reacción es aproximadamente 1 000 000 veces más rápida que la reacción sin catalizar (Mayorca, 2017).

La tecnología del Foto Fenton es utilizada cuando se requiere una alta degradación de la demanda química de oxígeno (DQO). En la reacción de proceso Fenton, el ion  $\text{Fe}^{+2}$  funciona como catalizador se oxida a  $\text{Fe}^{+3}$  en el proceso de descomposición del agente oxidante que es el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), lo



que produce radicales  $OH^*$  que actúan como especies oxidantes, así como se muestra en la Ecuación 1:



La utilización de radiación UV-Vis aumenta el poder oxidante, principalmente mediante la foto-reducción de  $Fe^{+3}$  a  $Fe^{+2}$  lo que genera más radicales hidroxilos (Ecuación 2). Esto establece un ciclo en el reactivo de Fenton, produciendo radicales hidroxilos para oxidar compuestos orgánicos (Ecuación 3). Además, se puede aprovechar la radiación solar, lo que eliminaría el gasto asociado a la radiación UV (Hincapié et al., 2011).



En ambos casos, los radicales  $OH^*$  formados reaccionan con la materia orgánica RH mediante las reacciones (3) y (4):



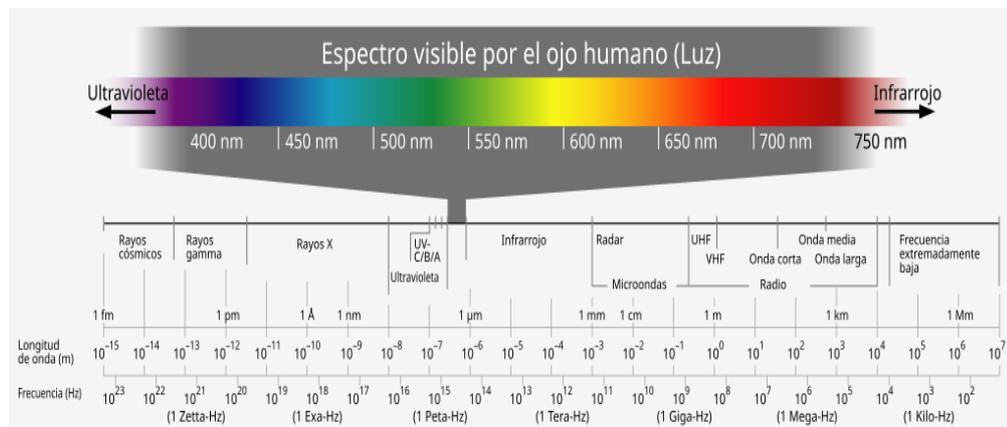
## 2.10. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

### 2.10.1. Radiación ultravioleta (UV)

Según (Salazar & Ortega, 2018), la radiación ultravioleta es una parte del espectro electromagnético que se encuentra entre los rayos X y la luz visible, con longitudes de onda que varían entre 100 y 400 nm. Esta radiación se clasifica en cuatro bandas: UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm), UV-C (200-280 nm) y UV-vacío (40-200 nm). Las más utilizadas con fines ambientales son UV-A y UV-C.

**Figura 1**

*Rango espectro electromagnético*



*Fuente:* (Vargas, 2022)

### 2.10.2. Agente oxidante ( $H_2O_2$ )

El peróxido de hidrógeno es un químico respetuoso con el medio ambiente, ya que su división genera oxígeno y agua. Se utiliza en la industria para blanquear pulpa, papel y textiles, así como en la limpieza de circuitos electrónicos, y como desinfectante en aplicaciones médicas e industriales (Caram, 2018).

El peróxido de hidrógeno se ha empleado como agente oxidante durante muchos años en el tratamiento de efluentes industriales y agua potable, principalmente con el propósito de eliminar materia orgánica (Botelho et al., 2008).

El agente oxidante principal en el proceso de Foto-Fenton es el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ). Este compuesto se descompone en presencia de iones de hierro ( $Fe^{2+}$ ) y radiación ultravioleta (UV), generando radicales hidroxilos ( $OH^*$ ) que son poderosos oxidantes no selectivos. Estos radicales hidroxilos son capaces de oxidar y mineralizar cualquier molécula orgánica, produciendo  $CO_2$  y aniones inorgánicos (Hincapié et al., 2011). El proceso de oxidación avanzada se produce



mediante la radiación emitida por lámparas UV. La luz ultravioleta (con longitudes de onda menores a 400 nm) interactúa con las moléculas en el medio líquido, rompiendo los enlaces químicos y causando la fotólisis de las moléculas de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Barliza & Torres, 2013).

Según (Blanco, 2007), el peróxido de hidrógeno se utiliza en una amplia gama de tratamientos ambientales, incluyendo el tratamiento de aguas residuales, para eliminar diversos desechos industriales. Además, el peróxido de hidrógeno actúa como fuente de radicales hidroxilos en los denominados Procesos Avanzados de Oxidación, siendo estos radicales los oxidantes más potentes después del flúor.

### **2.10.3. Catalizador ( $\text{Fe}^{2+}$ )**

Según (Zorrilla et al., 2017) este metal es un eficaz agente reductor y, dependiendo de las condiciones, puede oxidarse a los estados  $2^+$ ,  $3^+$  o  $6^+$ . En la mayoría de los compuestos de hierro, se encuentra presente el ion ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) o el ion férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) como entidades distintas.

La forma de reacción del proceso de Foto-Fenton inicia involucrando el reactivo de Fenton  $\text{Fe}^{2+}$  ya que los iones de  $\text{Fe}^{3+}$  que actúa como catalizador oxidan y forman iones de  $\text{Fe}^{3+}$  generando a su vez radicales hidroxilo como se observa en la Ecuación 1.

Posteriormente se da la fotólisis de los complejos de  $\text{Fe}^{3+}$  gracias a la lámpara de luz ultravioleta formando así los iones  $\text{Fe}^{2+}$  foto reducidos y los radicales  $\text{OH}^*$  (Ecuación 2).



Los cuales son altamente reactivos con el fin de iniciar la destrucción oxidativa de compuestos orgánicos presentes en el agua (Aznate et al., 2013).

El  $\text{Fe}^{2+}$  foto reducido proporciona en presencia de descomposición de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) radicales hidroxilos ( $\text{OH}^*$ ) que actúan como agentes oxidantes a través de la Ecuación 2 y así continúa el ciclo (Garcés et al., 2004).

#### **2.10.4. Hidróxido de Sodio**

Según (Tello, 2013), el NaOH es una base fuerte que se usa para elevar el pH de las aguas residuales formando especies de hidróxidos que por su forma semisólida puede sedimentar.

#### **2.10.5. Demanda Química de Oxígeno**

Según (Amazonio et al., 2018), la DQO representa la cantidad de oxígeno consumido para oxidar la materia orgánica, sea o no biodegradable, en medio ácido y condiciones energéticas por la acción de un agente químico oxidante fuerte.

#### **2.10.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno**

Según (Amazonio et al., 2018), la DBO es la cantidad de concentración de oxígeno consumida por los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable.

#### **2.10.7. Potencial de Hidrógeno**

(Severiche et al., 2017), el pH es un parámetro que permite medir la concentración de iones hidrogeniones presentes en el agua.



### **2.10.8. Foto degradación**

Según (Tejada, 2022) la foto degradación es el proceso en el cual una molécula se transforma fotoquímicamente en otras, generalmente con un peso molecular menor. Las transformaciones fotoquímicas son reacciones químicas provocadas por la absorción de radiación ultravioleta (UV), visible (VIS) o infrarroja (IR), y suelen incluir foto adición, fotocicloación, foto eliminación y foto isomerización.

### **2.10.9. Conductividad eléctrica (CE)**

Es la capacidad del H<sub>2</sub>O para conducir corriente eléctrica, que depende de la concentración de sales en el agua; a mayor concentración de iones, mayor será la conductividad del agua. Los resultados de la medición de conductividad eléctrica se utilizan para determinar la concentración de Sólidos Disueltos Totales (TDS) (Cruz González, 2015).

### **2.10.10. Turbidez**

Es una medida cuantitativa relacionada con los sólidos suspendidos, que generalmente se mide en la salida de las plantas de tratamiento de agua para evaluar la calidad del proceso. La medición se expresa en NTU (unidades nefelométricas de turbidez) para estimar la calidad del agua residual (Cifuentes & Villar, 2015).

La turbidez es una medida del grado de pérdida de transparencia del agua debido a la presencia de partículas suspendidas. Este parámetro refleja la calidad del agua y puede indicar la presencia de contaminantes microbiológicos y compuestos tóxicos. A mayor cantidad de partículas suspendidas, mayor será la



turbidez, lo que sugiere un aumento en la presencia de microorganismos como bacterias, virus, protozoos patógenos, entre otros (Gaitán, 2019).

#### **2.10.11. Límites Máximos Permisibles (LMP)**

Para regular los niveles de sustancias físicas, químicas y biológicas en efluentes o emisiones y prevenir impactos negativos en la salud y el medio ambiente, el Ministerio del Ambiente dictó el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. Este decreto establece los Límites Máximos Permisibles (LMP) aplicables a los efluentes generados por las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales PTAR (MINAM, 2010).

#### **2.10.12. Degradación de materia orgánica**

Según (Thomas et al., 2021) afirman que, en los procesos de depuración evaluados, la eliminación de material orgánico (DQO y DBO) ocurre a temperaturas y presiones cercanas a las ambientales. La presencia suficiente de radicales hidroxilos permite la oxidación efectiva de los contaminantes orgánicos. Este radical ( $\text{OH}^*$ ) es uno de los oxidantes más potentes ( $E_0 = 2,73 \text{ V}$ ), es mucho más fuerte que otras especies oxidantes convencionales. Debido a su alta reactividad, el radical hidroxilo ataca de manera no selectiva las moléculas orgánicas a alta velocidad. Estos radicales se consumen rápidamente, por lo que deben generarse continuamente durante el proceso. La oxidación de los compuestos orgánicos produce especies intermedias que pueden oxidarse aún más hasta formar  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Dado que los radicales hidroxilos se descomponen rápidamente en agua y oxígeno, presentan una preocupación ambiental mínima a largo plazo, lo que los hace seguros y fáciles de manejar. Además, el hierro es un material asequible, ecológico y respetuoso con el medio ambiente. El pH óptimo

es aproximadamente 3, y las cantidades de catalizador y peróxido de hidrógeno, así como la temperatura y el tiempo de reacción, deben determinarse experimentalmente, como se describe en las Ecuaciones 3 y 4.

### **2.10.13. Cinética de reacción de Langmuir-Hinshelwood**

El modelo cinético exponencial (no lineal) de Langmuir-Hinshelwood (L-H) que se utiliza para describir la cinética de degradación de compuestos en superficies catalíticas. Este modelo es particularmente útil para procesos de fotocatalisis heterogénea y otros tipos de reacciones que ocurren en superficies. (Lucioni, 2011) estudia la degradación fotoinducida del colorante Rodamina B utilizando óxido de zinc (ZnO) como fotocatalizador y luz solar como fuente de radiación en sistemas abiertos.

Para realizar los estudios cinéticos, (Garcia & Ayala, 2024) utilizó las condiciones operativas óptimas de su diseño experimental tomo muestras en distintos momentos de: 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 minutos, y determinó la concentración de DQO. La ecuación (L-H) es un modelo cinético simplificado no lineal (exponencial) de L-H, la cual describe con mayor precisión la degradación de compuestos orgánicos en procesos fotocatalíticos heterogéneos. Esta simplificación ayuda a reducir el margen de error que presentan las ecuaciones lineales (Asenjo et al., 2013). En los experimentos de Foto-Fenton, se considera que la reacción clave en este proceso es la interacción de los radicales hidroxilos (OH\*) con el contaminante. Por lo tanto, la velocidad de reacción se expresa a través de las siguientes ecuaciones aplicando integral.

$$\frac{dCA}{dt} = -kCA$$

$$\int \frac{dCA}{dt} = - \int k * dt$$

$$\ln\left(\frac{CA}{C_0}\right) = -k * t$$

Modelo cinético exponencial simplificado de L-H

$$CA = C_0 \exp(-k_{app} t)$$

- Donde  $C_0$  es la concentración inicial (mg/L),  $CA$  es la concentración (mg/L) en el tiempo  $t$  (min) y  $k_{app}$  es la constante de velocidad aparente (min<sup>-1</sup>).

#### **2.10.13.1. Diseño Taguchi**

El método Taguchi es una estrategia de diseño experimental que se emplea para mejorar procesos y crear sistemas de alta calidad. Este enfoque reduce significativamente la cantidad de experimentos necesarios, garantizando al mismo tiempo resultados precisos y consistentes. Utiliza una matriz ortogonal, que representa un conjunto de pruebas realizadas bajo diversas condiciones, para distribuir las variables seleccionadas en los experimentos. Gracias a su simplicidad, eficiencia y enfoque metódico, el método Taguchi se destaca como una herramienta valiosa para la optimización de procesos (Li et al. 2019).

#### **2.11.13.2. Levenberg Marquardt**

El método guarda semejanza con el de Newton, pero se distingue por la inclusión de un parámetro denominado de regularización o de Levenberg-Marquardt. Este elemento se utiliza para proporcionar estabilidad al enfoque de Newton y se ajusta automáticamente en cada



iteración dependiendo del comportamiento de la convergencia (Hassan et al. 2016)

## **2.11. FACTORES QUE CONDICIONAN LA EFICIENCIA DE LOS PROCESOS FENTON Y FOTO-FENTON**

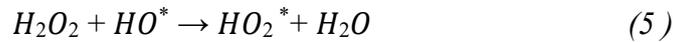
Diversos estudios han demostrado que los procesos de Fenton y Foto-Fenton alcanzan su máxima eficiencia cuando se consideran ciertos parámetros que afectan directamente su rendimiento. Entre estos factores se incluyen la concentración del agente oxidante y el catalizador, así como la influencia de la temperatura, Además, el pH y el tiempo de reacción son aspectos importantes a tener en cuenta (Rubio et al., 2014)

### **2.11.1. Concentración de peróxido de hidrógeno y sales de hierro**

La cantidad de  $H_2O_2$  y los iones de  $Fe^{+2}$  son factores determinantes en el proceso en cuestión. La concentración de  $H_2O_2$  afecta principalmente la eficiencia del proceso, mientras que la concentración de  $Fe^{+2}$  influye en la cinética del mismo. La eficiencia y la velocidad de la resistencia aumentan con las concentraciones de estos aditivos. No obstante, es fundamental señalar que una elevada concentración de  $Fe^{+2}$  puede reducir la eficiencia del proceso debido a la posible activación de reacciones secundarias indeseables. Además, un exceso de  $H_2O_2$  puede llevar a la destrucción del proceso debido a la presencia de radicales hidroxilos (Aliaga, 2010).

Si durante el proceso de Fenton se presenta exceso de  $H_2O_2$  en el proceso de Fenton, se produce una mayor generación de radicales hidroxilos ( $OH^*$ ) o una mayor regeneración de  $Fe^{+2}$ . Esto resulta en un aumento de la velocidad de la reacción debido a la elevada concentración de peróxido y radicales  $OH^*$ , lo que a

su vez provoca la disminución de estos componentes, según la ecuación siguiente (Salas, 2010).



Además, la concentración residual de peróxido que permanece en el medio tras el tratamiento puede resultar tóxica, lo que implica la necesidad de ajustar la cantidad de peróxido utilizado en el proceso de Fenton. La utilización de  $Fe^{+2}$  en el proceso de Fenton favorece la extensión de la reacción, ya que incrementa la producción de radicales  $OH^*$  (Salas, 2010).

Además, en la investigación realizada por (Samet et al., 2012) descubrieron que la eliminación de DQO mejora cuando se incrementa la velocidad de dosificación de peróxido de hidrógeno, pasando de 30 mg/min a 180 mg/min. De manera similar, estos autores observaron un aumento en la eliminación de DQO al incrementar la cantidad de sales de hierro, notando así un efecto catalizador más pronunciado.

### **2.11.2. Tiempo de reacción**

Se ha demostrado que utilizar tiempos de residencia prolongados no es económicamente viable; en cambio, emplear períodos de reacción más cortos permite alcanzar niveles efectivos de degradación de contaminantes, en comparación con otros métodos de oxidación (Gil et al., 2003).



### **2.11.1. Influencia de la presencia de aniones**

Algunos aniones, ya sean orgánicos o inorgánicos, pueden formar complejos con hierro, lo que impide su reacción efectiva. La formación de estos complejos a menudo depende del pH, lo que puede limitar el proceso Fenton. Este inconveniente se puede abordar utilizando radiación solar o ultravioleta para descomponer estos complejos, como los oxalatos, además, se ha observado que la presencia de carbonatos, bicarbonatos, fosfatos, cloruros y sulfatos en aguas residuales reduce la reactividad del proceso Fenton. Por ejemplo, los cloruros pueden inhibir la reacción del radical  $\text{OH}^*$  al actuar como secuestradores de dicho radical (Gil et al., 2003).

### **2.11.4. Influencia de pH en proceso fotocatalítico**

Dado que el pH es un factor clave en este proceso, es crucial llevar a cabo las reacciones en un entorno ácido para producir radicales  $\text{OH}^*$  y lograr altas velocidades de reacción. Varios expertos han determinado que para que este proceso sea efectivo, el pH debe estar en un rango de 2,5 a 4 (Robles & Cevallos, 2021).

(Durán et al., 2011) indica que el pH ideal para la formación de radicales hidroxilos ( $\text{OH}^*$ ) durante la elaboración del peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) en presencia de sales de hierro debe ser de 2,8. Además, un alto nivel de acidez o alcalinidad puede reducir la efectividad en la degradación del contaminante.

De manera similar, (Samet et al., 2012) determinaron que el pH óptimo es de 3, indicando que al superar un pH de 3,5, la degradación se ve afectada negativamente, ya que en estas condiciones el hierro tiende a precipitarse como hidróxido.



## 2.12. MARCO LEGAL

- La Ley N° 29158, Ley Orgánica del Poder Ejecutivo, aprueba los Límites Máximos Permisibles para Efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (MINAM, 2010).
- La Ley de Recursos Hídricos N° 29338 del 01-04-2009, en su artículo 79°, dispone que la Autoridad Nacional del Agua (ANA) autoriza el vertimiento de agua residual tratada en cuerpos de agua naturales, continentales o marinos, tras una opinión técnica favorable de las Autoridades Ambientales y de Salud, asegurando el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-agua) y LMP (MINAM, 2017).
- Mediante la Resolución Ministerial N° 121-2009-MINAM, aprueba el Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP), que incluye en sus anexos la elaboración de los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de fuentes domésticas.
- El Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM aprueba los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de forma cuantitativo y experimental, se enmarcó según (Muñoz, 2019), que es de tipo cuantitativo cuyo enfoque de investigación se da en recolección de datos numéricos por ende es cuantificable, y al ser experimental permitirá la manipulación de las variables como concentración de reactivos.

#### 3.2. ÁMBITO DE ESTUDIO

El presente proyecto se llevó a cabo en la laguna de oxidación ubicado en el extremo sur de la ciudad de Puno, entre la Isla Espinar y los Barrios de Chanu-Chanu frente al cuartel Manco Capac, distrito de Puno, provincia de Puno, región Puno.

#### Figura 2

*Laguna de Oxidación de la ciudad Puno.*



Las muestras de agua residual de cada punto de muestreo se llevaron al laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano, para los respectivos análisis se enviaron a los laboratorios para encontrar

las dosificaciones del agente oxidante y del catalizador se envió al Megalaboratorios Químicos de los Andes S.A.C y para la concentración óptima de la degradación de la DQO se envió al laboratorio de control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química.

### 3.3. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La laguna de oxidación está ubicada en el extremo sur de la Ciudad de Puno, entre la Isla Espinar y los Barrios de Chanu-Chanu. Los puntos de muestreo se identificaron con códigos LOP-01 y LOP-02.

**Tabla 3**

*Coordenadas del lugar de estudio*

COORDENADAS GEOGRÁFICAS UTM SISTEMA UTM		
	LOP-01	LOP-02
Sur	15°51'11"	15°51'03"
Norte	69°59'54"	70°00'23"
Altitud	3 821,29 msnm	3 818,62 msnm

**Figura 3**

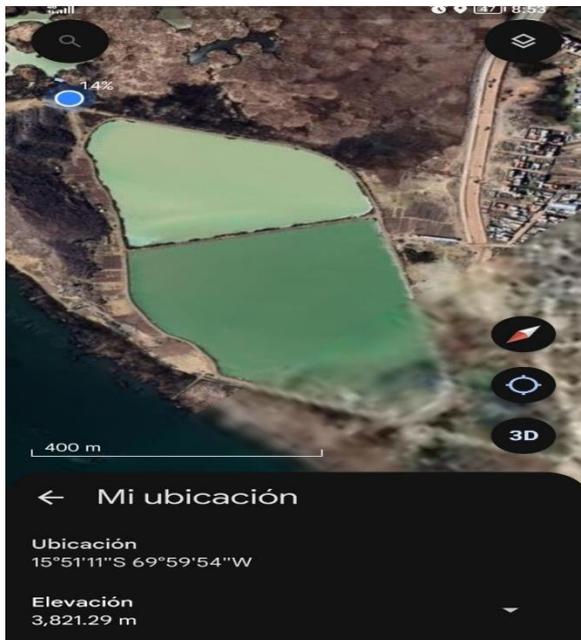
*Primer punto de muestreo LOP-01*



Fuente: <https://earth.google.com>

## Figura 4

### Segundo punto de muestreo LOP-02



Fuente: <https://earth.google.com>

## 3.4. VARIABLES DE ESTUDIO

Tabla 4

### Variables de estudio

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
V. I. Concentración del agente oxidante	Concentración de peróxido de hidrógeno Punto LOP-01 (8, 16, 24) Punto LOP -02 (8, 14, 20)	Concentración óptima de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ml/L
Concentración del catalizador	Concentración de sulfato ferroso Punto LOP-01 (0,8; 1,6; 2,4) Punto LOP -02 (0,8; 1,4; 2,0)	Concentración óptima de FeSO <sub>4</sub>	mg/L
V. D. Calidad de las aguas residuales	Demanda química de oxígeno (DQO)	Concentración de DQO	mg/L



### **3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA**

#### **3.5.1. Población**

En esta investigación, se consideró dos puntos de estudio como población a las aguas residuales domésticas de la laguna de oxidación de la Ciudad de Puno. La población incluye tanto las aguas residuales que ingresan a la laguna como las que salen de ella, generadas por la población de la Ciudad de Puno.

#### **3.5.2. Muestra**

La muestra tomada para la caracterización y los procesos de tratamiento consistió en 15 litros de aguas residuales provenientes de la laguna de oxidación de la Ciudad de Puno. Se realizaron tomas de muestra en dos puntos: 15 litros de aguas residuales de LOP – 01 y LOP -02 de la Ciudad de Puno, ubicada en el extremo sur de la Ciudad de Puno, entre la Isla Espinar y los Barrios de Chanu-Chanu.

#### **3.5.3. Materiales**

##### **3.5.3.1. Materia experimental**

La población de muestras en este estudio son las aguas de la Laguna de Oxidación en los dos puntos ya detallados en la tabla 3, en el distrito de Puno, provincia de Puno y en la región de Puno, y para ello se tomó una muestra representativa de 15 litros por cada punto de muestreo para los respectivos tratamientos en el laboratorio de control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química.



### **3.5.3.2. Equipo de muestreo manual**

- Las muestras y envases fueron basados en la N°2484-2015-ANA-DGCRH de la Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos, ver anexo 1.

### **3.5.3.3. Procedimiento de muestreo**

- Las muestras fueron tomadas en cada punto detallado en la tabla 3, las muestras fueron tomadas en un balde enjuagando tres veces para el análisis de caracterización, para los tratamientos y su respectiva lectura de parámetros de campo.

### **3.5.3.4. Preservación de la muestra y transporte**

- Las muestras de agua de la laguna de oxidación fueron preservadas según el anexo 1, dicho ello fue según los parámetros analizados y también fueron refrigerados en un cooler usando hielos de gel para la llegada al laboratorio, por ello se cumplió hasta la entrega de muestras en el laboratorio de control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química.

### **3.5.3.5. Identificación de muestras**

- Para ello, se utilizó etiquetas y cadena de custodia y registros de campo basándose en los registros de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), Anexo 1.



### **3.5.4. Equipos**

#### **3.5.4.1. Equipos de protección personal (EPPs)**

- Mandil
- Chaleco
- Zapatos de seguridad
- Guantes
- Lentes
- Mascarillas

#### **3.5.4.2. Equipos de muestreo**

- Multiparámetro modelo HASH EQ40
- Turbidímetro modelo HASH DR900
- Baldes de 15 L
- Piseta
- Papel toalla
- Marcadores
- Etiquetas
- Tabla para hojas

#### **3.5.4.3. Materiales de Laboratorio**

- Vasos precipitados



- Matraz Erlenmeyer
- Pipetas
- Probetas
- Cronómetro
- Bagueta
- Fiolas
- Papel aluminio
- Botellas polietileno
- Magnetos

#### **3.5.4.4. Equipos e instrumentos en el laboratorio**

- Reactor tubular en espiral concéntrico
- pH-metro marca HANNA, modelo HI 98130
- Potenciómetro, Marca FISHER SCIENCE EDUCATION
- Balanza analítica, Marca METTLER TOLEDO AB2 04 Max. 210  
g Min. 10 mg
- Botellas polietileno
- Agitador magnético
- Pissetas
- Motor peristáltico



#### 3.5.4.5. Reactivos

- Ácido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) 96,98 % de concentración
- 1 L peróxido de Hidrógeno ( $H_2O_2$ ) al 30% de concentración
- 300g Sulfato ferroso ( $FeSO_4$ ) de 99% de pureza
- 100g Hidróxido de Sodio ( $NaOH$ ) 99 % de concentración

### 3.6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 3.6.1. Diseño experimental

La presente investigación tuvo un enfoque experimental y se desarrolló en el programa estadístico de Minitab 18 y se empleó un diseño factorial  $3^2$  bajo la metodología Taguchi, donde se generaron 9 combinaciones por cada punto experimental para las comparaciones de las variables de concentración de  $FeSO_4$  y  $H_2O_2$  encontrando la concentración óptima (Salazar & Ortega, 2018). Este enfoque experimental se observa en las Tablas 5 y 6, la cual permitió analizar las interacciones entre los factores y sus niveles, optimizando las condiciones del proceso y asegurando la replicabilidad de los resultados en diferentes configuraciones. Para determinar la eficiencia de la remoción de la DQO (%) se realizó en un tiempo de 60 minutos en 9 corridas experimentales para cada punto y para el modelo cinético se aplicó la ecuación de Langmuir-Hinshelwood y el diseño estadístico es por el método Levenberg marquardt para ver la degradación de la DQO en la dosificación óptima en el proceso fotocatalítico.



### Tabla 5

*Diseño experimental de Taguchi para LOP-01*

#### Resumen del diseño para LOP-01

Arreglo de Taguchi	L9(3 <sup>2</sup> )
Factores:	2
Corridas:	9

### Tabla 6

*Diseño experimental de Taguchi para LOP-01*

#### Resumen del diseño para LOP-02

Arreglo de Taguchi	L9(3 <sup>2</sup> )
Factores:	2
Corridas:	9

### 3.6.2. Técnicas analíticas

Para la caracterización y determinación de los parámetros físicos (temperatura y sólidos totales disueltos), químicos (Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno y pH), se enviaron muestras al laboratorio de control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química.

Las técnicas utilizadas para el análisis de aguas residuales se llevaron a cabo siguiendo los métodos estandarizados del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23<sup>a</sup> edición, 2017). El parámetro de estudio de la demanda química de oxígeno (DQO) se midió utilizando la técnica descrita en la Tabla 7.

**Tabla 7***Técnica de análisis de la demanda química de oxígeno*

Parámetro	Norma de referencia	Técnica de análisis
Demanda química de oxígeno	Standard Test Methods	Digestión cerrada

### 3.6.3. Instrumentos para la Recolección de la Información

#### 3.6.3.1. Características del reactor fotocatalítico tubular espiral concéntrico

El equipo fotocatalítico tubular espiral concéntrico tiene un tubo de material de borosilicato en forma espiral, y en el centro cuenta con una lámpara de mercurio la cual genera radiaciones de tipo UV, y la parte exterior está cubierta por una pared cilíndrica de acero inoxidable, y el caudal del agua a la entrada y salida del equipo es de 0,0122 L/s rodeado de la luz que emite la lámpara. El tubo de la lámpara tiene una potencia de 38 W y tiene una medida de 20 cm de largo y 1,5 cm de diámetro. La luz UV de la lámpara es de 254 nm. Para asegurar la uniformidad del sistema, también incluye un recipiente de almacenamiento (vaso de precipitados) y una bomba sumergible para la recirculación.

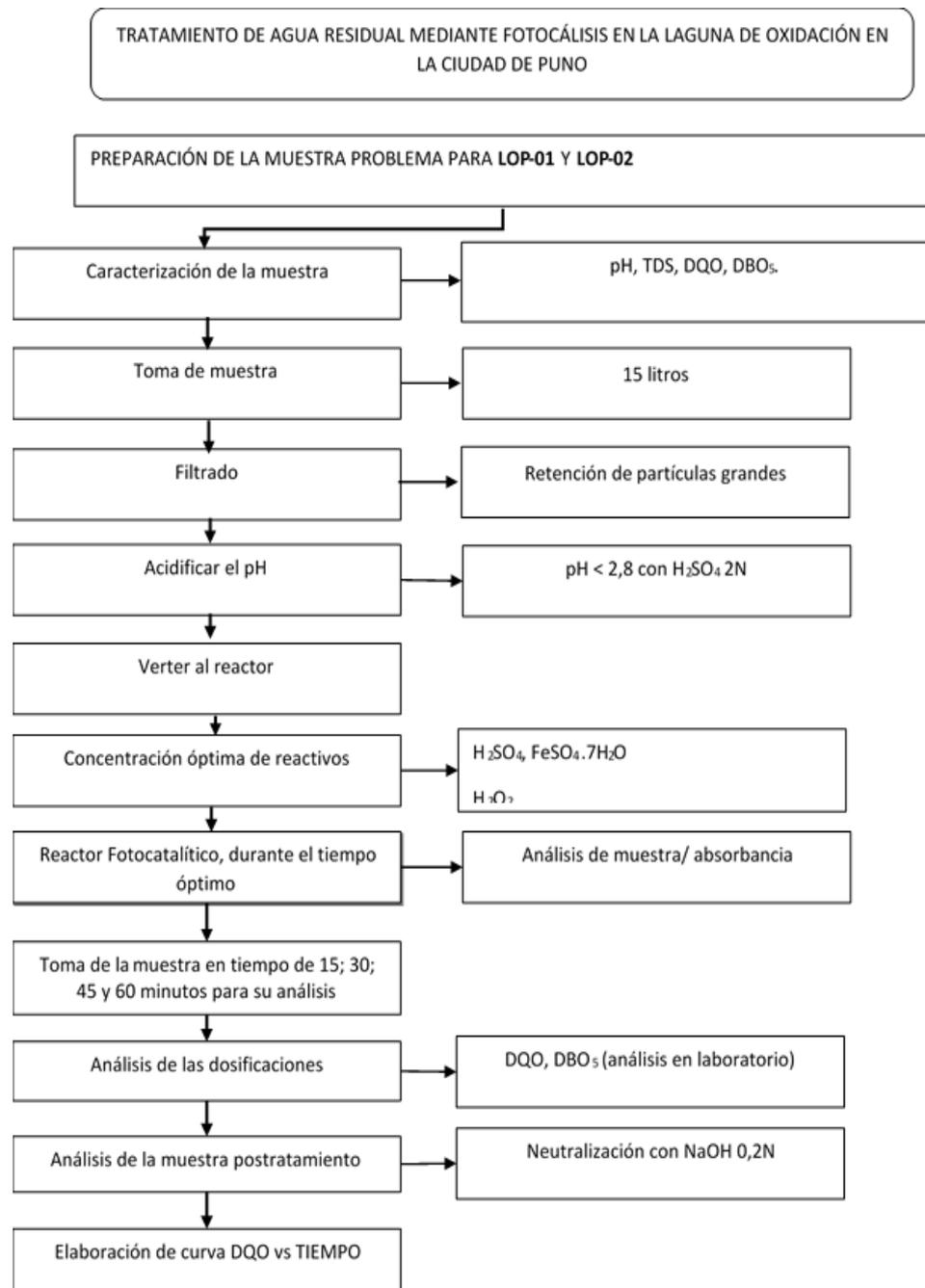
## Figura 5

### *Reactor Fotocatalítico*



**Figura 6**

*Diagrama de flujo*



### 3.7. PROCESO METODOLÓGICO

En este proyecto de investigación se realizó en 4 fases las cuales consistieron en toma de muestra, caracterización del agua residual, pretratamiento, tratamiento, postratamiento.

#### 3.7.1. Primera fase: Toma de muestras

En esta fase consistió en tomar 15 L del agua residual para cada punto (LOP-01 y LOP-02) en la laguna de oxidación de la Ciudad de Puno, las aguas residuales fueron muestreados en dos puntos ya mencionados, el LOP-01 y el LOP-02 fue en la laguna de oxidación, para ello se midió los parámetros de campo como el pH, Turbidez, TDS y temperatura.

#### Figura 7

*Equipos de monitoreo ambiental*



**Figura 8**

*Punto de muestreo LOP-01*



**Figura 9**

*Punto de muestreo LOP-02*



### 3.7.2. Segunda fase: Caracterización de las muestras

Para la caracterización de cada punto tomado, las muestras se transportaron en un cooler con geles refrigerantes, hasta su entrega al laboratorio

de control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química para su respectivo análisis como son los parámetros de la DQO, DBO<sub>5</sub>.

### Figura 10

*Toma de muestras para el análisis de caracterización LOP-01*



### Tabla 8

*Caracterización inicial de la muestra LOP-01*

Parámetros	Unid.	Resultados
Potencial de Hidrógeno	pH	8,92
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	340,49
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	851,23
Turbiedad	NTU	3710

La caracterización de la muestra LOP-01, fue enviado al laboratorio de Control de Calidad de la FIQ-UNAP, emitiendo el informe de ensayo (ANEXO 2)

**Figura 11**

*Toma de muestras para el análisis de caracterización LOP-02*



**Tabla 9**

*Caracterización Inicial de la muestra LOP-02*

Parámetros	Unid.	Resultados
Potencial de Hidrógeno	pH	7,09
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	259,328
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	648,32
Turbiedad	NTU	93

La caracterización de la muestra de LOP-02 para su respectivo análisis se envió al laboratorio de control de calidad de la FIQ - UNA.

### 3.7.3. Tercera fase: Pretratamiento de las aguas residuales

En esta fase consistió en separar las partículas de mayor tamaño para evitar las interferencias en la etapa del tratamiento, para ello muestreo 500mL de agua residual municipal con una probeta seguidamente se filtró con una malla con la finalidad de retener cualquier sólido grueso que pueda dificultar el tratamiento.

**Figura 12**

*Filtración de partículas LOP-01 MIT9*



**Figura 13**

*Filtración de partículas LOP-02 M2T11*





#### **3.7.4. Cuarta fase: Tratamiento del agua residual**

#### **3.7.5. Determinación de la concentración óptima de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso**

Se instaló el reactor fotocatalítico tubular espiral concéntrico recirculando a una velocidad de 12 ml/s durante un periodo de 1 hora para iniciar el proceso de tratamiento del agua residual de los puntos de muestreo LOP-01 y LOP-02, el cual fue equipado con una lámpara de mercurio para activar el proceso.

Se tomó una muestra de 500 ml en un vaso precipitado de capacidad de 1 L seguidamente se procedió a medir el pH con el equipo potenciómetro; se procedió a acidular con ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$  2N) ajustando a un pH 2,8 para la eficiencia de la degradación.

Este proceso se realizó para cada uno de los 9 tratamientos establecidos en ambos puntos LOP-01 y LOP-02. Se empleó un diseño factorial Taguchi  $3^2$ , para evaluar diferentes dosis de peróxido de hidrógeno (8 ml/L, 16 ml/L, 24 ml/L) y sulfato ferroso (0,8 g/L; 1,6 g/L; 2,4 g/L) para LOP-01, así como concentración de peróxido de hidrógeno (8 ml/L; 14 ml/L; 20 ml/L) y sulfato ferroso (0,8 g/L, 1,4 g/L, 2,0 g/L) para LOP-02 así como se muestran en las tablas 10 y 11. Al finalizar el proceso de tratamiento se tomó las muestras de 100 ml para analizar la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de tratamientos este análisis permitió determinar la eficiencia de cada tratamiento y la dosificación óptima de los reactivos.

A partir de los resultados obtenidos de las corridas experimentales en LOP – 01 se identificó la dosis óptima de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso que logró la mayor reducción en DQO.



**Tabla 10**

*Matriz factorial (factores y niveles del proceso Foto-Fenton) para LOP - 01*

Tratamientos	Concentración de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml/L)	Concentración de FeSO <sub>4</sub> (g/L)
M1T1	8	0,8
M1T2	8	1,6
M1T3	8	2,4
M1T4	16	0,8
M1T5	16	1,6
M1T6	16	2,4
M1T7	24	0,8
M1T8	24	1,6
M1T9	24	2,4
M1T10R	8	2,4
M1T11R	16	2,4
M1T12R	24	2,4

A partir de los resultados obtenidos de las corridas experimentales en LOP -02, se identificó la concentración óptima de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso que logró la mayor reducción en DQO.



**Tabla 11**

*Matriz factorial (factores y niveles del proceso Foto-Fenton) para LOP - 02*

Tratamientos	Concentración de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml/L)	Concentración de FeSO <sub>4</sub> (g/L)
M2T1	8	0,8
M2T2	8	1,4
M2T3	8	2,0
M2T4	14	0,8
M2T5	14	1,4
M2T6	14	2,0
M2T7	20	0,8
M2T8	20	1,4
M2T9	20	2,0
M2T10R	8	2,0
M2T11R	14	2,0
M2T12R	20	2,0

### 3.7.6. Quinta fase: Postratamiento

Una vez encontrada las concentraciones óptimas de cada punto tratada se procedió a neutralizar la muestra tratada con hidróxido de sodio NaOH a 0,2 M.

Se comparó con el decreto supremo N°003-2010-MIMAN son para aprueba Límites Máximos Permisibles para efluentes de Plantas de Tratamientos de Aguas Residuales, Domésticas o Municipales.

### 3.7.7. Determinación de la eficiencia de la remoción de la DQO

En el proceso de Foto-Fenton, antes de la homogenización del agua residual, se aplicaron distintas dosis de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y Sulfato ferroso ( $FeSO_4$ ) a un pH de 2,88. (Robles & Cevallos, 2021) mencionan que un pH ácido entre 2,5 y 3,0 favorece la generación de radicales hidroxilos en mayor cantidad. Además, se instaló una lámpara UV de 5W en línea para la regeneración del catalizador ( $Fe^{2+}$ ).

Se monitoreó la demanda química de oxígeno (DQO) en cada experimento, ya que este parámetro refleja la cantidad de materia orgánica y permite evaluar el nivel de contaminación en el agua residual. La variable de respuesta se expresará en términos de la eficiencia de la remoción de DQO, la cual se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia de la remoción de la DQO} = x = \frac{(DQO_i - DQO_f)}{DQO_i} * 100$$

Donde:

( $DQO_i$  es la concentración de la DQO inicial de la muestra en (mg/L).

( $DQO_f$  en la concentración de DQO después del tratamiento en (mg/L).

### 3.7.8. Modelo cinético de la DQO en el proceso fotocatalítico

Para el análisis cinético, se llevó a cabo el tratamiento de aguas residuales empleando las concentraciones óptimas del agente oxidante y del catalizador, obtenidas a partir del diseño experimental Taguchi en los ensayos del tratamiento de LOP-01 y LOP-02. Durante el proceso de tratamiento, se tomaron muestras en tiempos específicos de (15, 30, 45 y 60 minutos), con el objetivo de monitorear la



evolución de la reacción. Se aplicó un modelo cinético para analizar los cambios de velocidad de degradación de la DQO utilizando el modelo cinético exponencial de Langmuir-Hinshelwood. (Lucioni, 2011). Se inició la degradación del contaminante para encontrar el equilibrio de adsorción y desorción en superficie del semiconductor y la fase fluida para así empezar la degradación mediante un mecanismo que involucra radicales de hidroxilo en la fotocatalisis con reactivo Foto-Fenton, Ecuación (L-H).

$$CA = C_0 \exp(-k_{app} t)$$



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de esta sección del capítulo fueron elaborados conforme a los objetivos específicos propuestos en la investigación. Los datos obtenidos se presentan a través de análisis en tablas y figuras, con interpretaciones fundamentadas en el marco teórico y en investigaciones previas que sirven como antecedentes.

#### **4.1. DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA DE PERÓXIDO DE HIDRÓGENO Y SULFATO FERROSO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DE LA LAGUNA DE OXIDACIÓN EN LA CIUDAD DE PUNO.**

- Para LOP-01; en la Tabla 10 se presenta las concentraciones de agente oxidante y del catalizador. Las concentraciones requeridas de reactivos se estimaron en base a la DQO. Para determinar las concentraciones de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y Sulfato ferroso ( $FeSO_4$ ) se basó en los resultados obtenidos en el informe de ensayo emitido por el Megalaboratorios Químicos de los Andes S.A.C. con resultados para la DQO.

**Tabla 12***Resultados de las concentraciones optimas en base a la DQO*

Tratamientos	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml/L)	FeSO <sub>4</sub> (g/L)	Concentración inicial (mg/L)	Concentración DQO	Concentración del tratamiento (mg/L)	final DQO
M1T1	4	0,4	851,23		255,829	
M1T2	4	0,8	851,23		279,707	
M1T3	4	1,2	851,23		194,430	
M1T4	8	0,4	851,23		208,071	
M1T5	8	0,8	851,23		225,130	
M1T6	8	1,2	851,23		146,675	
M1T7	12	0,4	851,23		272,885	
M1T8	12	0,8	851,23		231,952	
M1T9	12	1,2	851,23		143,264	
M1T10R	4	1,2	851,23		184,608	
M1T11R	8	1,2	851,23		150,086	
M1T12R	12	1,2	851,23		139,853	

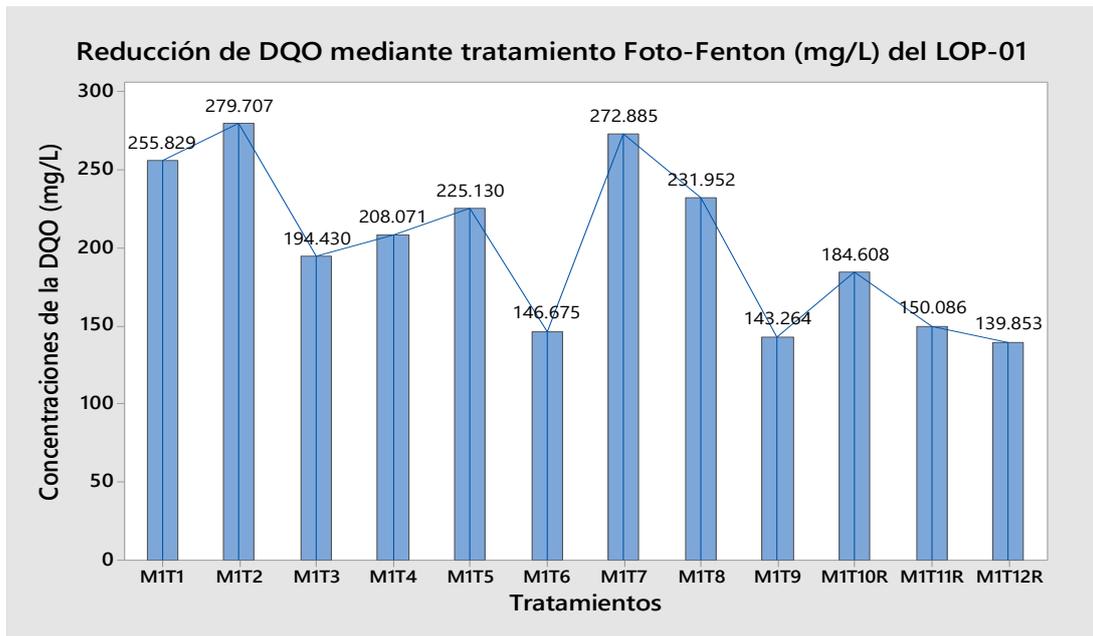
Nota: Ensayos realizados en muestra a 500ml

Según (Vargas, 2022), las concentraciones de los reactivos fueron estimados en base a la DQO, el desarrollo de sus tratamientos estimaron la concentración efectiva de sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno.

Entonces podemos decir en la Tabla 12 se determinó la dosificación optima con el tratamiento M1T3 con una concentración de 4 ml/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 1,2 g/L de FeSO<sub>4</sub>, donde podemos observar el uso de los reactivos son menores y están dentro de los LMP, para su mejor remoción se realizó acidulando la muestra a un pH 2,8.

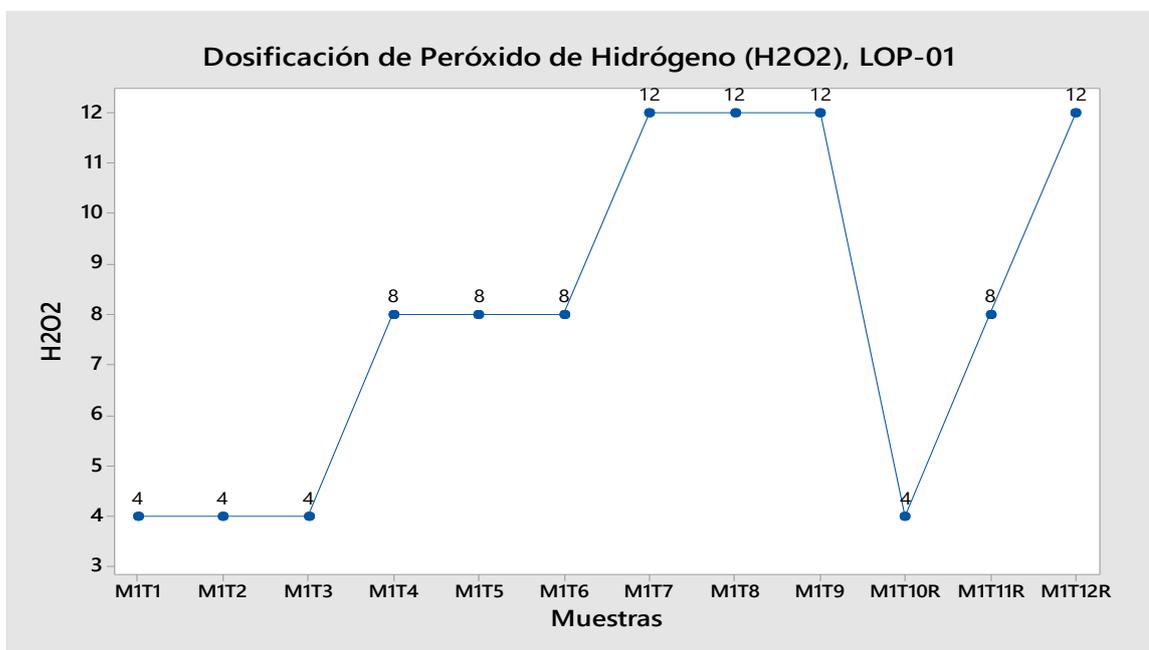
**Figura 14**

*Degradación de la DQO mediante Foto-Fenton de LOP-01*



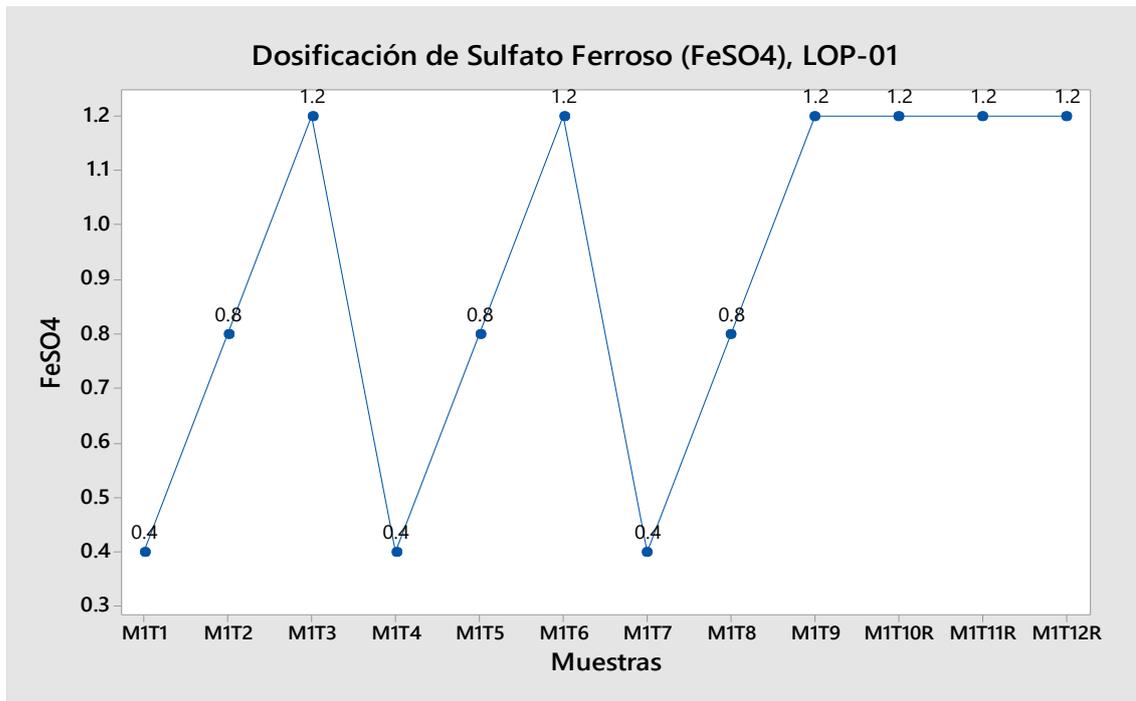
**Figura 15**

*Dosificaciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para LOP-01*



**Figura 16**

*Dosificaciones de FeSO<sub>4</sub> para LOP-01*



Se utilizó la dosificación óptima con la finalidad de minimizar la formación de lodos en exceso, compuestos principalmente de hidróxido de hierro, que durante el estudio se caracterizaron por una consistencia pastosa y un color amarillo pardo. Al concluir el tratamiento, el pH fue ajustado a un valor cercano a la neutralidad (Morillo et al., 2019).

En base a estos resultados de la Tabla 12 y figura 14 podemos determinar las concentraciones de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y Sulfato ferroso (FeSO<sub>4</sub>) y según a los informes de ensayo emitidos por el Megalaboratorios Químicos de los Andes S.A.C. ver el ANEXO 2.

**Tabla 13***Comparación con LMP en LOP-01*

Parámetros	Unid.	Resultados Inicial	Resultados Final	Límites Máximos Permisibles (LMP) en PTAR
Potencial de Hidrógeno	pH	8,92	7,05	6,5-8,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	340,49	77,772	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	851,23	194,43	200
Temperatura	°C	12,2	10,5	<35

En la Tabla 13 se realizó la comparación con los LMP donde se puede observar los parámetros iniciales del agua residual y los parámetros finales después del tratamiento por el proceso fotocatalítico están dentro de los LMP según al informe de ensayo emitido por el Laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química.

- Para LOP-02; en la Tabla 11 se presenta las concentraciones de agente oxidante y del catalizador. Las dosificaciones requeridas de reactivos se estimaron tomando como referencia la DQO del análisis. Fue necesario realizar ensayos para determinar las concentraciones óptimas de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y Sulfato ferroso ( $FeSO_4$ ). La dosificación de sulfato ferroso y peróxido de hidrógeno se basó en los resultados obtenidos en la Tabla 14, donde se realizó para su respectivo análisis en Megalaboratorios Químicos de los Andes S.A.C.



**Tabla 14**

*Resultados de las dosificaciones óptimas en base a la DQO de LOP-02*

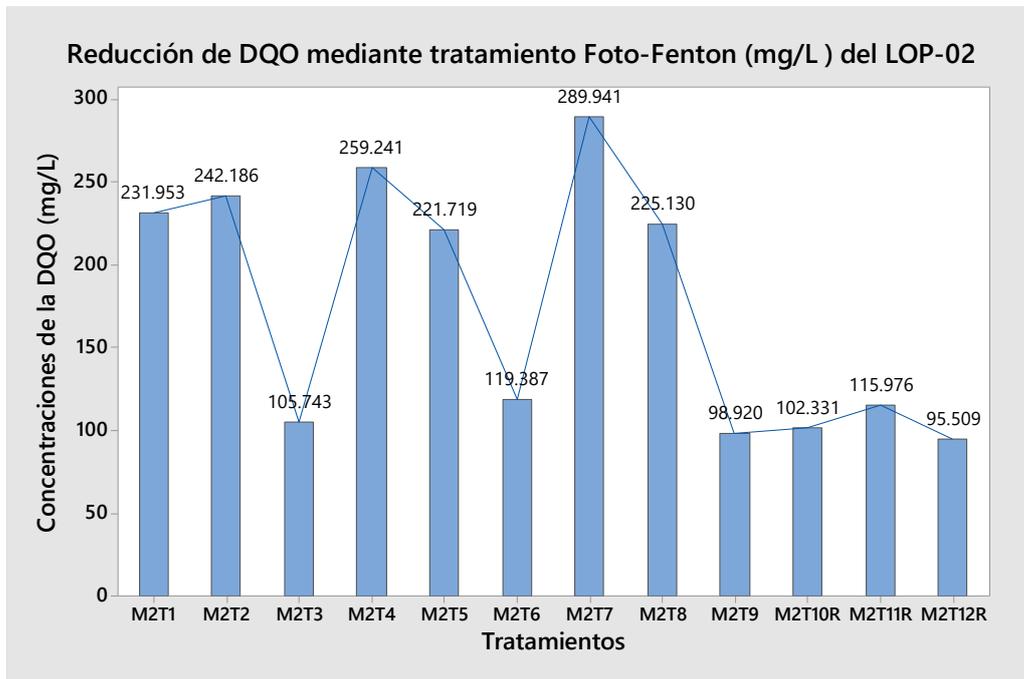
Muestras	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml/L)	FeSO <sub>4</sub> (g/L)	Concentración inicial (mg/L)	Concentración después del tratamiento DQO (mg/L)
M2T1	4	0,4	648,32	231,953
M2T2	4	0,7	648,32	242,186
M2T3	4	1	648,32	105,743
M2T4	7	0,4	648,32	259,241
M2T5	7	0,7	648,32	221,719
M2T6	7	1	648,32	119,387
M2T7	10	0,4	648,32	289,941
M2T8	10	0,7	648,32	225,13
M2T9	10	1	648,32	98,92
M2T10R	4	1	648,32	102,331
M2T11R	7	1	648,32	115,976
M2T12R	10	1	648,32	95,509

Nota: Ensayos realizados en muestra de 500ml

Entonces podemos decir que la M2T3 es nuestra dosificación óptima, con concentraciones de 4 ml/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 1 g/L de FeSO<sub>4</sub>, donde podemos observar el uso de los reactivos son menores y la remoción está dentro de los LMP, para estos resultados de acidulo la muestra llegando a un pH 2,8 para su mejor degradación según (Robles & Cevallos, 2021).

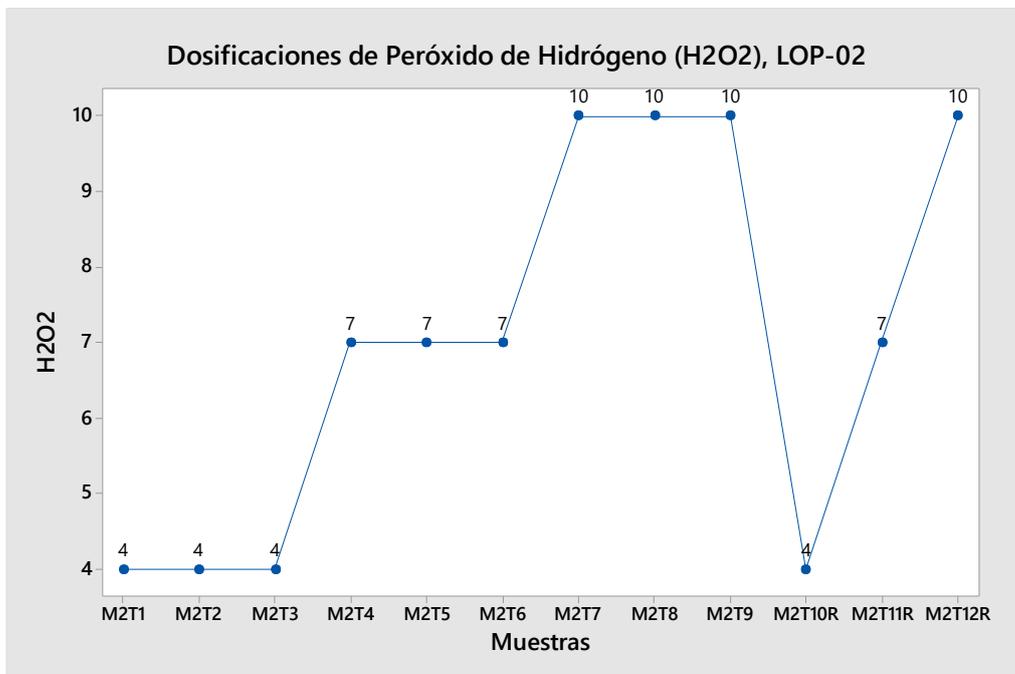
**Figura 17**

*Degradación de la DQO mediante Foto-Fenton de LOP-02*



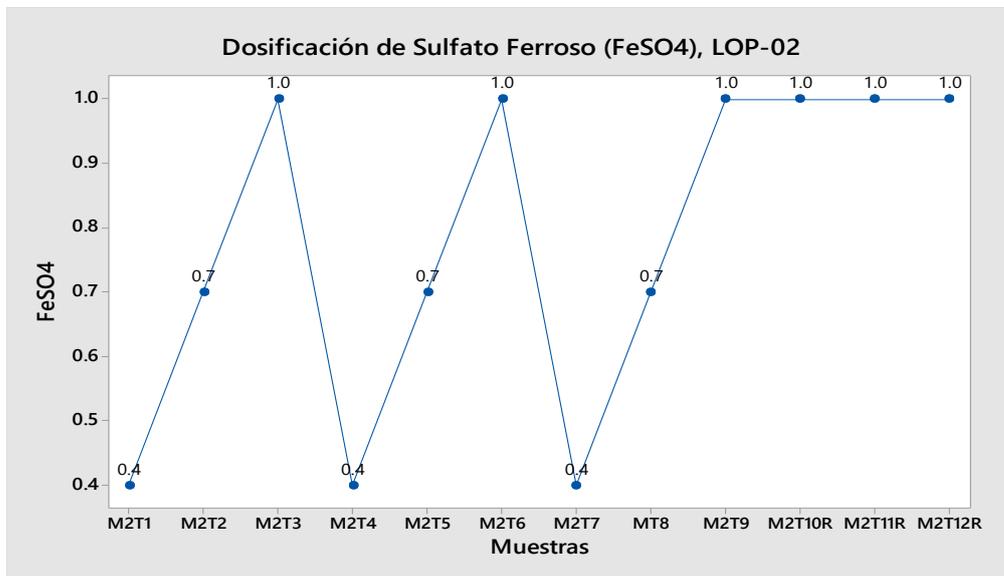
**Figura 18**

*Dosificaciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para LOP-02*



**Figura 19**

*Dosificaciones de  $FeSO_4$  para LOP-02*



Teniendo estos resultados de la Tabla 13 y la figura 17 podemos indicar que las concentraciones de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y Sulfato ferroso ( $FeSO_4$ ) fueron correctamente aplicados debido a la degradación de la DQO; se enfocó según a los informes de ensayo emitidos por Megalaboratorios Químicos de los Andes S.A.C, ver el ANEXO 2.

**Tabla 15***Comparación con LMP en LOP-02*

Parámetros	Unid.	Resultados Inicial	Resultados Final	Límites Permisibles (LMP) en PTAR	Máximos
Potencial de Hidrógeno	pH	7,09	7,02	6,5-8,5	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	259,328	42,297	100	
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	648,32	105,743	200	
Temperatura	°C	12,42	10,05	<35	

En la Tabla 15 se presenta la comparación con los Límites Máximos Permisibles (LMP), mostrando que los parámetros iniciales del agua residual y los resultados obtenidos después del tratamiento mediante el proceso fotocatalítico cumplen con los valores, los resultados fueron emitidos por el laboratorio de control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química.

#### **4.2. DETERMINAR LA EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE LA DQO EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA LAGUNA DE OXIDACIÓN EN LA CIUDAD DE PUNO.**

- Para la LOP-01 la eficiencia de la remoción en base a la DQO podemos observar en la Tabla 16 con diferentes dosificaciones del agente oxidante y catalizador.

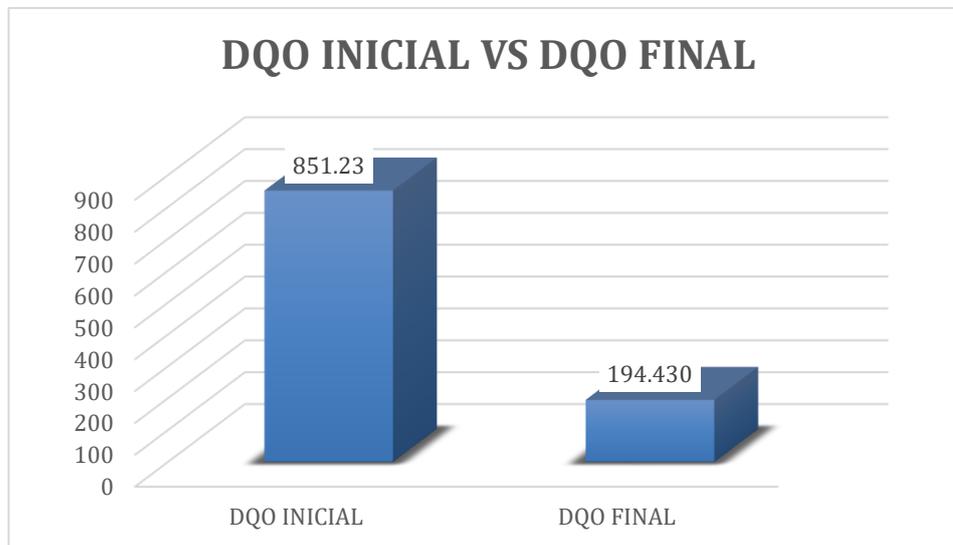
**Tabla 16***Resultados de la remoción en base a la DQO para LOP-01*

Tratamientos	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml/L)	FeSO <sub>4</sub> (mg/L)	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final del tratamiento DQO (mg/L)	Eficiencia de remoción de la DQO (%)
MIT1	8	0,8	851,23	255,829	69,95%
MIT2	8	1,6	851,23	279,707	67,14%
MIT3	8	2,4	851,23	194,430	77,16%
MIT4	16	0,8	851,23	208,071	75,56%
MIT5	16	1,6	851,23	225,130	73,55%
MIT6	16	2,4	851,23	146,675	82,77%
MIT7	24	0,8	851,23	272,885	67,94%
MIT8	24	1,6	851,23	231,952	72,75%
MIT9	24	2,4	851,23	143,264	83,17%
MIT10R	8	2,4	851,23	184,608	78,31%
MIT11R	16	2,4	851,23	150,086	82,37%
MIT12R	24	2,4	851,23	139,853	83,57%

(Valeriano, 2023), realizo comparaciones con los LMP en un PTAR, para ello hizo cálculos con la remoción de la DQO para ver la eficiencia del tratamiento, donde indica que da un resultado de 79,66%.

**Figura 20**

*Resultados de la DQO Inicial VS DQO Final*



**Tabla 17**

*Eficiencia de la remoción en LOP-01*

Dosificación Óptima	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml/L)	FeSO <sub>4</sub> (g/L)	pH	Concentración Inicial de la DQO (mg/L)	Concentración Final de la DQO (mg/L)	Eficiencia de la degradación de la DQO (%)
M1T3	8	2,4	2,8	851,23	194,430	77,16%

En este estudio se tomó como dosificación óptima M1T3 dando un resultado de la eficiencia de la remoción de la DQO a un 77,16% con un gasto mínimo del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y FeSO<sub>4</sub>, entonces podemos decir que el tratamiento es eficaz con el proceso fotocatalítico del método Foto – Fenton.

- Para LOP-02 la eficiencia de la remoción en base a la DQO podemos observar en la Tabla 18 con diferentes dosificaciones del agente oxidante y catalizador y se tomara la concentración óptima juntamente al % de la eficiencia de la remoción de la DQO.

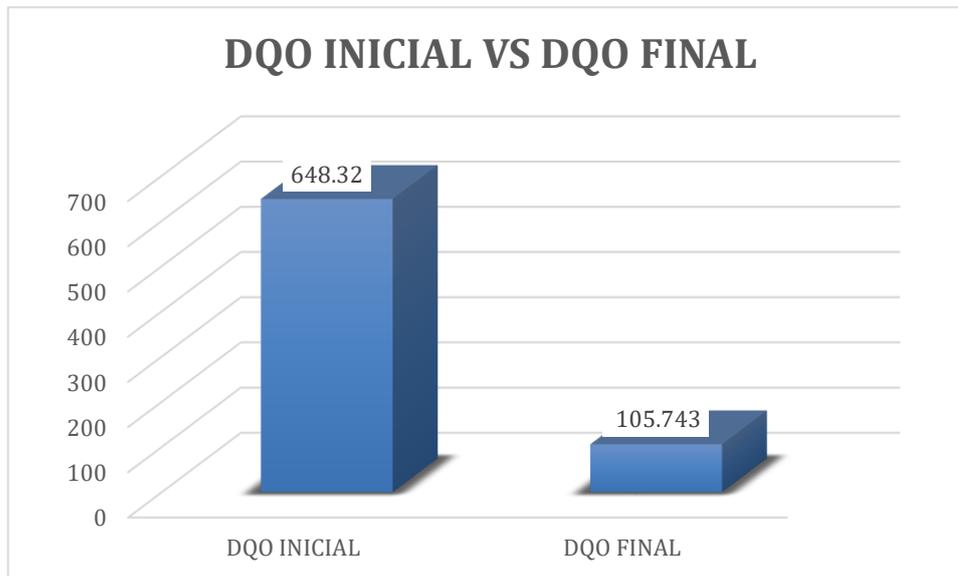
**Tabla 18***Resultados de la remoción en base a la DQO para LOP-02*

Muestras	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml/L)	FeSO <sub>4</sub> (mg/L)	Concentración inicial (mg/L)	Concentración después del tratamiento DQO (mg/L)	Eficiencia de remoción de la DQO (%)
M2T1	8	0,8	648,32	231,953	64,22%
M2T2	8	1,4	648,32	242,186	62,64%
M2T3	8	2	648,32	105,743	83,69%
M2T4	14	0,8	648,32	259,241	60,01%
M2T5	14	1,4	648,32	221,719	65,80%
M2T6	14	2	648,32	119,387	81,59%
M2T7	20	0,8	648,32	289,941	55,28%
M2T8	20	1,4	648,32	225,13	65,27%
M2T9	20	2	648,32	98,92	84,74%
M2T10R	8	2	648,32	102,331	84,22%
M2T11R	14	2	648,32	115,976	82,11%
M2T12R	20	2	648,32	95,509	85,27%

(Huamán & Misme, 2014) en su investigación demostró la eficiencia de aguas residuales comparando con los LMP, donde la eficiencia en la DQO salió 88%. Teniendo como antecedente la comparación con los LMP en aguas residuales, domésticas y municipales en un PTAR y realizamos la comparación con LMP en cada parámetro analizado.

**Figura 21**

*Resultados de la DQO Inicial VS DQO Final LOP-02*



**Tabla 19**

*Dosificación Óptima en LOP-02*

Dosificación Óptima	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml/L)	FeSO <sub>4</sub> (g/L)	pH	Concentración Inicial de la DQO (mg/L)	Concentración Final de la DQO (mg/L)	Eficiencia de la degradación de la DQO (%)
M2T3	4	1	2,8	648,32	105,743	83,69%

En este estudio se tomó como dosificación óptima M2T3 según la Tabla 19 dando un resultado de la eficiencia de la remoción de la DQO a un 83,69% con un gasto mínimo del agente oxidante y el catalizador, entonces podemos decir que el tratamiento es eficaz con el proceso fotocatalítico del método Foto – Fenton.

### 4.3. REALIZAR EL MODELO CINÉTICO DE LA DQO EN EL PROCESO FOTOCATALÍTICO.

#### 4.3.1. Cinética de degradación

Para el modelamiento cinético de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se empleó un **modelo cinético matemático simplificado exponencial de Langmuir-Hinshelwood (L-H)** es una versión simplificada del modelo completo de L-H. La ecuación representa una versión simplificada y no lineal (exponencial) de la siguiente ecuación:

Modelo cinético exponencial simplificado de L-H

$$CA = C_0 \exp(-k_{app} t)$$

- Donde  $C_0$  es la concentración inicial del agua residual de la laguna de oxidación (mg/L)
- $CA$  es la concentración (mg/L) en tiempos  $t$  (0; 15; 30; 45 y 60 min) del tratamiento del proceso fotocatalítico y  $k_{app}$  es la constante de velocidad aparente (min<sup>-1</sup>) en el proceso fotocatalítico.

Esta versión logra describir de manera más precisa la degradación de compuestos orgánicos en procesos de la fotocatalisis, reduciendo el error que se observa al emplear la ecuación lineal (Asenjo et al., 2013).

El ajuste no lineal permite modelar mejor las reacciones complejas en función de la concentración y el tiempo, asimismo (Garcia & Ayala, 2024) menciona que es crucial para optimizar el rendimiento del proceso y minimizar errores de predicción. En la Tabla 20 se presentan los resultados de la concentración de la DQO para LOP-01 en tiempos específicos de (0;15; 30; 45 y 60 min) trabajados

con las concentraciones óptimas estos datos sirvieron para realizar el modelamiento cinético de la degradación de la DQO.

### Tabla 20

*Registro de la concentración cinética de reacción para cada intervalo de tiempo en LOP-01.*

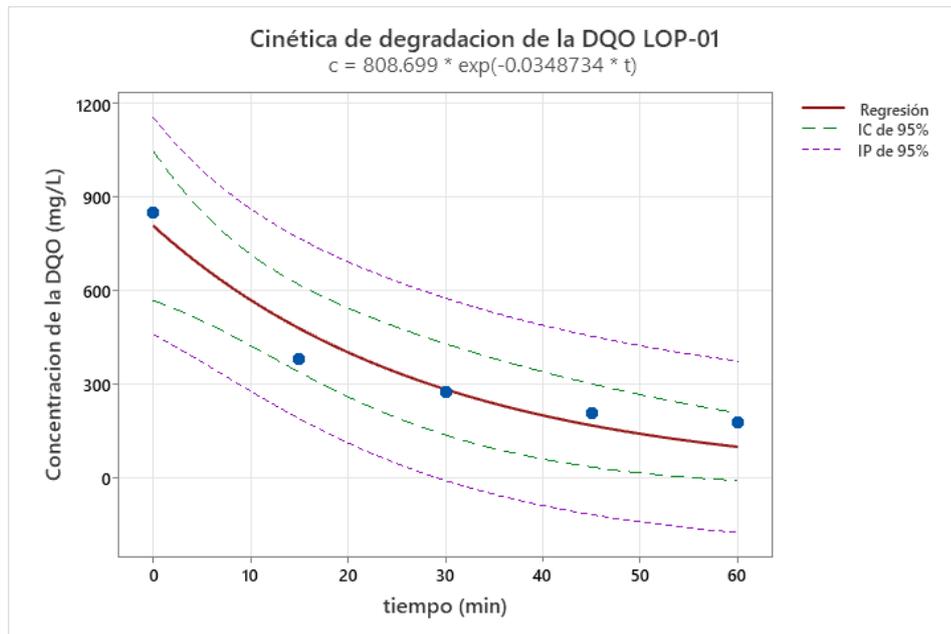
X = Tiempo (min)	0	15	30	45	60
Y = [DQO] (mg/L)	851,23	382,04	276,3	208,08	177,38

Nota: Reactivos utilizados 8 ml/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 2,4 g/L FeSO<sub>4</sub> en 1000 ml de muestra

En la figura 22 se observa el proceso de la cinética degradación de la DQO de tratamiento de las aguas residuales en el punto LOP-01. Para este modelo cinético se trabajaron con los resultados óptimos que se muestran en la tabla 20. La degradación de la DQO con respecto al tiempo se mostró un comportamiento exponencial debido a que los datos experimentales se ajustan mejor. La cinética de reacción proporcionó un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> de 0,9066, lo que indica que el modelo es confiable en cuanto a la constante de velocidad y se observó que la velocidad aparente ( $k_{app}$ ) fue de 0,0348734 min<sup>-1</sup>, lo que sugiere una mayor tasa de eliminación durante los primeros 60 minutos, seguida de una notable disminución, todo esto bajo una exposición constante se 38 W luz UV.

**Figura 22**

*Gráfico del modelo ajustado para la cinética de reacción LOP-01.*



**Tabla 21**

*Cálculos del parámetro para LOP-01*

Parámetro	Estimar	EE estimación	de IC de 95%
$C_0$	808,699	75,3161	(566,153; 1 058,87)
$k_{app}$	-0,035	0,0063	(-0,067; -0,02)

$C = C_0 \exp(-k_{app} * t)$

**Tabla 22***Predicción de resultados para LOP-02*

Tiempo (min)	Concentración de la DQO (mg/L)	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
0	851,23	0,00000	0,00000	(-0,00000; 0,00000)	(-252,779; 252,779)
15	382,04	0,00132	0,00313	(-0,00865; 0,01130)	(-252,778; 252,781)
30	276,30	0,05286	0,08986	(-0,23312; 0,33884)	(-252,727; 252,832)
45	208,08	0,57062	0,72429	(-1,73438; 2,87562)	(-252,219; 253,361)
60	177,38	1,66460	1,79050	(-4,03358; 7,36277)	(-251,179; 254,508)

(Garcia & Ayala, 2024) en su investigación utilizó las condiciones operativas óptimas de su diseño experimental tomo muestras en distintos momentos comparando de manera similar en la Tabla 23 se presentan los resultados de la concentración de la DQO para LOP-02 en tiempos específicos de (0; 15; 30;45 y 60 min) trabajados con las dosificaciones óptimas estos datos sirvieron para realizar el modelamiento cinético de la degradación de la DQO.

**Tabla 23***Registro de la concentración cinética de reacción para cada intervalo de tiempo en LOP-02.*

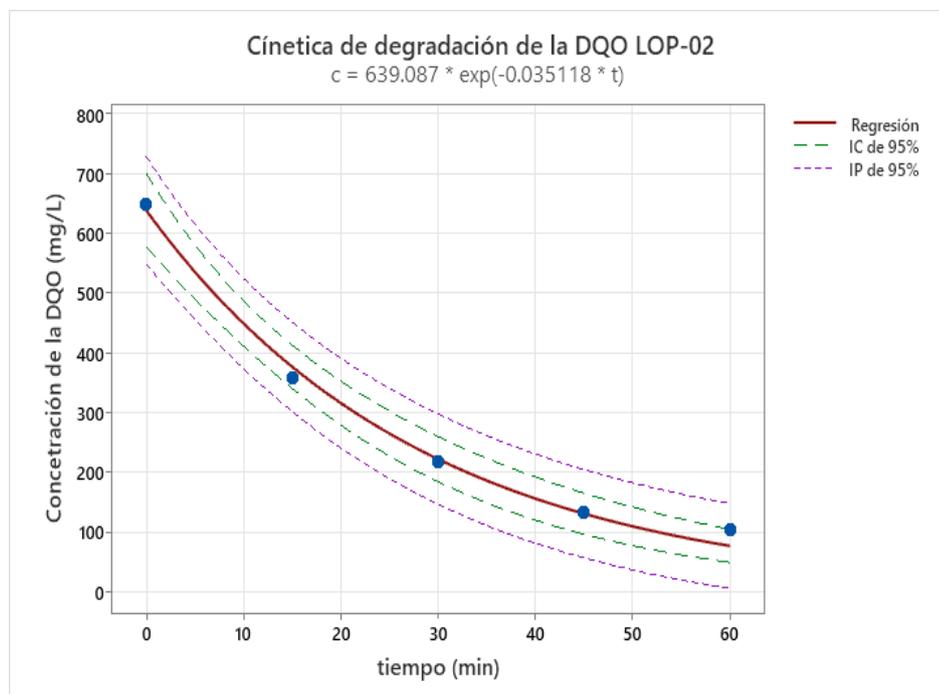
X = Tiempo (min)	0	15	30	45	60
Y = [DQO] (mg/L)	648,32	358,16	218,31	133,03	105,74

Nota: Reactivos utilizados 8 ml/L de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 2 g/L FeSO<sub>4</sub> en 1000 ml de muestra

En la figura 23 se observa el proceso de la cinética degradación de la DQO de tratamiento de las aguas residuales en el punto LOP-02. De manera similar en este modelo cinético se trabajaron con los resultados óptimos que se muestran en la tabla 23. La degradación de la DQO en función del tiempo presentó un comportamiento exponencial, ya que los datos experimentales se ajustaron de manera óptima. La cinética de reacción mostró un coeficiente de determinación  $R^2$  es de 0,9884, lo que indica la confiabilidad del modelo respecto a la constante de velocidad. Además, se registró una velocidad aparente ( $k_{app}$ ) fue de 0,035118  $\text{min}^{-1}$ , lo que sugiere una mayor tasa de eliminación durante los primeros 60 minutos, seguida de una notable disminución, todo esto bajo una exposición constante se 15W luz UV.

### Figura 23

*Gráfico del modelo ajustado para la cinética de reacción LOP-02.*





**Tabla 24**

*Cálculos del parámetro para LOP-02*

<b>Parámetro</b>	<b>Estimar</b>	<b>EE de estimación</b>	<b>de IC de 95%</b>
Theta1	639,087	19,4716	(576,904; 701,857)
Theta2	-0,035	0,0021	(-0,043; -0,029)

$C = C_0 \exp(-k_{app} * t)$

**Tabla 25**

*Predicción de Resultados para LOP-02*

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Concentración de la DQO (mg/L)</b>	<b>Ajuste</b>	<b>EE de ajuste</b>	<b>de IC de 95%</b>	<b>IP de 95%</b>
0	648,32	0,0000	0,00000	(-0,00000; 0,0000)	(-65,3080; 65,3080)
15	358,16	0,0022	0,00161	(-0,00292; 0,0073)	(-65,3058; 65,3102)
30	218,31	0,2992	0,13150	(-0,11927; 0,7177)	(-65,0101; 65,6086)
45	133,03	5,9792	1,56896	(0,98611; 10,9724)	(-59,5193; 71,4778)
60	105,74	15,5905	3,21053	(5,37321; 25,8079)	(-50,5119; 81,6929)



## V. CONCLUSIONES

- Las concentraciones óptimas del catalizador ( $\text{FeSO}_4$ ) y el agente oxidante ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) se obtuvieron a partir de la DQO para cada punto como LOP-01 y LOP-02, para ello se realizó 9 ensayos experimentales usando el diseño experimental Taguchi ( $3^2$ ) para cada punto; la degradación más eficiente en LOP-01 fue la muestra M1T3 con una concentración de 2,4 g/L de  $\text{FeSO}_4$  y 8 ml/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , siendo la menor cantidad de gasto de los reactivos en el reactor fotocatalítico circular concéntrico; y la degradación más eficiente en LOP-02 fue la muestra M2T3 con una concentración de 2,0 g/L de  $\text{FeSO}_4$  y 8 ml/L de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , de manera similar siendo la menor cantidad de gasto del agente oxidante y catalizador, y en ambos tratamientos se encuentran dentro de los LMP.
- La eficiencia de la remoción de la DQO en LOP-01 y LOP-02; para LOP-01 la DQO inicial es de 851,23 mg/L y realizando el tratamiento con el proceso fotocatalítico redujo la DQO a 194,43 mg/L con una eficiencia de 77,16%, para LOP-02 la DQO inicial es de 648,32 mg/L y realizando el tratamiento la DQO final es de 105,743 mg/L con una degradación de 83,69%, entonces llegamos a la conclusión de que el tratamiento fotocatalítico es eficiente y está dentro del LMP.
- El modelo cinético para los puntos de LOP-01 y LOP-02 fueron hallados en base a la ecuación exponencial de **Langmuir-Hinshelwood (L-H)**, para ello se calculó en base a la DQO; el modelo cinético para LOP-01 se ajusta a  $C=808,699*\exp(-0,0348734*t)$  y el  $R^2$  es igual a 0,9066 donde consideramos como aceptable; y para LOP-02 se ajusta a  $C=639,087*\exp(-0,035118*t)$  y el  $R^2$  es igual a 0,9884 de igual forma consideramos aceptable.



## VI. RECOMENDACIONES

- Promover el tratamiento fotocatalítico del proceso Foto- Fenton teniendo una rentabilidad económica en el mercado, siendo una tecnología limpia y amigable con el medio ambiente, y para mejorar la eficiencia de la degradación de DQO sin generar lodos.
- Se sugiere que en investigaciones futuras se lleve a cabo un análisis de los metales pesados en el agua residual, ya que es crucial conocer las concentraciones iniciales para poder evaluar las opciones de tratamientos adicionales.
- Analizar el impacto de las variables que se mantuvieron constantes en este estudio, como la temperatura, el caudal de agua, la intensidad de la radiación, el pH y la concentración inicial del contaminante, con el fin de desarrollar un modelo matemático integral que permita describir con precisión el comportamiento del proceso fotocatalítico.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amazonio, L. de A., Aldecy, de A., & Soares, K. (2018). *Desenvolvimento e operação de reator anaeróbico de fluxo ascendente e leito fixo no tratamento de lixiviado amazonino Lemos de Acastro, Aldecy de Almeida Santos & Keith Soares Valente. XX.*
- Arroyo, M. D. P. (2016). *Evaluación del proceso foto-fenton en la disminución de la materia orgánica en el tratamiento de lixiviado en el botadero Aguas De Las Vírgenes en el Distrito El Tambo, Provincia de Huancayo, Región Junín.* [https://repositorio.uap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12990/5708/Tesis\\_procesoFoto-fenton\\_disminuciónMateriaOrgánica\\_Lixiviado\\_botadero\\_Tambo\\_Huancayo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12990/5708/Tesis_procesoFoto-fenton_disminuciónMateriaOrgánica_Lixiviado_botadero_Tambo_Huancayo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Asenjo, N. G., Santamaría, R., Blanco, C., Granda, M., Álvarez, P., & Menéndez, R. (2013). Correct use of the Langmuir-Hinshelwood equation for proving the absence of a synergy effect in the photocatalytic degradation of phenol on a suspended mixture of titania and activated carbon. *Carbon*, 55, 62-69. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.12.010>
- Aznate, L. A., Cerro, O. J., & Orozco, A. (2013). *Degradación por fotocatálisis homogénea (foto-fenton) de efluentes líquidos contaminados con residuos de fenol. 55.*
- Barliza, V., & Torres, D. (2013). Evaluación de los procesos de oxidación avanzada: Fenton, uv/h<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Y foto-fenton para la degradación de clorpirifós en aguas residuales a nivel laboratorio en la universidad de Cartagena. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689-1699.
- Becerra, D., Arteaga, B. L., Ochoa, Y. E., Barajas-Solano, A. F., García-Martínez, J. B. ., & Ramírez, L. F. (2020). Acople de fotocatálisis heterogénea y proceso biológico aerobio de lodos activados para tratar aguas residuales con contenido de Clorpirifos. *Ingeniería Y Competitividad*, 22(1), 1-12. <https://doi.org/10.25100/iyc.v22i1.8135>
- Bermeo, M. (2016). Tratamiento de aguas residuales: técnicas convencionales. En *Bernardo-Servin-Massieu* (Número 55). [http://142.93.18.15:8080/jspui/bitstream/123456789/68/1/COMPLETO\\_libro\\_aguaUltimoPDF.pdf](http://142.93.18.15:8080/jspui/bitstream/123456789/68/1/COMPLETO_libro_aguaUltimoPDF.pdf).
- Bes, S., Silva, A. M. . T., & Bengoa, C. (2016). Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales. En *(Tritón-316Rt0506)* (Números 978-84-09-08637-5). [http://www.cyted.org/sites/default/files/manual\\_sobre\\_oxidaciones\\_avanzadas\\_0.pdf](http://www.cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf)



- Botelho, D., Cleto, E., & Rodriguez, T. (2008). Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta Treatment of industrial effluents of recalcitrant nature using ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. *Diciembre Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º*, 46, 24-38.
- Braslavsky, S. E., Braun, A. M., Cassano, A. E., Emeline, A. V., Litter, M. I., Palmisano, L., Parmon, V. N., & Serpone, N. (2011). Glossary of Terms in Photocatalysis and Radiation Catalysis. *Pure and Applied Chemistry*, 83(July), 931-1014. <https://doi.org/10.1351/gold-book>
- Bravo, W. M., & Díaz, M. L. (2022). Fotocatalizadores basados en TiO<sub>2</sub> para la degradación de compuestos orgánicos en medio acuoso. *AlfaPublicaciones*, 4(3.1), 425-460. <https://doi.org/10.33262/ap.v4i3.1.270>
- Caram, B. F. (2018). Procesos Fenton modificados para la degradación de contaminantes en aguas con valores de pH cercanos a la neutralidad. Estudios cinéticos y mecanísticos. *Journal de la société des américanistes*, 27(1), 263-263. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/69840>
- Castañeda, A. C., & Romero, J. (2014). *Procesos de Oxidación Avanzada Aplicados en el Tratamiento de Aguas de la Industria del Petróleo*. 1-47.
- Centeno, G., Labrador, H., Lara, G., & Jiménez, Y. (2021). Eficiencia en la reducción de materia orgánica petrolera combinando procesos de oxidación avanzada solar y el reactor biológico de una PTAR. *Ingeniería del agua*, 25(4), 257-270. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.14874>
- Chiva, S., Berlanga Clavijo, J. G., Martínez Cuenca, R., & Climent Agustina, J. (2017). Procesos de oxidación avanzada en el ciclo integral del agua. En *Procesos de oxidación avanzada en el ciclo integral del agua*. <https://doi.org/10.6035/uji.facs.2017.1>
- Cifuentes, J. F., & Villar, J. D. (2015). *Evaluación de la mutagenicidad generada por el uso de taninos modificados en un proceso de coagulación- floculación en aguas residuales por medio del Test de ames*. 6. <http://hdl.handle.net/10554/39031>
- Cruz González, N. de la. (2015). Estudio de la eliminación de contaminantes emergentes en aguas mediante Procesos de Oxidación Avanzados. *Repositorio institucional: diposit.ub.edu/dspace*, 324. <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/66864>
- Durán-Moreno, A., García-González, S. A., Gutiérrez-Lara, M. R., Rigas, F., & Ramírez-Zamora, R. M. (2011). Assessment of Fenton's reagent and ozonation as pre-treatments for



- increasing the biodegradability of aqueous diethanolamine solutions from an oil refinery gas sweetening process. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2-3), 1652-1659. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2010.12.043>
- Gaitan, J. F. (2019). *Potabilizacion de agua mediante filtración y desinfección química jose*. 1-23.
- Garcés, L. F., Mejía, E. A., & Santamaría, J. J. (2004). Photocatalysis as an alternative to treat waste water. *Revista Lasallista*, 1(1), 83-92.
- Garcia, G., & Ayala, C. (2024). *Fotocatálisis heterogénea mediante Nanopartículas de Tio2 para el tratamiento de aguas residuales de camal Tesis*.
- Hassan, Saima, Mojtaba Ahmadih Khanesar, Erdal Kayacan, Jafreezal Jaafar, y Abbas Khosravi. 2016. «Optimal design of adaptive type-2 neuro-fuzzy systems: A review». *Applied Soft Computing Journal* 44: 134-43. doi:10.1016/j.asoc.2016.03.023.
- Hincapié, G., Ocampo, D., Restrepo, G. M., & Marín, J. M. (2011). Fotocatálisis heterogénea y foto-fenton aplicadas al tratamiento de aguas de lavado de la producción de biodiesel. *Informacion Tecnologica*, 22(2), 33-42. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000200005>
- Huamán, M. del P., & Misme, K. C. (2014). “eficiencia en el tratamiento de aguas residuales con el sistema de lombrifiltro”. *Upn*, 0-116.
- Hube, S., & Wu, B. (2021). Mitigation of emerging pollutants and pathogens in decentralized wastewater treatment processes: A review. En *Science of the Total Environment* (Vol. 779). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146545>
- Leal, P. L. S., & Plazas, T. J. (2021). *Departamento de ingeniería civil y ambiental Facultad de Ingeniería Proyecto de Grado de Pregrado Diciembre de 2021*.
- León, J. G., Medina, C., & Segovia Obando, E. N. (2020). Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea. *Dominio de las Ciencias, ISSN-e 2477-8818, Vol. 6, N°. 3, 2020 (Ejemplar dedicado a: Julio-Septiembre 2020), págs. 785-801, 6(3), 785-801*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7539702>
- Li, Ning, Caijun Shi, Zuhua Zhang, Hao Wang, y Yiwei Liu. 2019. «A review on mixture design methods for geopolymers concrete». *Composites Part B: Engineering* 178(April): 107490. doi:10.1016/j.compositesb.2019.107490.
- López, M. A., Castellanos Onorio, O. P., Lango Reynoso, F., Castañeda Chávez, M. del R.,



- Montoya Mendoza, J., Sosa Villalobos, C. A., & Ortiz Muñiz, B. (2021). Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión. *Enfoque UTE*, 12(4), 76-87. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.769>
- Lucioni, A. C. (2011). Estudio Cinético de La Degradación Fotocatalítica Oxidativa de Rodamina B Con Zno Y Luz Solar Kinetic Study Of Photocatalytic Degradation Of Rhodamine B Oxidative And Sunlight With Zno. En *Rev Soc Quím Perú* (Vol. 77, Número 4).
- Mayorca, M. N. (2017). *Universidad Nacional Agraria de la Selva Facultad de Recursos Naturales Renovables Rscuela Profesional de Ingenieria Ambiental reducción de la carga orgánica en lixiviado estabilizado del botadero municipal de san ramón mediante oxidación avanzada Foto-Fe.*
- Mendoza, W. A. (2019). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Facultad De Ingenieria Quimica E Industrias Alimentarias Escuela Profesional De Ingenieria Quimica Trabajo De Suficiencia Profesional Para Optar El Título De Ingeniero Q. *Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.*
- Menéndez, A. (2018). Reducción de la demanda química de oxígeno en lactosuero mediante el proceso Fenton. *Universidad Nacional del Altiplano*, 95.
- MINAM. (2010). Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. *003-2010-Minam*, 415675-415676.
- MINAM. (2017). Aprueban Estandares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen disposiciones complementarias. *El Peruano*, 6-9. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Mireles, A. (2015). *Tratamiento de Agua de Luvvia para uso Domestico Incorporando el Proceso de Oxidacion Avanzada aun Tratamiento de Potabilizacion Concencional.* 6. <http://hdl.handle.net/20.500.12249/344>
- Morillo, L. D., Naranjo Tovar, D. A., Pérez, J., Villacis Oñate, W. E., Vargas Jentsch, P., & Muñoz Bisesti, F. (2019). Reduction of surfactants and coliforms in domestic wastewater by fenton processes. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 35(4), 931-943. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.12>
- Muñoz, R. C. (2019). como elaborar y asesorar una investigación de tesis. En *www.pearsoneducacion.net* (Vol. 11, Número 1). <http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008>



.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484\_SISTEM\_PEMBET  
UNGAN\_TERPUSAT\_STRATEGI\_MELESTARI

- Muñoz, Y. Y., & Palomino, S. E. (2019). Influencia de la concentración del  $\text{TiO}_2$  y tiempo de tratamiento en la degradación de las aguas residuales de camal por fotocátalisis heterogénea. *Universidad Nacional del Centro del Perú*, 1, 1-109. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5054>
- Noyola, A., Morgan, J., & Guereca, L. (2013). Contacto : [idrc@pumas.ii.unam.mx](mailto:idrc@pumas.ii.unam.mx). En *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*. <http://es.slideshare.net/EdwinMamaniVilcapaza/seleccion-de-tecnologias-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-municipales>
- Oller, A. I., Polo, L. M. I., & Malato, R. S. (2022). artículo en español *Tratamiento solar de aguas en la Plataforma Solar de Almería (CIEMAT, España) Integración de tecnologías para la regeneración de aguas residuales y producción fotocatalítica de hidrogeno*. 1(1), 121-135. <https://doi.org/10.32997/rin-2022-3731>
- Ortega, A. T., & Sánchez, N. (2021). Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(2), 121-134. <https://doi.org/10.18359/rcin.5343>
- Ramos, J., & Torre, V. D. (2022). *Degradacion de la carga organica en aguas residuales de un salón de belleza mediante el poa foto-fenton*.
- Ramos, K., & Jiménez, Y. (2016). Degradación de desechos tóxicos provenientes de laboratorios universitarios con foto-fenton solar usando diseño de experimentos. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(1), 119-131.
- Robles, F. O., Rojo, J. C. T., & Bas, M. S. (2011). *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes.: Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales*. 216. <https://books.google.com/books?id=ukWBiJ8V1yEC&pgis=1>
- Robles, W., & Cevallos, R. A. (2021). "Sistema foto-fenton y adsorción para mejorar la calidad de las aguas residuales del laboratorio de química orgánica de la Facultad de Ingeniería Química de la UNAC". *Univerdidad Nacional del Callao*, 110. [http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/4353/VIVANCO\\_MEDRANO\\_FCS\\_2DA\\_ESPEC\\_2019.pdf?sequence=4&isAllowed=y](http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/4353/VIVANCO_MEDRANO_FCS_2DA_ESPEC_2019.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- Salazar, J., & Ortega, F. (2018). *Implementación del proceso FotoFenton para degradar*



*contaminates orgánicos persistentes de efluentes residuales textiles mediante el uso de los colectores parabólicos compuestos.*

- Samet, Y., Hmani, E., & Abdelhédi, R. (2012). Fenton and solar photo-Fenton processes for the removal of chlorpyrifos insecticide in wastewater. *Water SA*, 38(4), 537-542. <https://doi.org/10.4314/wsa.v38i4.8>
- Severiche, C. A., Baldiris, I., Acosta, J. C., Bedoya, E. A., Castro, I., & Pacheco, H. (2017). *Open Access Multivariate Analysis of Water Quality in Rosario Islands National Park ( Colombia ) American Journal of Engineering Research ( AJER )*. 6, 136-144.
- Spasiano, D., Marotta, R., Malato, S., Fernandez-Ibañez, P., & Di Somma, I. (2015). Solar photocatalysis: Materials, reactors, some commercial, and pre-industrialized applications. A comprehensive approach. *Applied Catalysis B: Environmental*, 170-171, 90-123. <https://doi.org/10.1016/J.APCATB.2014.12.050>
- Tejada, Iy. (2022). Degradación de colorantes utilizando radiación solar y visible mediante fotocatalizadores de Sr 2 CeO 4 : xNi. *Instituto Politecnico Nacional Unidad Saltillo*, 71: 11-12.
- Tello, P. A. B. (2013). *Estudio de los efectos del pH extremo por adición de NaOH sobre la producción y calidad del biogás y otros parámetros de la digestión anaerobia urbana*. 2014-2015.
- Vadillo, V., Sánchez-Oneto, J., Portela, J. R., & Martínez de la Ossa, E. J. (2018). Supercritical Water Oxidation. *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology*, 333-358. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00010-3>
- Valeriano, E. (2023). Eficiencia De La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales Del Distrito De Yunguyo - Puno, 2022. *Universidad Privada San Carlos-Puno*, 75. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/4523>
- Vargas, M. G. (2022). *Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez Facultad de Ingenierías y Ciencias puras Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Proceso Foto-Fenton para disminución de demanda bioquímica de oxígeno y coliformes fecales.*
- Zorrilla, A., Valeria, Y., Asención, R., & Karen, S. (2017). *Universidad nacional del centro del Perú facultad de ingeniería química tesis Para optar el Título Profesional de Ingeniera Químico del Gas Natural y Energía presentado por los bachilleres.*

## ANEXOS

### ANEXO 1. Marco normativo

  
REPUBLICA DEL PERU

CUT: 135807

Expediente : CUT - 135807 - 2015  
Materia : Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos

**RESOLUCIÓN JEFATURAL N° 010 -2016-ANA**

Lima, 11 ENE. 2016

**VISTO:**

 El Memorando N°2484-2015-ANA-DGCRH de la Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos; y,

**CONSIDERANDO:**

Que, conforme el artículo 15° de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos, es función de la Autoridad Nacional del Agua, dictar normas y establecer procedimientos para asegurar la gestión integral y sostenible de los recursos hídricos;

Que, según el artículo 76° de la acotada Ley, la Autoridad Nacional del Agua en el lugar y el estado físico en que se encuentre el agua, sea en sus cauces naturales o artificiales, controla, supervisa y fiscaliza el cumplimiento de las normas de calidad ambiental del agua sobre la base de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y las disposiciones y programas para su implementación establecidos por la autoridad del ambiente. También establece medidas para prevenir, controlar y remediar la contaminación del agua y los bienes asociados a esta. Asimismo, implementa actividades de vigilancia y monitoreo, sobre todo en las cuencas donde existan actividades que pongan en riesgo la calidad o cantidad de recurso;

Que, el artículo 126° del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, aprobado mediante Decreto Supremo N° 001-2010-AG, establece que el monitoreo de la calidad de las aguas, en el marco del Plan Nacional de Vigilancia de la Calidad del Agua, se efectúa de acuerdo con el protocolo aprobado por la Autoridad Nacional del Agua;

Que, asimismo el artículo 6° de las Disposiciones para la Implementación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para agua, aprobado por Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM, y modificado por Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, prescribe que la autoridad competente establece el protocolo de monitoreo de la calidad ambiental del agua, en coordinación con el MINAM y la participación de los sectores respectivos;

Que, el "Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de los Cuerpos Naturales de Agua Superficial" fue aprobado mediante Resolución Jefatural N° 182-2011-ANA;

Que, con Resolución Jefatural N° 251-2015-ANA se prepublicó un proyecto de protocolo nacional de monitoreo de la calidad de los cuerpos naturales de agua superficial, para que durante el plazo de quince (15) días hábiles, se reciban los opiniones y comentarios respectivos;

Que, con documento del visto, la Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos remite el Informe Técnico N° 175-2015-ANA-DGCRH/GECRH-MEPB/KH y la nueva propuesta de Protocolo que propone estandarizar criterios y procedimientos técnicos para evaluar la calidad de los recursos hídricos, continentales y marino costeros, considerando las normas internacionales en su última actualización y estableciendo mayores precisiones para el monitoreo; propuesta que contempla los aportes, comentarios y sugerencias efectuados por las autoridades ambientales correspondientes;

Que, en tal sentido el citado informe recomienda se apruebe el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos, ello en cumplimiento a lo previsto en el artículo 6° de las Disposiciones para la Implementación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) para agua, aprobadas por el Decreto Supremo N° 023-2009-MINAM, modificado por Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM;

Que, por lo expuesto resulta necesario dictar el acto administrativo que apruebe el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos, y deje sin efecto la Resolución Jefatural N° 182-2011-ANA; y

Con el visto de la Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos, la Oficina de Asesoría Jurídica y de la Secretaría General, y en uso de las facultades conferidas en el artículo 11° del Reglamento de Organización y Funciones de la Autoridad Nacional del Agua aprobado por Decreto Supremo N° 006-2010-AG;



**SE RESUELVE:**

**Artículo 1°.- Aprobación**

Aprobar el "Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales", que forma parte integrante de la presente resolución.

**Artículo 2°.- Publicación**

Disponer la publicación de la presente resolución y del Protocolo aprobado mediante el artículo precedente en el portal institucional de la Autoridad Nacional del Agua: [www.ana.gob.pe](http://www.ana.gob.pe).

**Artículo 3°.- Derogatoria**

Dejar sin efecto la Resolución Jefatural N° 182-2011-ANA.



**JUAN CARLOS SEVILLA GILDEMEISTER**  
Jefe  
Autoridad Nacional del Agua





ANEXO II  
ETIQUETA PARA MUESTRA DE AGUA



Solicitante/cliente:		Solicitante/cliente:	
Nombre laboratorio:		Nombre laboratorio:	
Código punto de monitoreo:		Código punto de monitoreo:	
Tipo de cuerpo de agua:		Tipo de cuerpo de agua:	
Fecha de muestreo:	Hora:	Fecha de muestreo:	Hora:
Muestreado por:		Muestreado por:	
Parámetro requerido:		Parámetro requerido:	
Preservada:	SÍ NO	Tipo reactivo:	
Solicitante/cliente:		Solicitante/cliente:	
Nombre laboratorio:		Nombre laboratorio:	
Código punto de monitoreo:		Código punto de monitoreo:	
Tipo de cuerpo de agua:		Tipo de cuerpo de agua:	
Fecha de muestreo:	Hora:	Fecha de muestreo:	Hora:
Muestreado por:		Muestreado por:	
Parámetro requerido:		Parámetro requerido:	
Preservada:	SÍ NO	Tipo reactivo:	
Solicitante/cliente:		Solicitante/cliente:	
Nombre laboratorio:		Nombre laboratorio:	
Código punto de monitoreo:		Código punto de monitoreo:	
Tipo de cuerpo de agua:		Tipo de cuerpo de agua:	
Fecha de muestreo:	Hora:	Fecha de muestreo:	Hora:
Muestreado por:		Muestreado por:	
Parámetro requerido:		Parámetro requerido:	
Preservada:	SÍ NO	Tipo reactivo:	
Solicitante/cliente:		Solicitante/cliente:	
Nombre laboratorio:		Nombre laboratorio:	
Código punto de monitoreo:		Código punto de monitoreo:	
Tipo de cuerpo de agua:		Tipo de cuerpo de agua:	
Fecha de muestreo:	Hora:	Fecha de muestreo:	Hora:
Muestreado por:		Muestreado por:	
Parámetro requerido:		Parámetro requerido:	
Preservada:	SÍ NO	Tipo reactivo:	
Solicitante/cliente:		Solicitante/cliente:	
Nombre laboratorio:		Nombre laboratorio:	
Código punto de monitoreo:		Código punto de monitoreo:	
Tipo de cuerpo de agua:		Tipo de cuerpo de agua:	
Fecha de muestreo:	Hora:	Fecha de muestreo:	Hora:
Muestreado por:		Muestreado por:	
Parámetro requerido:		Parámetro requerido:	
Preservada:	SÍ NO	Tipo reactivo:	
Solicitante/cliente:		Solicitante/cliente:	
Nombre laboratorio:		Nombre laboratorio:	
Código punto de monitoreo:		Código punto de monitoreo:	
Tipo de cuerpo de agua:		Tipo de cuerpo de agua:	
Fecha de muestreo:	Hora:	Fecha de muestreo:	Hora:
Muestreado por:		Muestreado por:	
Parámetro requerido:		Parámetro requerido:	
Preservada:	SÍ NO	Tipo reactivo:	





ANEXO VII

CONSERVACIÓN Y PRESERVACIÓN DE MUESTRA DE AGUA EN FUNCIÓN  
DEL PARÁMETRO EVALUADO



PARÁMETRO	TIPO DE RECIPIENTE	CONDICIONES DE PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO	TIEMPO MÁXIMO DE ALMACENAMIENTO
<b>Químico-Físicos</b>			
Oxígeno disuelto	Plástico o vidrio	Analizar preferentemente <i>in situ</i> .	Inmediatamente
	Botellas de vidrio Winkler	Fijar el oxígeno. Almacenar muestras a oscuras o usar botellas oscuras.	4 días
pH	Plástico o vidrio	Analizar preferentemente <i>in situ</i> .	24 horas
Temperatura	Plástico o vidrio	Analizar preferentemente <i>in situ</i> .	Inmediatamente
Conductividad eléctrica	Plástico o vidrio	Analizar preferentemente <i>in situ</i> .	24 horas
Turbiedad	Plástico o vidrio	Analizar preferentemente <i>in situ</i> . Almacenar muestras a oscuras o usar botellas oscuras.	24 horas
Bicarbonatos	Plástico o vidrio		14 días
Carbonatos	Plástico o vidrio		14 días
Cianuro libre	Plástico o vidrio	Agregar NaOH a pH>12. Almacenar a oscuras o usar botellas oscuras.	7 días (24 horas si está presente sulfuro)
Cianuro WAD			
Cianuro total	Plástico o vidrio	Agregar NaOH a pH>12. Almacenar a oscuras o usar botellas oscuras.	14 días (24 horas si está presente sulfuro)
Cloruros	Plástico o vidrio		1 mes
Color	Plástico o vidrio	Almacenar a oscuras o usar botellas oscuras.	5 días
Demanda bioquímica de oxígeno en cinco días	Plástico o vidrio	Llenar recipiente y sellar sin burbujas. Almacenar a oscuras o usar botellas oscuras.	24 horas
	Plástico	Congelar por debajo de -18° C. Almacenar a oscuras o usar botellas oscuras.	1 mes (6 meses si >50 mg/L)
Demanda química de oxígeno	Plástico o vidrio	Acidificar a pH 1 - 2 con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	6 meses
	Plástico	Congelar por debajo de -18°C.	6 meses
Dureza	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> .	1 mes
Fluoruros	Plástico, pero sin PTFE		1 mes
Olor	Vidrio	Se puede realizar un análisis cualitativo <i>in situ</i> .	6 horas
Silicatos	Plástico		1 mes
Sólidos disueltos totales	Plástico o vidrio		7 días
Sólidos suspendidos totales	Plástico o vidrio		2 días
Sulfatos	Plástico o vidrio		1 mes
Sulfuros	Plástico	Fijar el sulfuro al agregar 2 ml de solución de acetato de zinc. Si el pH no está entre 8,5 y 9,0, agregar NaOH. Si se sospecha que el agua ha sido clorada, por cada 1000 ml de muestra agrega 80 mg de Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O al recipiente tras la recolección de la muestra (o tras el muestreo).	7 días
Sulfuro de hidrógeno			





ANEXO VII

CONSERVACIÓN Y PRESERVACIÓN DE MUESTRA DE AGUA EN FUNCIÓN  
DEL PARÁMETRO EVALUADO



PARÁMETRO	TIPO DE RECIPIENTE	CONDICIONES DE PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO	TIEMPO MÁXIMO DE ALMACENAMIENTO
<b>Nutrientes</b>			
Fosfatos	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Filtrar <i>in situ</i> . Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
		Congelar por debajo de -18° C.	1 mes
Fósforo total	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> o HNO <sub>3</sub>	1 mes
		Congelar por debajo de -18° C.	6 meses
Nitrógeno amoniacal	Plástico o vidrio	Filtrar <i>in situ</i> .	24 horas
	PE	Filtrar <i>in situ</i> . Acidificar a pH 3±0,5 con HNO <sub>3</sub>	14 días
	Vidrio o PTFE	Filtrar <i>in situ</i> . Acidificar a pH 1 - 2 con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . Almacenar muestras a oscuras o usar botellas oscuras.	14 días
	Plástico	Congelar por debajo de -18°C.	1 mes
Nitratos	Plástico o vidrio	Filtrar <i>in situ</i> .	4 días
Nitritos	Plástico o vidrio	Filtrar <i>in situ</i> .	4 días
Nitrógeno total	Plástico o vidrio	Filtrar <i>in situ</i> .	4 días
	Plástico	Acidificar a pH 1 - 2 con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	1 mes
<b>Metales y metaloides</b>			
Corrida de metales totales	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
Corrida de metales disueltos	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Filtrar <i>in situ</i> . Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
Aluminio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
Antimonio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> . Se debería usar HCl si se usa la técnica de hidruros para análisis.	1 mes
Arsénico	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> . Se debería usar HCl si se usa la técnica de hidruros para análisis.	6 meses
Bario	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
Berilio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
Boro	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	6 meses
Cadmio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	6 meses
Calcio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> .	1 mes
Cobalto	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> .	1 mes
Cobre	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	6 meses
Cromo	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	6 meses
Cromo hexavalente	Plástico o vidrio		24 horas
Hierro	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> .	1 mes



ANEXO VII

CONSERVACIÓN Y PRESERVACIÓN DE MUESTRA DE AGUA EN FUNCIÓN  
DEL PARÁMETRO EVALUADO

PARÁMETRO	TIPO DE RECIENTE	CONDICIONES DE PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO	TIEMPO MÁXIMO DE ALMACENAMIENTO
Litio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> .	1 mes
Magnesio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> .	1 mes
Manganeso	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl o HNO <sub>3</sub> .	1 mes
Mercurio	Plástico o vidrio	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	6 meses
Niquel	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	6 meses
Plata	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub> .	1 mes
Plomo	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	6 meses
Selenio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub> . Se debería usar HCl si se usa la técnica hidrica para análisis.	1 mes
Sodio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
Uranio	Plástico o vidrio	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
Vanadio	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	1 mes
Zinc	PE-HD o PTFE / PFA o FEP	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub>	6 meses
<b>Orgánicos</b>			
Aceites y grasas	Vidrio, boca ancha	Acidificar a pH 1 - 2 con HCl, HNO <sub>3</sub> o H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 mes
Hidrocarburos totales de petróleo, HTTP	Vidrio, boca ancha		4 días
		Acidificar a pH 1 - 2 con HCl, HNO <sub>3</sub> o H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 mes
Detergentes	Vidrio		2 días
		Agregar solución de formaldehído.	4 días
		Congelar por debajo de -18° C.	1 mes
<b>Compuestos orgánicos volátiles</b>			
1,1,1-Tricloroetano	Vidrio o viales (espacio de cabeza) con tapa con septa de PTFE	Acidificar a pH 1 - 2 con HNO <sub>3</sub> o H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2 días (24 horas sin preservación)
1,1-Dicloroetano			
1,2-Dicloroetano			
1,2-Diclorobenceno			
Tetracloroetano			
Tetracloruro de Carbono			
Trihalometanos totales			
Tricloroetano			
Hexaclorobutadieno	Vidrio oscuro	Ajustar pH a 5,0 - 7,5	7 días (24 horas, si el pH está fuera del rango de 5,0-7,5)





ANEXO VII  
CONSERVACIÓN Y PRESERVACIÓN DE MUESTRA DE AGUA EN FUNCIÓN  
DEL PARÁMETRO EVALUADO



PARÁMETRO	TIPO DE RECIPIENTE	CONDICIONES DE PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO	TIEMPO MÁXIMO DE ALMACENAMIENTO
<b>Hidrocarburos aromáticos</b>			
Hidrocarburos de petróleo aromáticos totales	Vidrio	Si se sospecha que el agua ha sido clorada, por cada 1000 ml de muestra agrega 80 mg de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ al recipiente tras la recolección de la muestra.	7 días
Benzo(a)pireno			
Fenoles	Vidrio oscuro	Acidificar a $\text{pH} < 2$ con $\text{H}_3\text{PO}_4$ o $\text{H}_2\text{SO}_4$	7 días
Benceno	Vidrio o viales (espacio de cabeza) con tapa con septa de PTFE	Acidificar a $\text{pH} 1 - 2$ con $\text{HNO}_3$ o $\text{H}_2\text{SO}_4$	2 días (24 horas sin preservación)
Etilbenceno			
Tolueno			
Xilenos			
Pentaclorofenol (PCP)	Vidrio	Si se sospecha que el agua ha sido clorada, por cada 1000 ml de muestra agrega 80 mg de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ al recipiente tras la recolección de la muestra.	2 días
Bifenilos policlorados (PCBs)	Vidrio	Ajustar $\text{pH}$ a 5,0 - 7,5. Si se sospecha que el agua ha sido clorada, por cada 1000 ml de muestra agrega 80 mg de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ al recipiente tras la recolección de la muestra.	7 días (24 horas, si el $\text{pH}$ está fuera del rango de 5,0-7,5)
Triclorobencenos (Totales)	Vidrio oscuro	Ajustar $\text{pH}$ a 5,0 - 7,5	7 días (24 horas, si el $\text{pH}$ está fuera del rango de 5,0-7,5)
<b>Pesticidas</b>			
Aldicarb	Vidrio	Si se sospecha que el agua ha sido clorada, por cada 1000 ml de muestra agrega 80 mg de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ al recipiente tras la recolección de la muestra.	14 días
	Plástico	Congelar por debajo de $-18^\circ \text{C}$	1 mes
Malatión	Vidrio oscuro		7 días
Metamidofós			
Paratión			
Endosulfán	Vidrio oscuro	Acidificar a $\text{pH} < 2$	7 días (24 horas, si $\text{pH} > 2$ )
Aldrin	Vidrio oscuro	Ajustar $\text{pH}$ a 5,0 - 7,5	7 días (24 horas, si el $\text{pH}$ está fuera del rango de 5,0-7,5)
Clordano			
DDT			
Diieldrin			
Endrin			
Heptacloro			
Heptacloro epóxido			
Lindano			
Paraquat			



ANEXO VII

CONSERVACIÓN Y PRESERVACIÓN DE MUESTRA DE AGUA EN FUNCIÓN  
DEL PARÁMETRO EVALUADO

PARÁMETRO	TIPO DE RECIPIENTE	CONDICIONES DE PRESERVACIÓN Y ALMACENAMIENTO	TIEMPO MÁXIMO DE ALMACENAMIENTO
<b>Microbiológicos</b>			
Coliformes Termotolerantes	Vidrio estéril	Dejar un espacio para aireación y mezcla de 1/3 del frasco de muestreo. Almacenar a $\leq 6^{\circ}\text{C}$ y en oscuridad.	24 horas
Coliformes Totales			
Enterococos fecales			
Escherichia Coli			
Giardia Duodenalis			
Salmonella sp.			
Vibrio Cholerae			
Formas parasitarias	Plástico, con boca ancha.	Almacenar a $\leq 6^{\circ}\text{C}$ y en oscuridad.	24 horas
Huevos de Helmintos			
<b>Otros Parámetros</b>			
Clorofila A	Plástico o vidrio	Filtrar preferentemente <i>in situ</i> . Almacenar muestras a oscuras o usar botellas oscuras.	24 horas
		Tras el filtrado y la extracción con etanol caliente, congelar por debajo de $-18^{\circ}\text{C}$ .	1 mes
		Tras el filtrado, congelar por debajo de $-18^{\circ}\text{C}$ .	14 días
		Tras el filtrado, congelar por debajo de $-80^{\circ}\text{C}$ .	1 mes

Fuente: Parámetros químico-físicos: ISO (2012) "Water Quality Sampling. Part 3: Preservation and handling of water samples. International Standard ISO 5667-3", Organización Internacional de Normalización, Ginebra, Suiza. Y Parámetros microbiológicos: Standard Methods for the examination of Water and Wastewater 22<sup>nd</sup> edition, 2012, Washington DC.

Dónde: (FEP) perfluoro (etileno)propileno, (PE) polietileno, (PE-HD) polietileno de alta densidad, (PET) polietileno tereftalato, (PFA) perfluoroalcoxi-polímero, (Plástico) el tipo específico de plástico no es relevante, (PP) polipropileno, (PTFE) politetrafluoroetileno, (PVC) policloruro de vinilo, (Vidrio) vidrio al borosilicato con tapa de rosca, revestida con PTFE y (PE-HD o PTFE / PFA o FEP) para concentraciones normales: PE-HD o PTFE / para concentraciones bajas: PFA o FEP

Notas:

\*Filtrar *in situ* indica que la muestra de agua debe ser filtrada en campo usando un tamaño de poro de filtro de 0,40  $\mu\text{m}$  a 0,45  $\mu\text{m}$ .

Si no se especifican las condiciones de preservación, no se requieren medidas específicas.

En todo caso, las muestras deben ser transportadas bajo un adecuado sistema de enfriamiento ( $5\pm 3^{\circ}\text{C}$ ) utilizando coolers con ice pack o hielo, o un refrigerador móvil.



de impuestos o de derechos aduaneros de ninguna clase o denominación.

**Artículo 5°.-** La presente Resolución Suprema será refrendada por el Presidente del Consejo de Ministros.

Regístrese, comuníquese y publíquese.

ALAN GARCÍA PÉREZ  
Presidente Constitucional de la República

JAVIER VELASQUEZ QUESQUÉN  
Presidente del Consejo de Ministros

469446-6

## AMBIENTE

Aprueba Límites Máximos Permisibles  
para los efluentes de Plantas de  
Tratamiento de Aguas Residuales  
Domésticas o Municipales

### DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

CONSIDERANDO:

Que, el artículo 3° de la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, dispone que el Estado, a través de sus entidades y órganos correspondientes, diseña y aplica, las políticas, normas, instrumentos, incentivos y sanciones que sean necesarias para garantizar el efectivo ejercicio de los derechos y el cumplimiento de las obligaciones y responsabilidades contenidas en dicha ley;

Que, el numeral 32.1 del artículo 32° de la Ley General del Ambiente define al Límite Máximo Permissible - LMP, como la medida de concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su determinación corresponde al Ministerio del Ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el Sistema Nacional de Gestión Ambiental. Los criterios para la determinación de la supervisión y sanción serán establecidos por dicho Ministerio;

Que, el numeral 33.4 del artículo 33° de la Ley N° 28611 en mención dispone que, en el proceso de revisión de los parámetros de contaminación ambiental, con la finalidad de determinar nuevos niveles de calidad, se aplique el principio de la gradualidad, permitiendo ajustes progresivos a dichos niveles para las actividades en curso;

Que, el literal d) del artículo 7° del Decreto Legislativo N° 1013, Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente - MINAM, establece como función específica de dicho Ministerio, elaborar los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP), de acuerdo con los planes respectivos. Deben contar con la opinión del sector correspondiente, debiendo ser aprobados mediante Decreto Supremo;

Que, mediante Resolución Ministerial N° 121-2009-MINAM, se aprobó el Plan de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP) para el año fiscal 2009 que contiene dentro de su anexo la elaboración del Límite Máximo Permissible para los efluentes de Plantas de Tratamiento de fuentes domésticas;

Que el artículo 14° del Reglamento de la Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) aprobado mediante Decreto Supremo N° 019-2009-MINAM, establece que el proceso de evaluación de impacto ambiental comprende medidas que aseguren, entre otros, el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental, los Límites Máximos Permisibles y otros parámetros y requerimientos aprobados de acuerdo a la legislación ambiental vigente; del mismo modo, en su artículo 28° el citado reglamento señala que, la modificación del estudio ambiental o la aprobación de instrumentos de gestión ambiental complementarios,

implica necesariamente y según corresponda, la actualización de los planes originalmente aprobados al emitirse la Certificación Ambiental;

De conformidad con lo dispuesto en el numeral 8) del artículo 118° de la Constitución Política del Perú, y el numeral 3 del artículo 11° de la Ley N° 29158, Ley Orgánica del Poder Ejecutivo;

DECRETA:

**Artículo 1°.- Aprobación de Límites Máximos Permisibles (LMP) para efluentes de Plantas de Tratamiento de Agua Residuales Domésticas o Municipales (PTAR)**

Aprobar los Límites Máximos Permisibles para efluentes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales, los que en Anexo forman parte integrante del presente Decreto Supremo y que son aplicables en el ámbito nacional.

**Artículo 2°.- Definiciones**

Para la aplicación del presente Decreto Supremo se utilizarán los siguientes términos:

- **Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR):** Infraestructura y procesos que permiten la depuración de las aguas residuales Domésticas o Municipales.

- **Límite Máximo Permissible (LMP):** Es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el MINAM y los organismos que conforman el Sistema de Gestión Ambiental.

- **Protocolo de Monitoreo:** Procedimientos y metodologías establecidas por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento en coordinación con el MINAM y que deben cumplirse en la ejecución de los Programas de Monitoreo.

**Artículo 3°.- Cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles de Efluentes de PTAR**

3.1 Los LMP de efluentes de PTAR que se establecen en la presente norma entran en vigencia y son de cumplimiento obligatorio a partir del día siguiente de su publicación en el Diario Oficial El Peruano.

3.2 Los LMP aprobados mediante el presente Decreto Supremo, no serán de aplicación a las PTAR con tratamiento preliminar avanzado o tratamiento primario que cuenten con disposición final mediante emisario submarino.

3.3. Los titulares de las PTAR que se encuentren en operación a la dación del presente Decreto Supremo y que no cuenten con certificación ambiental, tendrán un plazo no mayor de dos (02) años, contados a partir de la publicación del presente Decreto Supremo, para presentar ante el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento su Programa de Adecuación y Manejo Ambiental; autoridad que definirá el respectivo plazo de adecuación.

3.4 Los titulares de las PTAR que se encuentren en operación a la dación del presente Decreto Supremo y que cuenten con certificación ambiental, tendrán un plazo no mayor de tres (03) años, contados a partir de la publicación del presente Decreto Supremo, para presentar ante el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, la actualización de los Planes de Manejo Ambiental de los Estudios Ambientales; autoridad que definirá el respectivo plazo de adecuación.

**Artículo 4°.- Programa de Monitoreo**

4.1 Los titulares de las PTAR están obligados a realizar el monitoreo de sus efluentes, de conformidad con el Programa de Monitoreo aprobado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. El Programa de Monitoreo especificará la ubicación de los puntos de control, métodos y técnicas adecuadas; así como los parámetros y frecuencia de muestreo para cada uno de ellos.

4.2 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento podrá disponer el monitoreo de otros parámetros que no estén regulados en el presente Decreto Supremo, cuando existan indicios razonables de riesgo a la salud humana o al ambiente.

4.3 Sólo será considerado válido el monitoreo conforme al Protocolo de Monitoreo establecido por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, realizado por Laboratorios acreditados ante el Instituto Nacional de Defensa del Consumidor y de la Propiedad Intelectual - INDECOPI.

#### Artículo 5º.- Resultados de monitoreo

5.1 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento es responsable de la administración de la base de datos del monitoreo de los efluentes de las PTAR, por lo que los titulares de las actividades están obligados a reportar periódicamente los resultados del monitoreo de los parámetros regulados en el Anexo de la presente norma, de conformidad con los procedimientos establecidos en el Protocolo de Monitoreo aprobado por dicho Sector.

5.2 El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento deberá elaborar y remitir al Ministerio del Ambiente dentro de los primeros noventa (90) días de cada año, un informe estadístico a partir de los datos de monitoreo presentados por los Titulares de las PTAR, durante el año anterior, lo cual será de acceso público a través del portal institucional de ambas entidades.

#### Artículo 6º.- Fiscalización y Sanción

La fiscalización del cumplimiento de los LMP y otras disposiciones aprobadas en el presente Decreto Supremo estará a cargo de la autoridad competente de fiscalización, según corresponda.

#### Artículo 7º.- Refrendo

El presente Decreto Supremo será refrendado por el Ministro del Ambiente y por el Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

#### DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA FINAL

**Única.-** El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, en coordinación con el MINAM, aprobará el Protocolo de Monitoreo de Efluentes de PTAR en un plazo no mayor a doce (12) meses contados a partir de la vigencia del presente dispositivo.

Dado en la Casa de Gobierno, en Lima, a los dieciséis días del mes de marzo del año dos mil diez.

ALAN GARCÍA PÉREZ  
Presidente Constitucional de la República

ANTONIO JOSÉ BRACK EGG  
Ministro del Ambiente

JUAN SARMIENTO SOTO  
Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento

#### ANEXO

#### LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LOS EFLUENTES DE PTAR

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35

469446-2

Designan responsable de brindar información pública y del contenido del portal de internet institucional del Ministerio

#### RESOLUCIÓN MINISTERIAL N° 036-2010-MINAM

Lima, 16 de marzo de 2010

#### CONSIDERANDO:

Que, mediante Decreto Legislativo N° 1013, se aprobó la Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente;

Que, la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, cuyo Texto Único Ordenado fue aprobado por Decreto Supremo N° 043-2003-PCM, tiene por finalidad promover la transparencia de los actos del Estado y regular el derecho fundamental del acceso a la información consagrado en el numeral 5 del artículo 2° de la Constitución Política del Perú;

Que, el artículo 3° de la citada Ley, señala que el Estado tiene la obligación de entregar la información que demanden las personas en aplicación del principio de publicidad, para cuyo efecto se designa al funcionario responsable de entregar la información solicitada;

Que, asimismo, de acuerdo a lo previsto en el artículo 5° de la mencionada Ley, las Entidades Públicas deben identificar al funcionario responsable de la elaboración de los Portales de Internet;

Que, mediante Resolución Ministerial N° 070-2008-MINAM, se designó a la señorita Cristina Miranda Beas, como funcionaria responsable de brindar información que demanden las personas, y responsable del contenido de la información ofrecida en el Portal de Internet del Ministerio del Ambiente;

Que, por razones del servicio y considerando la renuncia al cargo que desempeñaba en el Ministerio del Ambiente la servidora citada en el considerando precedente, resulta necesario designar al personal responsable de brindar información en el marco de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública y responsable del Portal de Internet Institucional;

Con el visado de la Secretaría General y de la Oficina de Asesoría Jurídica; y

De conformidad con lo establecido en el Decreto Legislativo N° 1013, Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente; el Texto Único Ordenado de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, aprobado por Decreto Supremo N° 043-2003-PCM; y el Decreto Supremo N° 007-2008-MINAM que aprueba el Reglamento de Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente;

#### SE RESUELVE:

**Artículo 1º.-** Designar al abogado Hugo Milko Ortega Polar como Responsable de brindar la información pública del Ministerio del Ambiente y Responsable del contenido de la información ofrecida en el Portal de Internet Institucional, de conformidad con el Texto Único Ordenado de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública, aprobado por Decreto Supremo N° 043-2003-PCM.

**Artículo 2º.-** Todos los órganos del Ministerio del Ambiente, bajo responsabilidad, deberán facilitar la información y/o documentación que les sea solicitada como consecuencia de lo dispuesto en el artículo precedente, dentro de los plazos establecidos en la normatividad vigente.

**Artículo 3º.-** Disponer que la presente Resolución se publique en el Diario Oficial El Peruano y en Portal de Internet del Ministerio del Ambiente.

**Artículo 4º.-** Notificar la presente Resolución a todos los órganos del Ministerio del Ambiente, al Órgano de Control Institucional y al responsable designado.

Regístrese, comuníquese y publíquese.

ANTONIO JOSÉ BRACK EGG  
Ministro del Ambiente

469445-1



## ANEXO 2. Informe de ensayos de los laboratorios



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA**  
**LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD**



N.º 003098

## Certificado de Análisis

**ASUNTO** : ANALISIS DE AGUAS RESIDUALES MUESTRA LOP 1

**PROCEDENCIA** : LAGUNA DE OXIDACIÓN DE LA CIUDAD DE PUNO

**INTERESADOS** : ABRAHAM JIMÉNEZ PAYE, DORIS SONIA AÑACATA PACCARA

**PROYECTO** : TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL MEDIANTE FOTOCATÁLISIS EN LAGUNA DE OXIDACIÓN DE LA CIUDAD DE PUNO - 2024

**MOTIVO** : CONCENTRACIÓN: DBOs, DQO, TURBIEDAD, NITRÓGENO TOTAL, FOSFORO TOTAL.

**ANÁLISIS** : TODO LO MENCIONADO

**MUESTREO** : 29/07/2024, por el interesado

**FECH. DE RECEP.** : 29/07/2024

**ANÁLISIS** : 29/07/2024

**COD. MUESTRA** : 80009-000626

---

**CARACTERÍSTICAS ORGANOLEPTICAS**

**ASPECTO** : Líquido

**COLOR** : Característico al agua residual

**CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS**

PARAMETROS FÍSICO QUÍMICOS	UNIDAD	INICIO PTAR RESULTADOS	METODO ANALITICO
Potencial de Hidrogeno	pH	8.92	Electrométrica
Conductividad Eléctrica	uS/Cm	236	Electrométrica
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	119	Electrométrico
Fosforo	mg/L	0.138	Colorímetro
Nitrógeno total	mg/L	0.00003	Método de Kjendal
Temperatura	°C	12.2°C	Termómetro
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L	340.49	Digestión cerrada
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	851.23	Digestión cerrada
Turbiedad	NTU	3710	Electrométrica

Puno, C.U. 30 de setiembre del 2024.

VºBº



ING. LUZ MARINA TEVES PONCE  
ANALISIS LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD  
F.I.Q. - U.N.A. - C.P. - 18200



Laboratorio Doña Inés Flores  
CICANO DE LA F.I.Q.  
UNA - PUNO

---

Ciudad Universitaria Av. Floral Nº 1153, Facultad de Ingeniería Química – Cel.: 951755420



N.º 003099

## Certificado de Análisis

**ASUNTO** : ANALISIS DE AGUAS RESIDUALES MUESTRA LOP 2  
**PROCEDENCIA** : LAGUNA DE OXIDACIÓN DE LA CIUDAD DE PUNO  
**INTERESADOS** : ABRAHAM JIMÉNEZ PAYE, DORIS SONIA AÑACATA PACCARA  
**PROYECTO** : TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MEDIANTE FOTO CATALISIS  
 EN LAGUNA DE OXIDACIÓN DE LA CIUDAD DE PUNO - 2024  
**MOTIVO** : CONCENTRACIÓN: DBOs, DQO, TURBIEDAD, NITROGÉNOTOTAL  
 FOSFORO TOTAL.  
**ANÁLISIS** : TODO LO MENCIONADO  
**MUESTREO** : 29/07/2024, por el interesado  
**FECH. DE RECEP.** : 29/07/2024  
**ANÁLISIS** : 29/07/2024  
**COD. MUESTRA** : B0009-000626

### CARACTERÍSTICAS ORGANOLEPTICAS

**ASPECTO** : Líquido  
**COLOR** : Característico al agua residual

### CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS

PARAMETROS FÍSICO QUÍMICOS	UNIDAD	INICIO PTAR RESULTADOS	METODO ANALITICO
Potencial de Hidrogeno	pH	7.09	Electrométrica
Conductividad Eléctrica	uS/Cm	229	Electrométrica
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	112	Electrométrico
Fosforo	mg/L	0.138	Colorímetro
Temperatura	°C	12.42	Termómetro
Nitrógeno total	mg/L	0.0002	Metodo de Kjendal
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L	259.328	Digestión cerrada
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	648.32	Digestión cerrada
Turbiedad	NTU	93	Electrométrico

Puno, C.U. 30 de setiembre del 2024

Vºgº  
  
 ING. LUZ MARINA TEVES PONCE  
 ANALISTA LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD  
 F.I.Q. - UNA - CP - 112193

DR. Teodoro Domínguez Flores  
 DECANO DE LA F.I.Q.  
 UNA - PUNO



MEGALABORATORIOS QUÍMICOS DE LOS ANDES S.A.C  
**LABORATORIO DE ANALISIS**  
**AGUAS - SUELOS - MINERALES Y OTROS**

**INFORME DE ENSAYO 0740/MGA**  
**RESULTADO DE ANÁLISIS**

ASUNTO: CADENA DE CUSTODIA TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL MEDIANTE  
FOTOCATALISIS EN LAGUNA DE OXIDACION DE LA CIUDAD DE PUNO - 2024.

PROCEDENCIA : LAGUNA DE OXIDACION O ESPINAR - CHANU CHANU - PUNO - PUNO.  
INTERESADO : ABRAHAM JIMENEZ PAYE / DORIS SONIA AÑACATA PACCARA.  
MOTIVO : ANALISIS FÍSICO - QUÍMICO  
FECHA DE MUESTREO : 29/07/2024 (por el interesado)  
FECHA DE ANALISIS : 01/08/2024.

N° DE MUESTRA	UNIDAD	DQO	DBO	METODO ANALITICO
LOP - 01 M1T1	mg/L	255.829	102.3316	Digestión Cerrada
LOP - 01 M1T2	mg/L	279.707	111.8828	Digestión Cerrada
LOP - 01 M1T3	mg/L	194.430	77.772	Digestión Cerrada
LOP - 01 M1T4	mg/L	208.071	83.2284	Digestión Cerrada
LOP - 01 M1T5	mg/L	225.13	90.052	Digestión Cerrada
LOP - 01 M1T6	mg/L	146.675	58.67	Digestión Cerrada
LOP - 01 M1T7	mg/L	272.885	109.154	Digestión Cerrada
LOP - 01 M1T8	mg/L	231.952	92.7808	Digestión Cerrada
LOP - 01 M1T9	mg/L	143.264	57.3056	Digestión Cerrada
LOP - 01 M1T10	mg/L	184.608	73.8432	Digestión Cerrada
LOP - 01 M1T11	mg/L	150.086	60.0344	Digestión Cerrada
LOP - 01 M1T12	mg/L	139.853	55.9412	Digestión Cerrada
LOP - 01 M1T12R	mg/L	143.264	57.3056	Digestión Cerrada

**INTERPRETACION:**

El agua analizada es en iones líquido por lo tanto los resultados serán interpretados en el área correspondiente.

Boris Fernandez Callozapaza  
RUC: 20812800741  
GERENTE

M.sc. Juan Carlos Lima Caceres  
GAP: 200778  
SPECIALISTA EN SUELOS

Jr. Esmeralda N°193 URB - Villa Florida - a una cuadra del local Pérgola - Puno  
Cel. 973296546 - 918184722



MEGALABORATORIOS QUÍMICOS DE LOS ANDES S.A.C  
**LABORATORIO DE ANALISIS**  
**AGUAS - SUELOS - MINERALES Y OTROS**

**INFORME DE ENSAYO 0739/MGA**  
**RESULTADO DE ANÁLISIS**

**ASUNTO: CADENA DE CUSTODIA TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL MEDIANTE FOTOCATALISIS EN LAGUNA DE OXIDACION DE LA CIUDAD DE PUNO - 2024.**

**PROCEDENCIA** : LAGUNA DE OXIDACION O ESPINAR - CHANU CHANU - PUNO - PUNO.  
**INTERESADO** : ABRAHAM JIMENEZ PAYE / DORIS SONIA AÑACATA PACCARA.  
**MOTIVO** : ANALISIS FÍSICO - QUÍMICO  
**FECHA DE MUESTREO** : 29/07/2024 (por el interesado)  
**FECHA DE ANALISIS** : 01/08/2024.

**COORDENADAS DE MUESTREO:** N: 69°59'54" S: 15°51'10"

N° DE MUESTRA	UNIDAD	DQO	DBO	METODO ANALITICO
LOP - 02 M2T1	mg/L	231.953	92.7812	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T2	mg/L	242.186	96.8744	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T3	mg/L	105.743	42.2972	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T4	mg/L	259.241	103.6964	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T5	mg/L	221.719	88.6876	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T6	mg/L	119.387	47.7548	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T7	mg/L	289.941	115.9764	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T8	mg/L	225.130	90.052	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T9	mg/L	98.920	39.568	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T10	mg/L	102.331	40.9324	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T11	mg/L	115.976	46.3904	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T12	mg/L	95.509	38.2036	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T12R	mg/L	98.92	39.568	Digestión Cerrada

**INTERPRETACION:**

El agua analizada es en iones líquido por lo tanto los resultados serán interpretados en el área correspondiente.

Ricardo Fernandez Calbavera  
RUC: 20012800741  
EFRENTE

Juan Carlos Luna Quevedo  
CIP: 200778  
SPECIALISTA EN SUELOS

Jr. Esmeralda N°193 URB - Villa Florida - a una cuadra del local Pérgola - Puno  
Cel. 973296546 - 918184722



MEGALABORATORIOS QUÍMICOS DE LOS ANDES S.A.C  
**LABORATORIO DE ANALISIS**  
**AGUAS - SUELOS - MINERALES Y OTROS**

**INFORME DE ENSAYO** 0739/MGA  
**RESULTADO DE ANÁLISIS**

ASUNTO: CADENA DE CUSTODIA TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL MEDIANTE FOTOCATALISIS EN LAGUNA DE OXIDACION DE LA CIUDAD DE PUNO - 2024.

PROCEDENCIA : LAGUNA DE OXIDACION O ESPINAR - CHANU CHANU - PUNO - PUNO.  
INTERESADO : ABRAHAM JIMENEZ PAYE / DORIS SONIA AÑACATA PACCARA.  
MOTIVO : ANALISIS FÍSICO - QUÍMICO  
FECHA DE MUESTREO : 29/07/2024 (por el interesado)  
FECHA DE ANALISIS : 01/08/2024.

COORDENADAS DE MUESTREO: N: 69°59'54" S: 15°51'10"

N° DE MUESTRA	UNIDAD	DQO	DBO	METODO ANALITICO
LOP - 02 M2T1	mg/L	231.953	92.7812	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T2	mg/L	242.186	96.8744	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T3	mg/L	105.743	42.2972	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T4	mg/L	259.241	103.6964	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T5	mg/L	221.719	88.6876	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T6	mg/L	119.387	47.7548	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T7	mg/L	289.941	115.9764	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T8	mg/L	225.130	90.052	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T9	mg/L	98.920	39.568	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T10	mg/L	102.331	40.9324	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T11	mg/L	115.976	46.3904	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T12	mg/L	95.509	38.2036	Digestión Cerrada
LOP - 02 M2T12R	mg/L	98.92	39.568	Digestión Cerrada

**INTERPRETACION:**

El agua analizada es en iones líquido por lo tanto los resultados serán interpretados en el área correspondiente.

Ricardo Fernandez Calvez  
RUC: 20012800741  
E-RENTE

Juan Carlos Luna Quevedo  
CIP: 200778  
SPECIALISTA EN SUELOS

Jr. Esmeralda N°193 URB - Villa Florida - a una cuadra del local Pérgola - Puno  
Cel. 973296546 - 918184722



N.º 003100

**ASUNTO** : ANALISIS DE AGUAS RESIDUALES MUESTRA LOP 1  
**PROCEDENCIA** : LAGUNA DE OXIDACIÓN DE LA CIUDAD DE PUNO (AGUA MUNICIPAL DOMESTICA)  
**INTERESADOS** : ABRAHAM JIMÉNEZ PAYE, DORIS SONIA AÑACATA PACCARA  
**PROYECTO** : TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MEDIANTE FOTO CATALISIS EN LAGUNA DE OXIDACIÓN DE LA CIUDAD DE PUNO - 2024  
**MOTIVO** : CONCENTRACIÓN: DQO, TURBIEDAD  
**ANÁLISIS** : TODO LO MENCIONADO  
**MUESTREO** : 05/08/2024, por el interesado  
**FECH. DE RECEP.** : 14/08/2024  
**ANÁLISIS** : 14/08/2024  
**COD. MUESTRA** : 80009-000626

**CARACTERÍSTICAS ORGANOLEPTICAS**

**ASPECTO** : Líquido  
**COLOR** : Característico al agua residual

**CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS**

**CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS**

PARAMETROS FÍSICO QUÍMICOS	UNIDAD	INICIO PTAR RESULTADOS	METODO ANALITICO
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	382.04	Digestión cerrada
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	276.3	Digestión cerrada
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	206.08	Digestión cerrada
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	177.38	Digestión cerrada
Turbiedad	NTU	132	Electrométrico

Puno, C.U. 30 de setiembre del 2024

VºBº

ING. LUZ MARINA TEVES PONCE  
 ANALISTA DE LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD  
 F.I.Q. - 1266 - C.P. 182199

DECANO DE LA F.I.Q.  
 UNA - PUNO



N.º 0031001

## Certificado de Análisis

**ASUNTO** : ANALISIS DE AGUAS RESIDUALES MUESTRA LOP 2  
**PROCEDENCIA** : LAGUNA DE OXIDACIÓN DE LA CIUDAD DE PUNO (AGUA MUNICIPAL DOMESTICA)  
**INTERESADOS** : ABRAHAM JIMÉNEZ PAYE, DORIS SONIA AÑACATA PACCARA  
**PROYECTO** : TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MEDIANTE FOTO CATALISIS EN LAGUNA DE OXIDACIÓN DE LA CIUDAD DE PUNO - 2024  
**MOTIVO** : CONCENTRACIÓN: DQO, TURBIEDAD  
**MUESTREO** : 05/08/2024, por el interesado  
**FECH. DE RECEP.** : 14/08/2024  
**ANÁLISIS** : 14/08/2024  
**COD. MUESTRA** : 80009-000626

### CARACTERÍSTICAS ORGANOLEPTICAS

**ASPECTO** : Líquido  
**COLOR** : Característico al agua residual

### CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS

### CARACTERÍSTICAS FÍSICO - QUÍMICAS

PARAMETROS FÍSICO QUÍMICOS	UNIDAD	INICIO PTAR RESULTADOS	METODO ANALITICO
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	358.16	Digestión cerrada
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	218.31	Digestión cerrada
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	133.03	Digestión cerrada
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	105.74	Digestión cerrada
Turbiedad	NTU	70	Electrométrico

Puno, C.U. 30 de setiembre del 2024

VºBº  
  
**ING. LUZ MARINA TEVES PONCE**  
 ANALISTA DE LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD  
 PID - UNIV - 017 - 18233

**DECANO DE LA F.I.Q.**  
**UNA - PUNO**

### ***ANEXO 3. Evidencias fotográficas***

#### **B 1. Punto de muestreo Lop-01**



#### **B 2 Punto de muestreo LOP-02**



### B 3. Volumen de 500mL para el tratamiento LOP-01



### B 4. Volumen de 500mL para el tratamiento LOP-02



### B 5. Pesado de $\text{FeSO}_4$ de LOP-01



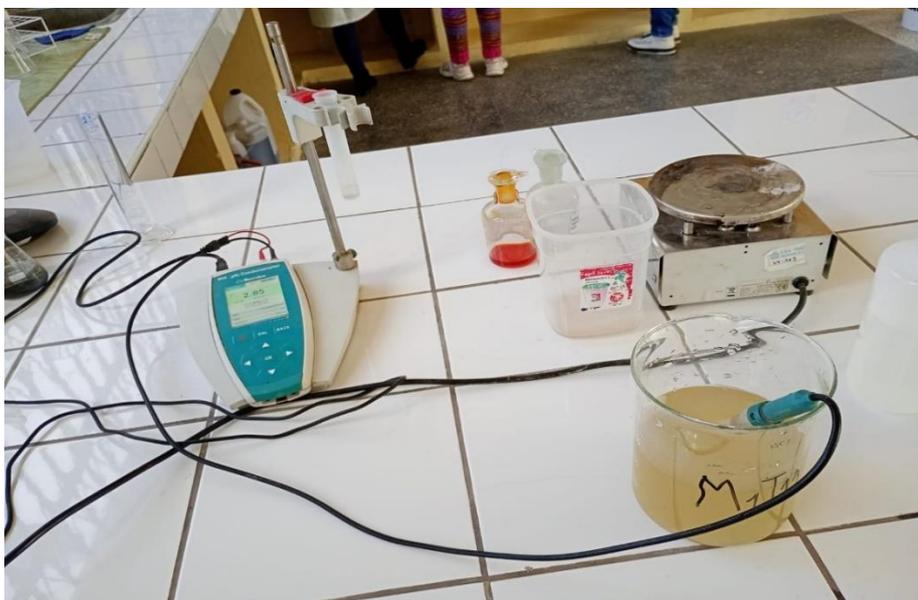
### B 6. Pesado de $\text{FeSO}_4$ de LOP-02



### B 7. Acidulación de la muestra



### B 8. Medición de pH para el tratamiento



### B 9. Agregado del agente catalizador



B 10. Agregado del agente oxidante



B 11. Verificación del tratamiento en el reactor



B 12. Muestras tratadas para envío del laboratorio.



### B 13. Tratamiento mediante proceso Foto-Fenton



### B 14. Degradación de la muestra M2T2





## B 15. Dosificación óptima de LOP-01 y LOP-02





## ANEXO 4. Declaración jurada de autenticidad de tesis.



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



VRI  
Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Doris Sonia Añoata Paccara  
identificado con DNI 7155 8219 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
Ingeniería Química

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:  
" TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL MEDIANTE FOTOCATÁLISIS  
EN LA LAGUNA DE OXIDACION DE LA CIUDAD DE PUNO -2024  
"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 11 de diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Abraham Jimenez Paye  
identificado con DNI 71604822 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
Ingeniería Química

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:  
" Tratamiento del agua residual mediante fotoanálisis  
en la laguna de oxidación de la Ciudad de Puno -  
2024 "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 11 de diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



## ANEXO 5. Autorización para el depósito de tesis o trabajo de investigación en el repositorio institucional.



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Doris Sonia Añacata Paacara  
identificado con DNI 71558219 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Química

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

" TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL MEDIANTE FOTOCATÁLISIS EN LA LAGUNA DE OXIDACIÓN DE LA CIUDAD DE PUNO-2024 "

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 11 de diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella



### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Abraham Jimenez Paye  
identificado con DNI 71604822 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Química

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

" Tratamiento del agua residual mediante fotocatalisis en la laguna de oxidación de la Ciudad de Puno-2024 "

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 11 de diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella