

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA POTABLE MEDIANTE  
FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA USANDO ÓXIDO DE TITANIO COMO  
CATALIZADOR”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**

**AUTORES**

**KARELY ANABEL, CALLA ACERO  
OLIVER JESÚS, CHAVARRÍA CÓRDOVA**

**ASESOR**

**MG. FABIO MANUEL RANGEL MORALES**

Three handwritten signatures in black ink are positioned to the right of the authors' names. The top signature is the most prominent, followed by two smaller ones below it.

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**Callao, 2023**

**PERÚ**



## PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue sustentada por los bachilleres **CALLA ACERO KARELY ANABEL** y **CHAVARRIA CORDOVA OLIVER JESUS** ante el Jurado de Sustentación de Tesis conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

Ing. Pablo Belizario Diaz Bravo	Presidente
Ing. Leonardo Felix Machaca Gonzales	Secretario
Lic. Santos Pantaleón Rodríguez Chuquimango	Vocal
Lic. Salvador Apolinar Trujillo Pérez	Miembro Suplente
Ing. Fabio Manuel Rangel Morales	Asesor

Tal como está asentado en el Libro de actas N° 01 Folio N° 117 y Acta N° 116 de fecha sábado 29 de abril del 2023, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 099–2021–CU del 30 de junio de 2021.

## **INFORMACIÓN BÁSICA**

**FACULTAD:** Ingeniería Química

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN:** De la Facultad de Ingeniería Química

**TÍTULO:**

“Remoción de arsénico del agua potable mediante fotocatalisis heterogénea utilizando óxido de titanio como catalizador”

**AUTORES**

Karely Anabel Calla Acero

CÓDIGO ORCID 0000-0002-7352-3983 / DNI 48434107

Oliver Jesús Chavarría Córdova

CÓDIGO ORCID 0000-0002-5980-7605 / DNI 71693322

**ASESOR**

Mg. Ing. Fabio Manuel Rangel Morales

CÓDIGO ORCID 0000-0002-4967-1847/ DNI 25618170

**LUGAR DE EJECUCIÓN**

Laboratorio e instalaciones de la empresa AURICA SAC, Independencia, Lima

**UNIDADES DE ANÁLISIS**

Muestra de agua sintetizada

**TIPO / ENFOQUE / DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

Aplicada / Cuantitativa / Experimental

**TEMA OCDE**

Ingeniería de proceso

## **DEDICATORIA**

A Dios por darnos la fortaleza de seguir adelante, a pesar de las dificultades encontradas en el camino.

A mi familia, en especial a nuestros padres, que con esfuerzo y dedicación nos brindaron todo su apoyo para que el día de hoy seamos los profesionales que somos, gracias por su amor incondicional, este logro es también el de ustedes.

# ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	4
ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
ÍNDICE DE ABREVIATURAS .....	6
RESUMEN .....	7
ABSTRACT .....	8
INTRODUCCIÓN .....	9
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	10
1.1. Descripción de la realidad problemática .....	10
1.2. Formulación del problema (problema general y específicos) .....	12
1.2.1. Problema general.....	12
1.2.2. Problemas específicos .....	12
1.3. Objetivos (general y específicos) .....	12
1.3.1. Objetivo general .....	12
1.3.2. Objetivos específicos .....	12
1.4. Justificación.....	12
1.5. Delimitantes de la investigación (teórico, temporal y espacial) .....	13
1.5.1. Teórico .....	13
1.5.2. Temporal.....	13
1.5.3. Espacial.....	13
II. MARCO TEÓRICO .....	14
2.1. Antecedentes: Internacionales y nacionales .....	14

2.2 Bases teóricas.....	16
2.2.1. Arsénico .....	16
2.2.2. Tecnologías avanzadas en tratamiento de aguas.....	18
2.2.3. Fotocatálisis heterogénea .....	19
2.2.4. Dióxido de titanio como fotocatalizador.....	19
2.2.5. Coagulación con FeCl <sub>3</sub> .....	22
2.2.6. Condiciones de operación en un proceso fotocatalítico .....	23
2.2.7. Índice de radiación ultravioleta (IUV) .....	25
2.3 Marco conceptual.....	27
2.4. Definición de términos básicos.....	28
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	30
3.1. Hipótesis (general y específicas) .....	30
3.1.1. Operacionalización de variables .....	31
IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO .....	32
4.1 Diseño metodológico.....	32
4.2. Método de investigación.....	33
4.2.1. Equipo experimental .....	33
4.2.2. Impregnación del catalizador TiO <sub>2</sub> en carbón activado .....	34
4.2.3. Preparación de la muestra de agua con arsénico .....	36
4.2.4. Corridas experimentales .....	37
4.2.5. Caracterización del agua tratada .....	39
4.3. Población y muestra.....	40
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado .....	40
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información .....	40
4.5.1. Caracterización de las muestras de agua tratada .....	40
4.5.2. Cantidad de radiación ultravioleta (UV).....	40

4.5.3. Equipos y materiales .....	41
4.6. Análisis y procesamiento de datos .....	42
4.7. Aspectos éticos en investigación .....	43
V. RESULTADOS .....	44
5.1. Resultados descriptivos .....	44
5.1.1. Porcentaje de remoción de arsénico .....	46
5.1.2. Adsorción de arsénico mediante FeCl <sub>3</sub> .....	48
5.1.3. Índice de radiación UV .....	51
5.1.4. Cinética de reacción de arsénico por fotocátalisis de TiO <sub>2</sub> y FeCl <sub>3</sub> como coagulante .....	53
5.2. Resultados inferenciales .....	56
5.3. Otro tipo de resultados estadísticos .....	58
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	59
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados. ....	59
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares. ....	60
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes. ....	62
VII. CONCLUSIONES .....	63
VIII. RECOMENDACIONES.....	64
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65
ANEXOS .....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas del arsénico.....	16
Tabla 2. Matriz de experimentos .....	32
Tabla 3. Características del agua sintetizada.....	44
Tabla 4. Porcentaje de remoción de arsénico de acuerdo al diseño experimental.....	45
Tabla 5. Resultados de la primera corrida .....	46
Tabla 6. Resultados de la segunda corrida .....	46
Tabla 7. Promedio de porcentaje de remoción de arsénico .....	47
Tabla 8. Consumo de coagulante en la primera corrida.....	49
Tabla 9. Consumo de coagulante en la segunda corrida .....	49
Tabla 10. Promedio de gasto de coagulante $\text{FeCl}_3$ .....	50
Tabla 11. Índice UV en las horas de tratamiento .....	51
Tabla 12. Valores para la determinación del orden de la reacción para dosis de $1\text{gTiO}_2/100\text{ AC}$ .....	54
Tabla 13. Valores para la determinación del orden de la reacción para dosis de $2.5\text{gTiO}_2/100\text{ AC}$ .....	54
Tabla 14. Valores para la determinación del orden de la reacción para dosis de $5\text{gTiO}_2/100\text{ AC}$ .....	54
Tabla 15. Análisis de varianza (ANOVA) de remoción de arsénico .....	59
Tabla 16. Resumen del modelo utilizado para la remoción de arsénico .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del arsénico en el medio ambiente.....	17
Figura 2. Clasificación de las Tecnologías Avanzadas de Oxidación .....	18
Figura 3. Diagrama de activación de un semiconductor .....	20
Figura 4. Espectro electromagnético de la luz solar.....	26
Figura 5. Categoría de exposición a la radiación ultravioleta.....	26
Figura 6. Categoría de exposición a la radiación ultravioleta.....	26
Figura 7. Mezcla del dióxido de titanio y carbón activado .....	35
Figura 8. Evaporación del agua en impregnación directa .....	35
Figura 9. Muestra de TiO <sub>2</sub> impregnado en carbón activado. ....	36
Figura 10. Toma de muestra de agua tratada.....	38
Figura 11. Muestras de agua tratada .....	38
Figura 12. Separación del precipitado mediante filtración.....	39
Figura 13 Equipo experimental .....	41
Figura 14. Espectrofotómetro de absorción atómica.....	42
Figura 15. Porcentaje promedio de remoción a distintas dosis.....	48
Figura 16. Gasto de coagulante FeCl <sub>3</sub> en la adsorción de As(V) .....	51
Figura 17. Pronóstico de radiación UV para el 10-03-2023 .....	52
Figura 18. Pronóstico de radiación UV para el 15-03-2023 .....	53
Figura 19. Gráfica de Ln(Co/C) en función del tiempo de reacción.....	55
Figura 20. Efectos de las variables en la remoción de As.....	56
Figura 21. Interacción de las condiciones de operación en la remoción .....	57
Figura 22. Diagrama de Pareto de las condiciones de operación.....	58

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

As	: Arsénico
iAs	: Arsénico inorgánico
mg/L	: Miligramos por litro.
L/min	: Litros por minutos
AC	: carbón activado
IUV	: Índice de radiación Ultravioleta
pH	: Potencial de hidrógeno
pHpzc	: Punto de carga cero o punto isoeléctrico
POA	: Procesos de oxidación avanzada
mgAs/L	: Miligramo de Arsénico por Litro
e –	: Electrón
h +	: Hueco
L	: Litro
ppm	: Partes por millón.
LMP	: Límites máximos permisibles.
OMS	: Organización Mundial de la Salud
ICP-MS	: Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo
X1	: Contenido de arsénico
X2	: Condiciones de operación
Y	: Remoción de arsénico

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo la remoción de arsénico mediante fotocatalisis heterogénea, usando óxido de titanio como catalizador y la radiación solar. Los tratamientos de agua convencionales tienen dificultades para remover este metal, llegándose a encontrar hasta cinco veces ese valor máximo permisible de 0.01 mg/L en algunos distritos de los departamentos como Lambayeque, Puno, Tacna, Arequipa y Moquegua. Para esto, se ha elaborado un sistema de tratamiento que consta de un equipo experimental de 3 recipientes de polipropileno, situados en paralelo. Cada uno contiene carbón activado impregnado con dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y una bomba con un flujo constante de 1.3 L/min, la cual permite darle movimiento al agua tratada para que tenga mayor contacto con el fotocatalizador. Las condiciones de operación evaluadas fueron: tiempo (45, 90, 135 y 180 minutos) y dosis de dióxido de titanio (1, 2.5 y 5 g  $\text{TiO}_2$ /100 g AC). Los resultados muestran una remoción de arsénico promedio de 86.68%, 91.68% y 94.72%, respectivamente. En conclusión, la fotocatalisis heterogénea es una tecnología que permite remover el arsénico del agua potable aprovechando la radiación solar para llegar a concentraciones de arsénico por debajo del límite máximo permisible (LMP) fijado en nuestro país por el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N° 031-2010-SA.

**Palabras claves:** *arsénico, fotocatalisis, fotocatalizador, dióxido de titanio.*

## ABSTRACT

The objective of this research is the removal of arsenic by heterogeneous photocatalysis, using titanium oxide as a catalyst and solar radiation. Conventional water treatments have difficulties in removing this metal, reaching up to five times that maximum permissible value of 0.01 mg/L in some districts of departments such as Lambayeque, Puno, Tacna, Arequipa and Moquegua. For this, a treatment system has been elaborated that consists of an experimental equipment of 3 polypropylene containers, located in parallel. Each one contains activated carbon impregnated with titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) and a pump with a constant flow of 1.3 L/min, which allows movement of the treated water so that it has greater contact with the photocatalyst. The operating conditions evaluated were: time (45, 90, 135 and 180 minutes) and dose of titanium dioxide (1, 2.5 and 5 g TiO<sub>2</sub>/100 g AC). The results show an average arsenic removal of 86.68%, 91.68% and 94.72%, respectively. In conclusion, heterogeneous photocatalysis is a technology that allows arsenic to be removed from drinking water by taking advantage of solar radiation to reach arsenic concentrations below the maximum permissible limit (MLP) set in our country by the Regulations for the Quality of Water for Consumption. Human DS No. 031-2010-SA.

**Keywords:** *arsenic, photocatalysis, photocatalyst, titanium dioxide*

## INTRODUCCIÓN

El creciente interés por la degradación de diferentes contaminantes que se encuentran en las aguas residuales industriales ha llevado a más investigaciones sobre procesos de oxidación avanzada (POA) que aprovechan el fuerte poder oxidante de los radicales, especialmente en el caso de los compuestos no biodegradables. [1].

La fotocatalisis heterogénea es una tecnología de oxidación avanzada cuya eficiencia en la eliminación de sustancias poco biodegradables a concentraciones moderadas y bajas es conocida ya que combina un catalizador que forma radicales hidroxilo y energía solar (fuente de luz ambientalmente amigable y sensible) convirtiéndose en una herramienta poderosa de mineralización de los contaminantes, lo que resulta en un ahorro de energía [2]. El  $\text{TiO}_2$  es usado como catalizador porque es una especie bastante estable termodinámicamente, además de su inocuidad al ataque químico y biológico, no tóxico, no selectivo, insoluble y con una energía de activación o banda gap relativamente baja (3,02 eV) [3].

Uno de los contaminantes más preocupantes es el arsénico, un elemento químico altamente tóxico que se encuentra en la geosfera y la corteza terrestre. Los humanos están expuestos al arsénico inorgánico (iAs) por intermedio de los alimentos y el agua. [4]. La Organización Mundial de la Salud, considera al arsénico en la lista de las diez sustancias químicas más perjudiciales para la salud debido a que este puede causar cáncer al pulmón, riñón, piel y vejiga, así como también puede generar problemas relacionados con el desarrollo metabólico y neurológico y enfermedades cardiovasculares, entre otros [5].

En esta investigación se tiene como objetivo remover el arsénico mediante la fotocatalisis heterogénea utilizando como catalizador el dióxido de titanio fijado en carbón activado.

# I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1. Descripción de la realidad problemática

En la actualidad, muchas actividades industriales son responsables de altos niveles de contaminación de las masas de agua, principalmente a causa de contaminantes inorgánicos como los iones metálicos. Los metales son importantes contaminantes en aguas, sobre todo disueltos; los más dañinos para el ser humano y otros seres vivos son cromo, arsénico, hierro, plomo, cobre, zinc, etc. Estos presentan interés no solo por su toxicidad (alto riesgo para la salud del individuo) sino por su tendencia a la bioacumulación y su persistencia en el medio ya que no pueden ser degradados o destruidos de manera natural [1].

La calidad del agua potable en el Perú está íntimamente relacionada con la calidad de las fuentes de agua, las cuales están expuestas principalmente a metales de origen natural y artificial, y a las dificultades tecnológicas y financieras de las empresas sanitarias para eliminar la presencia de metales para garantizar los servicios de saneamiento del agua a través de sistemas seguros y sostenibles [6].

El límite de concentración recomendado para el arsénico en el agua potable es de 10 µg/L o 0,01 ppm, y la exposición a largo plazo al arsénico inorgánico As (III), puede conducir a envenenamiento crónico. Las consecuencias más típicas son la aparición de lesiones cutáneas y cáncer de piel, también está relacionado con problemas de desarrollo, enfermedades cardiovasculares, neurotoxicidad y diabetes. La contaminación por arsénico de las aguas subterráneas es un problema generalizado; el consumo de agua contaminada es alto en varias regiones [5].

Las muestras de agua recogidas en la sección del río Rímac, que atraviesa Lima, tenían concentraciones de arsénico superiores al límite de la OMS, identificándose contaminación por arsénico respecto al límite en el

95% del total de muestras (106/111) de las aguas subterráneas y en el 68% (19/28) de las muestras de agua superficiales, esto conllevaba a que en varios distritos de Perú el agua potable muestra una contaminación por arsénico que supera el límite de arsénico establecido por la OMS y supone una amenaza para la salud pública que requiere mayor investigación y acción [5].

También se ha demostrado que el nivel medio de arsénico en las piletas de agua potable de la ciudad de Tacna es de 0,056 mg/L (rango: 0,047 0,064), lo cual representa más de cinco veces el valor permitido por la legislación peruana (0,01 mg/L), siendo los distritos con mayor nivel de contaminación del agua potable con arsénico Pocolay, Ciudad Nueva y Tacna Cercado [7].

El Ministerio de Salud realizó pruebas a 312 niños de 6 a 12 años del distrito de Pacora (Lambayeque) el cual arrojó que 167 tenían niveles excesivos de arsénico en la sangre y en el 2020, según el Decreto Supremo N°143-2020-PCM, se declara Estado de Emergencia por un plazo de 60 días en las localidades de Pacora, Pueblo Viejo, Puente Machuca, La Victoria y Las Juntas Altas y Bajas, debido a que los más de 8 mil pobladores de esta localidad consumen agua contaminada con arsénico. [8].

El Ministerio de Salud (MINSA) mediante 4959 establecimientos de salud realizaron actividades de la Vigilancia de la calidad de agua para consumo humano. Los resultados registrados en el “Sistema de información web de la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano”, correspondiente al periodo: enero 2021 a setiembre 2022, verificaron incumplimientos respecto a los Límites Máximos Permisibles para el arsénico establecidos en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano en diferentes regiones del país: Tumbes, Tacna, Puno, Moquegua, Lima, Lambayeque, Junín, Ica, Huánuco, Huancavelica, Ayacucho, Arequipa y Apurímac [9].

## **1.2. Formulación del problema (problema general y específicos)**

### **1.2.1. Problema general**

¿Cómo se removerá el arsénico del agua potable mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿Cuál es el contenido de arsénico del agua potable a ser tratada mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador?
- ¿Cuáles son las condiciones de operación para la remoción de arsénico en el agua potable mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador?

## **1.3. Objetivos (general y específicos)**

### **1.3.1. Objetivo general**

Remover el arsénico en el agua potable mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar el contenido de arsénico del agua potable a tratar mediante la remoción de arsénico en el agua potable mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador.
- Determinar las condiciones de operación para la remoción de arsénico en el agua potable mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador.

## **1.4. Justificación**

Los resultados de esta investigación buscan contribuir en los conocimientos para solucionar problemas medioambientales como es la presencia de arsénico en el agua potable utilizando una tecnología que aprovecha una fuente natural

de energía como es la fotocatalisis heterogénea. La aplicación de esta tecnología avanzada mejorará la calidad del agua para los pobladores de distintas zonas del país que sufren con este problema, como son: Tumbes, Tacna, Puno, Moquegua, Lima, entre otros, impactando a nivel social ya que, al disminuir la cantidad de arsénico en el agua potable se disminuye el riesgo de problemas en la salud. Esta tecnología puede replicarse en otras zonas donde se presenten problemas similares en cuanto a contaminación de recursos hídricos.

## **1.5. Delimitantes de la investigación (teórico, temporal y espacial)**

### **1.5.1. Teórico**

La investigación está delimitada por los fundamentos teóricos de los tratamientos avanzados para agua como la fotocatalisis heterogénea. También está enmarcada por el Reglamento de la calidad del agua para consumo humano D.S. N° 031-2010-SA.

### **1.5.2. Temporal**

La investigación está delimitada por las estaciones del año. Esta tecnología es mejor aprovechada en la estación de verano ya que durante este periodo se alcanzan valores entre 13 y 18, en una escala del 1 al 20, considerando del 11 al 20 como radiación extremadamente alta según la escala dada por SENAMHI, siendo la hora de mayor radiación a las 12 pm. Por ello, en la presente investigación se utilizó un rango horario de 11 am a 2 pm.

### **1.5.3. Espacial**

La investigación está delimitada por la preparación de las muestras para su tratamiento y el propio tratamiento fueron realizados en las instalaciones de la empresa AURICA SAC. Las muestras de agua tratadas fueron sintetizadas a partir de agua desionizada, de acuerdo a los porcentajes de contaminación que se registran en distintas zonas del país.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes: Internacionales y nacionales

#### 2.1.1. Antecedentes internacionales

En el artículo titulado *“Fotocatálise heterogênea com TiO<sub>2</sub> para oxidação de arsênio e sua remoção de águas por coprecipitação com sulfato férrico”* estudiaron la fotocatalisis heterogénea con el objetivo de oxidar el As(III) a As(V) y así, remover este componente mediante coprecipitación usando una sal de hierro. Para ello, montaron un reactor fotoquímico que tenía óxido de titanio inmovilizado en su superficie interna y usaron tres muestras de agua contaminada (mina, grifo y río). Evaluaron parámetros como pH (pH=7), concentraciones de óxido de titanio (de 0 a 15%), sulfato férrico y tiempo de exposición (240 minutos) logrando eliminar más del 99% de arsénico presente en el agua [10].

En la investigación titulada *“Desinfección y remoción de arsénico del agua por fotocatalisis heterogénea”*, el autor estudió la remoción de arsénico en presencia de la luz solar y luz artificial. En dicha investigación usó botellas PET impregnadas con óxido de titanio, así como, cloruro férrico como agente coagulante para precipitar el arsénico. Evaluó los siguientes parámetros: pH (5, 6.8 y 8), tiempo de irradiación (0-180 minutos), concentración de arsénico (25 y 160 µg/L.) y concentración de cloruro férrico (0-21 mg/L). Teniendo como resultado final un 98% de eficiencia en la remoción de arsénico, concluyendo que la fotocatalisis heterogénea con adición de cloruro férrico es un buen método para remover arsénico [11].

En la investigación titulada *“Fotocatálisis heterogénea como método de tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario Romerillos Del Cantón Mejía”* el autor evaluó la fotocatalisis heterogénea y el uso de óxido de titanio como catalizador, como método para disminuir la concentración de arsénico presente en una muestra de lixiviado. Trabajó con una irradiación promedio de 775 W/m<sup>2</sup> y un periodo de tiempo de tres horas, teniendo como concentración de arsénico

inicial un valor de 0.11 mg/L y una concentración final de 0.0115 mg/L. Los resultados obtenidos muestran un 87% de remoción del arsénico. Además, concluyó que: a pH básicos, se debe aumentar el tiempo de contacto con el catalizador para obtener porcentajes de remoción más elevados [12].

En el artículo titulado *“Fotocatálisis heterogénea para la remoción de antimonio (Sb) en agua utilizando dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) como catalizador”*, los autores utilizaron peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) como agente oxidante y un colector solar tubular plano, el cual estuvo expuesto a la radiación en flujo continuo por varios tiempos de exposición. Variaron la concentración del catalizador (0.5, 1, 2, 3, 3.5 y 4 g), agente oxidante y el pH de la solución e hicieron pruebas experimentales hasta encontrar los porcentajes más elevados de remoción. Concluyendo así que a pH neutro con una cantidad de 4 g de TiO<sub>2</sub>, sin agregar el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, en un tiempo de 20 h, el sistema fotocatalítico desarrollado removió el 99.5% del Sb del agua tratada [13].

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

En la investigación *“Tratamiento de aguas residuales de la Universidad Nacional del Centro del Perú por fotocatalisis heterogénea”*, el autor trató las aguas residuales de la Universidad Nacional del Centro del Perú con fotocatalisis heterogénea por las características del efluente (grado de concentración y tipos de contaminantes) y potencialidad de la fotocatalisis. En su experimento trabajó con 24 L de agua residual. Reguló el pH y agregó TiO<sub>2</sub> (1,0 g/L) y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1,0 y 1,5 g/L) concluyendo que, para días nublados, donde la irradiación solar varía ente 150 a 400 W/m<sup>2</sup>, el pH, tiempo de tratamiento y concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en la degradación de las aguas residuales es 4, 4 horas y 1 g/L, respectivamente. A estas condiciones logró el mayor porcentaje de degradación (62,75%). [14].

En *“Influencia del peso de TiO<sub>2</sub> en la remoción de mercurio divalente en un fotocatalizador de placas planas”*, el autor estudió la remoción de mercurio divalente en medio acuoso mediante fotocatalisis. El proceso fue realizado en un reactor de placas planas inclinadas a escala de laboratorio, variando las concentraciones iniciales del contaminante (0.02 mg/l, 0.2 mg/l y 2 mg/l) y el peso

del dióxido de titanio (25, 50, 100 g). A su vez observó el efecto que causa el tratamiento en parámetros como pH, conductividad eléctrica y temperatura. Concluyendo que la mayor tasa de remoción se obtiene utilizando 50 g de TiO<sub>2</sub>. Obteniendo así, para cada concentración inicial de mercurio, tasas de remoción igual a 97.17 %, 91% y 56.27%, respectivamente. Así mismo, los parámetros de pH y conductividad eléctrica se ven afectados al finalizar el proceso, mostrando una relación inversamente proporcional mientras que la temperatura manifiesta una relación directa [15].

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1. Arsénico

El arsénico (As) se encuentra comúnmente en los suelos, rocas. Así como también en la atmósfera, hidrosfera y la biosfera. Es desplazado al ambiente por medio de reacciones que se dan como resultado de procesos naturales y procesos antropogénicos, tales como: la meteorización y la actividad minera, entre otros [16].

**Tabla 1**

#### *Propiedades físicas del arsénico*

Tabla 1. Propiedades físicas del arsénico

Nombre	Arsénico
Símbolo	As
Masa atómica	74.9216
Clasificación	Metaloide
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	5.727
Punto de Fusión (°C)	817

Fuente: Fano, (2021).

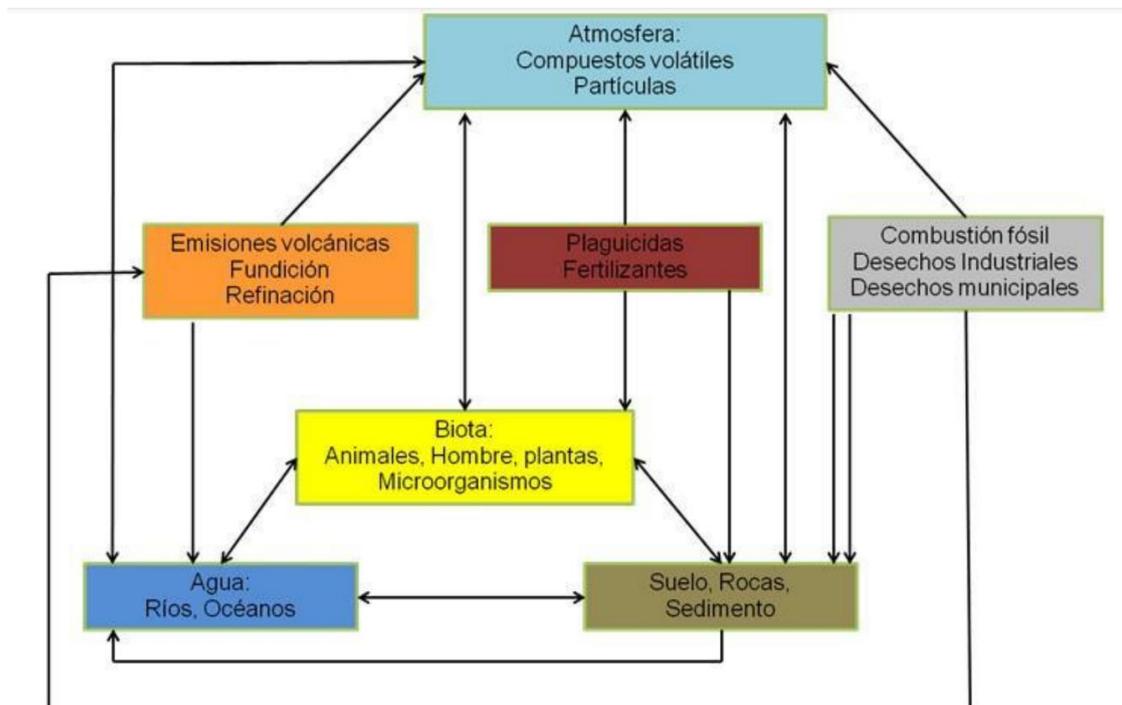
Algunas características mostradas en la tabla 1 pertenecen al arsénico. El arsénico puede encontrarse con los siguientes estados de oxidación: arsina (As<sup>-3</sup>), elemental o metaloide (As<sup>0</sup>), arsenito (As<sup>+3</sup> o AsIII) y arseniato (As<sup>+5</sup> o AsV); sin embargo, el arsenito y el arseniato son considerados sus principales

estados de oxidación [17].

El arsénico es considerado un elemento altamente tóxico y un agente carcinógeno para el organismo humano. A concentraciones altas causa efectos agudos que en un futuro pueden ser letales. La toxicidad del arsénico tiene el siguiente orden decreciente: Arsina >  $As^{+3}$  inorgánico >  $As^{+3}$  orgánico >  $As^{+5}$  inorgánico >  $As^{+5}$  orgánico > compuestos arsenicales y arsénico elemental [16]. La figura 1 muestra cómo se comporta el arsénico en nuestro medio ambiente.

### Figura 1

*Ciclo del arsénico en el medio ambiente.*



Fuente: Alarcón, (2012).

El origen del arsénico puede ser inorgánico u orgánico. El arsénico que procede directamente de los minerales es llamado inorgánico. Este es considerado más tóxico para los seres humanos, ya que puede causar enfermedades como el cáncer. Mientras que, por otro lado, también se encuentra el arsénico orgánico, que es el que ya ha sido asimilado por algún organismo vivo. Esta forma del arsénico se puede encontrar en alguna planta que ha sido regada con agua

contaminada por este metal, así como también en el pelo o uñas de animales que hayan consumido agua contaminada o que sean herbívoros [16].

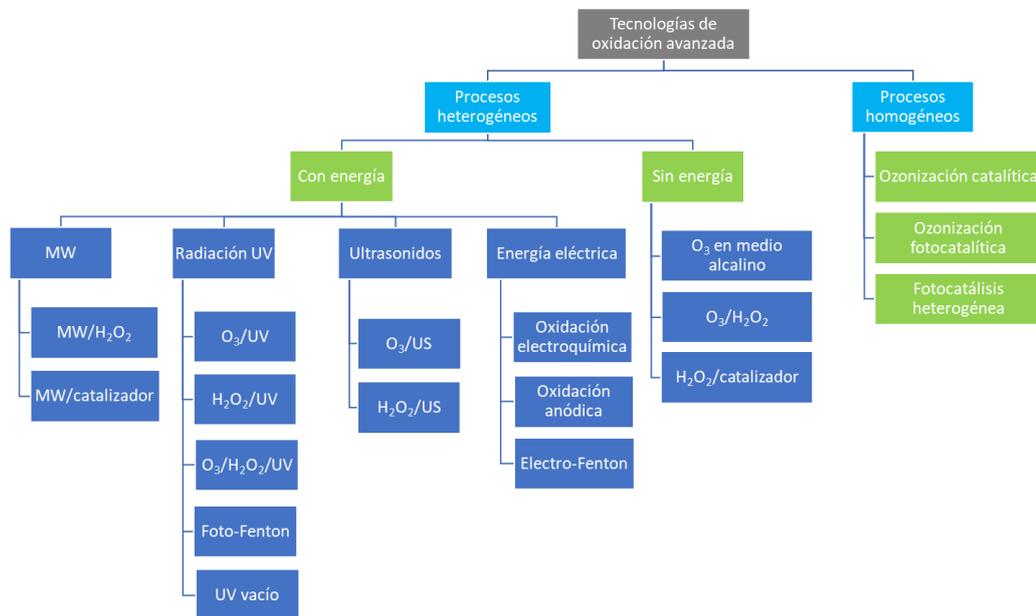
### 2.2.2. Tecnologías avanzadas en tratamiento de aguas

Las tecnologías avanzadas de oxidación (TAO's) son muy favorables para el tratamiento de efluentes ya que, a una presión y temperatura cercana a las condiciones ambientales, generan la cantidad suficiente de radicales altamente oxidantes como los radicales hidroxilos, para oxidar contaminantes orgánicos e inorgánicos. La importancia de las TAO's radica en que, a comparación con otras tecnologías de oxidación tradicionales, el proceso de oxidación de los contaminantes es muy rápido. [16].

En la figura 2 se muestran las principales tecnologías de oxidación avanzada [18].

**Figura 2**

*Clasificación de las Tecnologías Avanzadas de Oxidación.*



Fuente: Lopez. (2021).

### **2.2.3. Fotocatálisis heterogénea**

La fotocatálisis es definida como una reacción fotoquímica en la cual obtenemos energía química a partir de energía solar, esto se da en la superficie de un catalizador también llamado sustrato, siendo este un material semiconductor encargado de acelerar la velocidad de reacción. Estudios revelan que la fotocatálisis elimina algunos contaminantes presentes en la atmósfera, tales como: compuestos poli aromáticos, compuestos orgánicos clorados, metil mercaptano, formaldehído, CO, NO<sub>x</sub> (óxidos, SO<sub>x</sub>, COVs (compuestos orgánicos volátiles), entre otros [18].

El proceso de fotocatálisis heterogénea ha despertado gran interés científico en los últimos años, hasta el punto de generar más de 2000 publicaciones en diferentes áreas del conocimiento. Abarcando temas como el desarrollo de materiales fotocatalíticos hasta los aportes que este proceso puede generar desde el punto de vista ambiental. [18]

Esta clasificación de la fotocatálisis corresponde al proceso en el cual las especies reactivas y el fotocatalizador se encuentran en fases diferentes.

Su aplicación al tratamiento de aguas usualmente se enfoca en la utilización de un fotocatalizador sólido. El radical hidroxilo es producido mediante procesos fotoquímicos, mismos que se fundamentan en la absorción de energía radiante por parte de un sólido que tiene la naturaleza de ser un material semiconductor [19].

### **2.2.4. Dióxido de titanio como fotocatalizador**

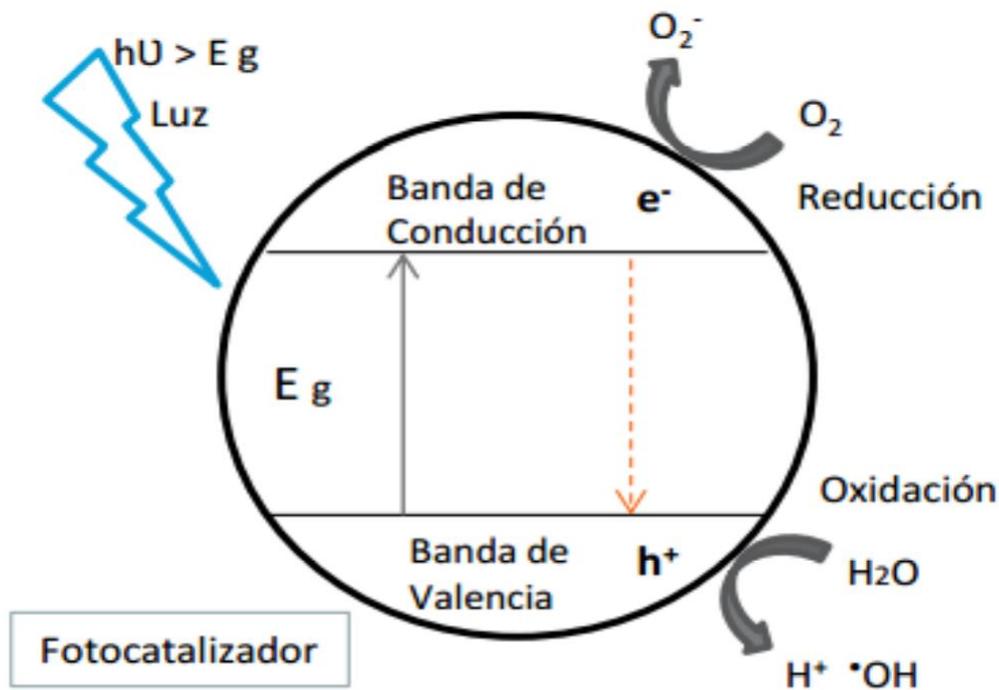
Actualmente se están desarrollando nuevas tecnologías que emplean la luz como mecanismo de desinfección de aguas o de gases. Tal como se ha mencionado anteriormente, dentro de los procesos avanzados de oxidación se encuentra la fotocatálisis heterogénea, misma que se fundamenta en la irradiación de un semiconductor para la formación de radicales \*OH y consecuentemente la oxidación de contaminantes. Entre los semiconductores utilizados resalta el dióxido de titanio por su capacidad para absorber la

radiación UV, además de ser estable e inerte [19].

La eficiencia de los semiconductores depende de la diferencia de energía entre su banda de valencia y su banda de conducción [20], lo que se explica con la figura 3.

### Figura 3

*Diagrama de activación de un semiconductor.*



Fuente: Sarabia, (2018).

El  $TiO_2$  tiene la propiedad de degradar una amplia variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos, lo que lo convierte en un efectivo catalizador en tratamientos de oxidación fotocatalítica. Entre otras ventajas tenemos su bajo costo, químicamente inerte y fotoestable. Este óxido metálico de transición toma diferentes estructuras polimorfas: rutilo, anatasa y brookita, es un semiconductor, normalmente en su fase anatasa y rutilo, debido a que presentan mayor actividad fotocatalítica, con un ancho de banda prohibida de energía 3.2 y 3.0 eV respectivamente [21].

Se han planteado las siguientes reacciones, para este proceso:

Fotoexcitación:



El inicio de la reacción se lleva a cabo en la superficie del semiconductor (SC), los huecos reaccionan con el H<sub>2</sub>O absorbida (ecuación 2) y también como con grupos OH (ecuación 3) que forman radicales hidroxilos OH [21].

Ionización del agua:



Los electrones en exceso de la banda de conducción reaccionan con el oxígeno molecular para formar radicales superóxido y peróxido de hidrógeno [21].

Absorción de oxígeno:



El radical superóxido y el peróxido de hidrógeno generan más radicales hidroxilos mediante las siguientes reacciones [21]:



El radical  ${}^\circ OH$  generado lleva a cabo la completa mineralización de muchas sustancias orgánicas (RH) por captura de hidrógeno y formación de un radical orgánico que puede reaccionar con el oxígeno atmosférico formando peroxiradicales [21].



Incluso pueden iniciarse reacciones de oxidación en serie que pueden conducir en algunos casos la mineralización completa de los compuestos orgánicos [22].



El uso de la radiación solar como fuente de energía hace posible la interacción con la materia en un amplio rango de longitudes de onda lo que origina una variedad de cambios en la estructura de las moléculas. La radiación cercana al espectro visible o ultravioleta (240-700 nm) interacciona con los electrones de las moléculas, siendo estas reacciones, desde el punto de vista ambiental, las más importantes [22].

### **2.2.5. Coagulación con $FeCl_3$**

Una alternativa de tratamiento que es eficiente para remover arsénico de agua potable es el proceso de coagulación utilizando cloruro férrico, seguido por floculación, sedimentación y filtración. Los coagulantes cuya base es  $Fe^{3+}$  terminan siendo más efectivos en la remoción de  $As^{+5}$  y  $As^{+3}$ , en comparación a los coagulantes que son a base de aluminio. Esto es a causa de las constantes de disociación y estabilidad del floculo [23].

En las aguas subterráneas es común encontrar hierro y arsénico. La eliminación de este último disminuye con una alta concentración de hierro, lo que es asociado a la oxidación preferida de Fe (II) sobre As (III) [24].

En las plantas de tratamiento de agua logran remover el  $As^{+5}$  mediante procesos de ablandamiento con cal y soda. Así como también mediante coagulación utilizando sulfato de aluminio o hierro. Estos coagulantes se hidrolizan dando como resultado hidróxidos. En los cuales el  $As^{+5}$  y otros iones metálicos se absorben y coprecipitan. Según estudios, para lograr eficiencias de remoción, aguas naturales con gran cantidad de coloides necesitan coagulantes en altas concentraciones [25].

El tiempo que necesita el proceso de coagulación es muy corto, se podría decir que es casi instantáneo. Este proceso está dividido por las siguientes etapas:

formación de compuestos químicos poliméricos, adsorción de cadenas poliméricas por los coloides, adsorción mutua de coloides y por último la acción de barrido [26].

La coagulación se puede clasificar de la siguiente manera: por adsorción y por barrido. La primera hace referencia cuando en el agua existe una alta concentración de partículas coloides, al añadir el coagulante, los productos solubles de este, son absorbidos por los coloides generando de manera casi instantánea flóculos. A diferencia de la coagulación por barrido en este caso, la cantidad de partículas coloides presentes en el agua es pequeña, siendo atrapadas al producirse una sobresaturación de precipitado de sulfato de aluminio o cloruro férrico [26].

Debido a la alta afinidad entre el hierro y el arsénico. Comúnmente se utiliza el  $FeCl_3$  como coagulante, a este se le añade agua con la intención de generar hidróxido de hierro. Este producto de la reacción, es considerado un fuerte adsorbente del arsénico (V) [27]. La reacción se muestra a continuación:



Los porcentajes de remoción más altos son obtenidos cuando se trabaja el cloruro férrico en un rango de pH entre 7,0 y 7,5. La remoción de arsénico se da por adsorción y coprecipitación de las especies catiónicas y de los precipitados del hidróxido  $Fe(OH)_3$  con los que, en forma conjunta, el arsénico coprecipita en forma de complejos (como el metaarseniato de hierro III) y sedimenta rápidamente. [25].



### **2.2.6. Condiciones de operación en un proceso fotocatalítico**

Para el caso de la fotocatálisis heterogénea, el catalizador puede encontrarse dentro del reactor fotocatalítico de dos formas: fijo o inmovilizado, es decir se encuentra impregnado en la superficie, o se puede encontrar suspendido en la

disolución [28], en la figura 4 se observar.

En los casos en los que se usa el catalizador fijado a una superficie inerte, el área superficial irradiada se reduce significativamente, disminuyendo la cantidad de sitios activos, dificultando la transferencia de masa y como consecuencia limitándose la difusión. Por otro lado, la ventaja de utilizar el catalizador fijado es por la fácil separación del agua y que bajo ciertas condiciones adecuadas puede ser reutilizado [28].

Las condiciones de operación que influyen en el proceso fotocatalítico son: concentración de agente oxidante, concentración del contaminante, concentración del catalizador, pH del medio y temperatura [28].

**Concentración de agente oxidante.** Los agentes oxidantes facilitan la captura de los electrones originados en la banda de conducción del semiconductor. A consecuencia, disminuye la probabilidad de recombinación del par  $e^-/h^+$ . Razón por la cual son muy importantes para la reacción de oxidación. Así mismo, evitan la aglomeración de electrones en la superficie del  $TiO_2$ , manteniendo la reacción equilibrada. Entre los agentes oxidantes tenemos:  $H_2O_2$ ,  $BrO_3^-$  o  $S_2B_8^{2-}$  y oxígeno. Siendo este último, el más empleado por su eficiencia como aceptor de electrones y bajo costo al ser obtenido directamente del aire [28].

**Concentración de catalizador.** La importancia de este parámetro radica en su influencia en la velocidad de degradación de los contaminantes. En la mayoría de casos, la concentración del catalizador y la velocidad de degradación tienen relación directamente proporcional. Es decir, al aumentar la concentración de este, se ve un aumento de la velocidad de degradación del contaminante. [28].

**pH de medio.** Las propiedades superficiales del catalizador y la carga superficial de las partículas se ven afectadas por el pH. Esto influye en el tamaño de los compuestos a degradar. El punto de carga cero o también llamado punto isoelectrico (pH pzc) es el valor de pH en el que la superficie de un óxido metálico

tiene carga neutra. En el caso del  $\text{TiO}_2$ , el valor del punto isoeléctrico está en un rango entre 5,6 y 6,8. De modo que cuando el pH este por debajo del punto de carga cero, estará cargada negativamente la superficie del  $\text{TiO}_2$ . Finalmente, estos estados afectarán la adsorción y desorción de los reactantes e intermedios de reacción y por consecuencia a la eficiencia fotocatalítica [28].

**Temperatura.** Gracias al mecanismo fotónico, los procesos fotocatalíticos no necesitan temperaturas elevadas. Estos tienen la facilidad de poder trabajarse a temperatura ambiente. Esto resulta siendo una ventaja económica, al no necesitar un aporte energético adicional para poder funcionar. El caso de realizar el proceso con temperaturas mayores a los  $80^\circ\text{C}$ , resulta siendo negativo para la fotólisis, ya que promueve la recombinación de cargas, desfavoreciendo la adsorción de moléculas orgánicas en la superficie del  $\text{TiO}_2$ . Por otro lado, el trabajar con temperaturas menores o iguales a  $0^\circ\text{C}$  genera la desorción de los distintos productos intermedios y finales de reacción. Por lo tanto, es recomendable operar el proceso fotocatalítico en el rango de 20 a  $80^\circ\text{C}$  [28].

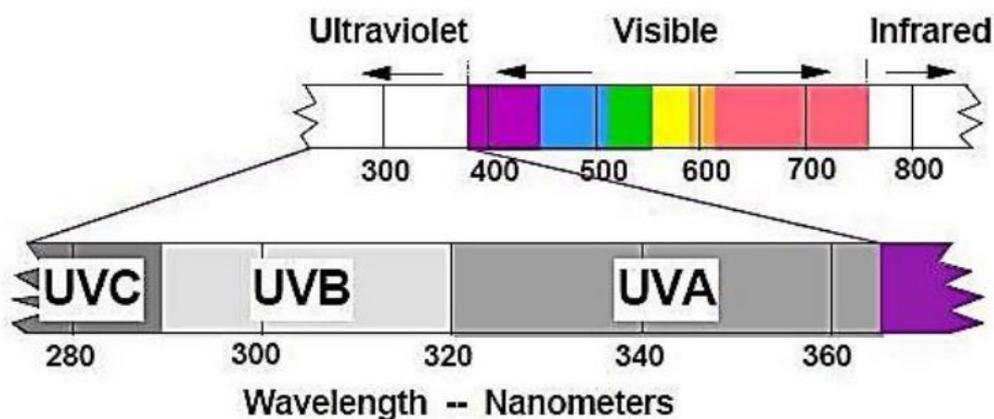
El D.S. N°031-2010-SA, Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano, establece un conjunto de instrucciones enfocadas a la gestión del agua para consumo humano, con la finalidad de que ésta, no cause daño a la población. Para esto, el reglamento considera prevenir factores de riesgos sanitarios. En este documento figuran los límites máximos permisibles para parámetros químicos inorgánicos y orgánicos, descripción que abarca los LMP para el arsénico [29].

### **2.2.7. Índice de radiación ultravioleta (IUV)**

La radiación solar cubre todo el espectro electromagnético, aunque la mayor parte de la energía que llega a la superficie terrestre se concentra en el rango de 380-800 nm. Esta estrecha banda del espectro que se muestra en la Figura 4 se denomina región visible. Las radiaciones entre 200 - 800 nm, es decir, el rango ultravioleta (UVC, UVB, UVA) y el rango visible; interactúan con los electrones en una molécula y estas reacciones son las más importantes desde un punto de vista ecológico [30].

**Figura 4**

*Espectro electromagnético de la luz solar.*



Fuente: Ortiz, (2016).

Los niveles más altos de radiación UV solar se alcanzan cerca al mediodía. Cabe mencionar que, si los valores de este indicador se encuentran muy elevados, existe una gran posibilidad de que se generen lesiones en la piel y en los ojos [31]. La intensidad de radiación UV solar se mide mediante índices, estos están clasificados en una escala del 1 al 11+, así como se muestra en la Figura 5 [32].

**Figura 5**

*Categoría de exposición a la radiación ultravioleta.*

CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN	INTERVALO DE VALORES DEL IUUV
<b>BAJA</b>	<b>&lt; 2</b>
<b>MODERADA</b>	<b>3 A 5</b>
<b>ALTA</b>	<b>6 A 7</b>
<b>MUY ALTA</b>	<b>8 A 10</b>
<b>EXTREMADAMENTE ALTA</b>	<b>11+</b>

Tabla 1: Categorías de exposición a la radiación UV

Fuente: Organización Mundial de la Salud, (2018).

## **2.3 Marco conceptual**

### **2.3.1. Remoción de arsénico en el agua**

Para comprender el proceso de remoción hay que tener en cuenta que cada contaminante y reactivos a usar trabajan en rangos específicos de los cuales se tiene que tener control, para tener un máximo rendimiento. En el caso del arsénico se conoce que predominan entre sus formas: Arsenito, con valencia 3, también se denomina trivalente arsénico (As (III),  $As^{+3}$ ) Arseniato, con valencia 5, también se denomina pentavalente arsénico (As (V),  $As^{+5}$ ). El arsenito es una forma muy difícil de remover, para ello es necesario oxidarlo a su forma pentavalente y posteriormente mediante adsorción es fácilmente removerlo del agua en forma de precipitado. Este proceso se lleva a cabo eficientemente en un pH neutro, el cual se puede ajustar agregando ácidos o bases dentro de un proceso de remoción.

Otra particularidad dentro del proceso de remoción del arsénico es la afinidad que posee con las sales de hierro, como el  $FeCl_3$ , el cual actúa como coagulante y permite precipitar al arsénico oxidado. Esta sal de hierro puede trabajar a distintos pH, pero es más estable cuando el pH es neutro.

### **2.3.2. Tecnologías en tratamiento de aguas**

En la actualidad, la remoción de arsénico se logra a través de una combinación adecuada de procesos, como es la coagulación, floculación, sedimentación, filtración, etc. Sin embargo, en ocasiones es necesario recurrir a métodos más complejos para una mejor remoción [33]. Es ahí donde se presenta un creciente interés por las tecnologías avanzadas de oxidación, pues estas tienen una gran capacidad para oxidar diversos contaminantes, hasta su mineralización si el tratamiento es prolongado o hasta una oxidación intermedia, la cual permite combinarlo con algún método de depuración. Entre estas tecnologías tenemos la fotocatalisis heterogénea que se caracteriza por utilizar un material sólido como fotocatalizador. Por ejemplo, el  $TiO_2$ , que es el semiconductor más empleado en este tipo de tratamientos, este al ser expuesto a una fuente de luz genera especies reactivas que dan lugar a reacciones de óxido reducción.

La fotocatalisis heterogénea aplicada para remover arsénico transforma el As(III) a As(V), que es menos tóxico y más fácil de eliminar del agua.

En la presente investigación se realizará la remoción de arsénico del agua potable mediante fotocatalisis heterogénea utilizando una fuente natural como es la luz solar y un catalizador que tiene gran estabilidad frente a la corrosión fotoquímica y química, además de no ser tóxico como es el caso del TiO<sub>2</sub>.

#### **2.4. Definición de términos básicos**

**Remoción:** La descontaminación es un proceso de tratamiento por el que se hace pasar el agua para remover o eliminar cualquier tipo de contaminante presente y así poder ser reutilizada.

**Agua potable:** se denomina agua potable a aquella que puede beberse sin restricciones porque, gracias a su calidad, no supone ningún riesgo para la salud ya que cumple los estándares de calidad emitidos por las autoridades locales e internacionales.

**Fotocatalisis:** la fotocatalisis es una reacción fotoquímica que convierte la energía solar en energía química mediante un compuesto químico usado como catalizador semiconductor que acelera la reacción. En el curso de este proceso se producen tanto reacciones de oxidación como de reducción, donde se eliminan contaminantes orgánicos e inorgánicos, virus y otras bacterias [35].

**Fotocatalisis heterogénea:** se basa en la formación de radicales hidroxilos mediante reacciones de oxidación-reducción que se producen en la superficie del fotocatalizador en presencia de un agente oxidante, como el oxígeno o peróxido de hidrógeno, debido al efecto de la luz UV [36].

**Banda de conducción:** lugar ocupado por los electrones libres que se han separado de sus átomos y pueden moverse libremente. Estos electrones son los encargados de conducir la corriente eléctrica [37].

**Banda prohibida (banda gap):** es la energía mínima para excitar un electrón desde su estado ligado a su estado libre y así pueda participar de la conducción

eléctrica [37].

**Banda de valencia:** es la última capa o nivel energético de los átomos ocupada por los electrones que forman enlaces, pero no participan de la conducción eléctrica [37].

**Semiconductor:** es un elemento que, bajo unas determinadas circunstancias, por ejemplo: campos magnéticos, la presión, la radiación solar o la temperatura, se comporta como un conductor o como un aislante [38].

### III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. Hipótesis (general y específicas)

##### ***Hipótesis general***

La aplicación de fotocátalisis heterogénea utilizando óxido de titanio como catalizador nos permitirá la remoción de arsénico en el agua potable.

##### ***Hipótesis específicas***

- a. El contenido de arsénico del agua potable a tratar mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador está fuera del LMP.
- b. Las condiciones de operación para la remoción de arsénico en el agua potable mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador determinarán un buen rendimiento del proceso.

##### **Definición conceptual de variables:**

Las variables fueron definidas como:  $Y=f(X)$

##### **Variable dependiente:**

$Y$ = Remoción de arsénico en el agua tratada (porcentaje %)

##### **Variables independientes:**

$X_1$ = contenido de arsénico (ppm)

$X_2$ = condiciones de operación: tiempo (minutos) y cantidad de catalizador (g/100 g de AC)

##### **Variables constantes:**

concentración de arsénico inicial : 0.1107 ppm

concentración de coagulante : 15 ppm

pH : 7

flujo de la bomba : 1.3 L/min

### 3.1.1. Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Método	Técnica
<b>Y= f(x) = Remoción de arsénico</b>	Serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes presentes en el agua. [39].	Porcentaje de remoción de arsénico del agua potable con valores fuera de los LMP.	Remoción	% de remoción	Cálculo	$E = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100$
<b>X<sub>1</sub> = Contenido de arsénico</b>	Cantidad de metal altamente tóxico que contamina el agua [40].	Cantidad de arsénico presente en el agua potable.	Concentración	0.1107 ppm	Observacional	Medición directa
<b>X<sub>2</sub> = Condiciones de operación</b>	Parámetros extrínsecos que afectan la eficiencia fotocatalítica [41].	Valores de los parámetros que serán utilizados en el proceso para remover el arsénico hasta el LMP.	Tiempo	t <sub>1</sub> = 45 min t <sub>2</sub> = 90 min t <sub>3</sub> = 135 min t <sub>4</sub> = 180 min	Instrumental	Cronometría
				Cantidad de catalizador/100 g de AC	c <sub>1</sub> = 1g c <sub>2</sub> = 2.5g c <sub>3</sub> = 5g	Observacional

## IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

### 4.1 Diseño metodológico

La presente investigación es de tipo aplicada porque utiliza conocimientos enfocados en su aplicación a la solución de un problema [42]. Por su enfoque es cuantitativo ya que la recolección de datos se realizó a través de procedimientos fundamentados en la medición. Por su nivel es explicativo porque presenta una relación de causa efecto entre las variables. Por su diseño es experimental puesto que se utilizó un tratamiento para observar el efecto que produce en la variable dependiente [43].

En la tabla 2 se muestra el diseño experimental que se realizó con 12 tratamientos (2 factores, 4 niveles para el tiempo de remoción y 3 para la dosis del catalizador), realizados por duplicado, haciendo un total de 24 corridas experimentales.

**Tabla 2**

*Matriz de experimentos*

Experiencias	Tiempo de remoción (min)	Dosis del catalizador (gTiO <sub>2</sub> /100g AC)	%Remoción
1	45	1.0	Y
2	45	2.5	Y
3	45	5.0	Y
4	90	1.0	Y
5	90	2.5	Y
6	90	5.0	Y
7	135	1.0	Y
8	135	2.5	Y
9	135	5.0	Y
10	180	1.0	Y
11	180	2.5	Y
12	180	5.0	Y

## **4.2. Método de investigación**

La presente investigación se desarrolla en 5 etapas:

### **4.2.1. Equipo experimental**

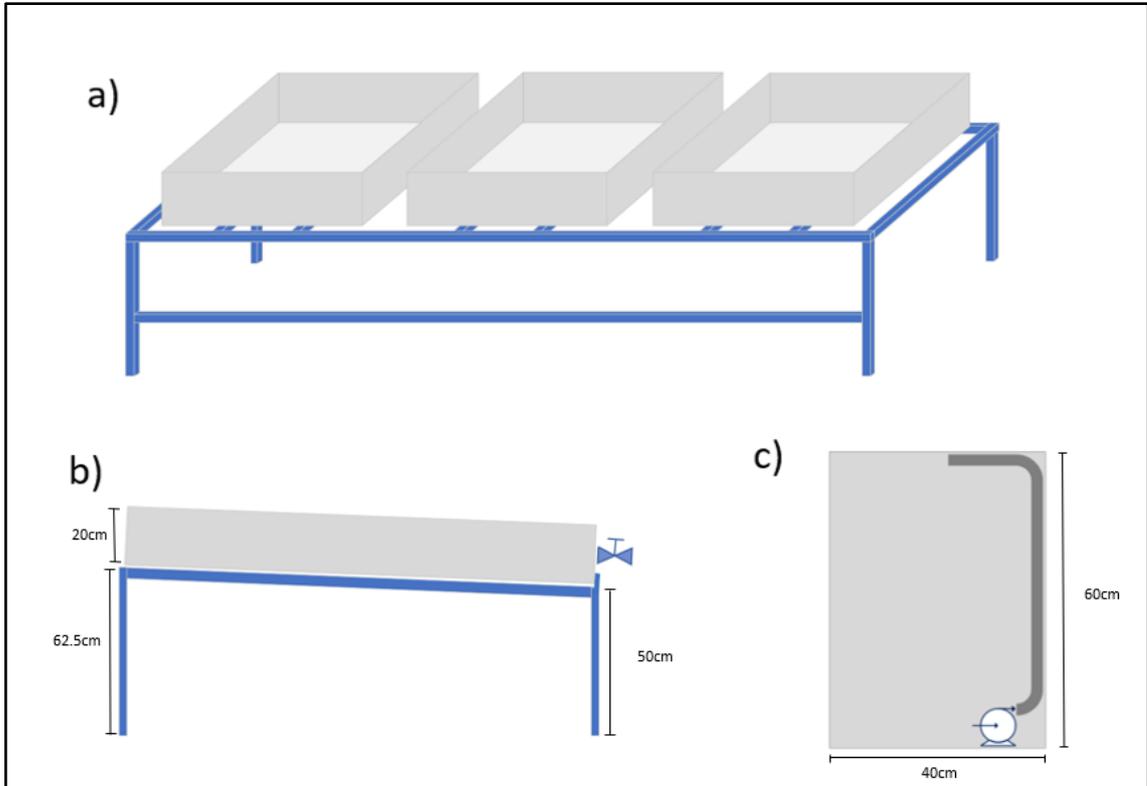
El sistema de tratamiento consistió de un equipo experimental de 3 recipientes en paralelo colocados en un soporte metálico diseñado de acuerdo a la medida de los recipientes. Cada recipiente tuvo las siguientes medidas: 60cm largo x 40 cm ancho x 20 cm de altura. El material de los recipientes fue de plástico y se acondicionaron unas válvulas de salida que sirvieron para recoger muestras durante el tratamiento de aguas.

Dentro de cada recipiente se colocaron y fijaron una bomba sumergible de 5V con flujo de 1.3 L/min, mediante cintillos de plástico. Se conectaron a la corriente eléctrica utilizando cargadores de celulares. A cada bomba se le colocó 60 cm de manguera siliconada de 5 mm de diámetro que sirvió para recircular el agua desde la parte más baja del recipiente hasta la parte alta, para que la inclinación ayude con el movimiento del agua tratada. Se sumergieron las bombas de tal forma que no levanten el carbón activado ni el precipitado que se fue formando durante el tratamiento.

El soporte fue de tubo cuadrado de fierro de ½ pulgada, con una altura de 50 cm en la parte delantera y 62.5 cm aproximadamente en la parte trasera, esto es debido a que el equipo experimental tuvo cierta inclinación para recibir la mayor cantidad de radiación solar. El ángulo que se consideró fue de 12° debido a que se consideró el valor absoluto de la latitud del lugar donde se realizó el experimento (Latitud: -11.997298504405778). El dato de latitud fue obtenido utilizando Google Maps para tener un dato más preciso. Todos estos detalles se graficaron en la figura 6.

**Figura 6**

*Equipo experimental*



*Nota:* a) Vista frontal, b) vista lateral y c) vista desde arriba de la estructura del equipo experimental.

#### **4.2.2. Impregnación del catalizador $TiO_2$ en carbón activado**

El método utilizado para impregnar el carbón activado fue la impregnación directa.

Se agregó dióxido de titanio en un vaso de precipitado y se añadió agua destilada para formar una suspensión. Se realizó bajo agitación en la plancha de agitación magnética. El volumen de agua añadido fue de 5 mL/g carbón activado.

Luego de 10 minutos de agitación se añadió el carbón activado. Se prepararon 3 compósitos, en los que se varió la cantidad de dióxido de titanio agregado para la impregnación, cuyos valores fueron de 25 g, 62.5 g y 125 g  $TiO_2$ /2.5 kg carbón activado como se aprecia en la figura 7.

## Figura 7

### *Mezcla del dióxido de titanio y carbón activado*



La mezcla en agitación constante se calentó hasta que se evaporó el agua y se obtuvo únicamente la fase sólida. La agitación se detuvo cuando aproximadamente la tercera parte del volumen de agua se evaporó como se observa en la figura 8.

## Figura 8

### *Evaporación del agua en impregnación directa*



La fase sólida que queda en el vaso se sometió a calcinación en la mufla, a una temperatura de 400 °C por una hora, se retiró y se dejó enfriar. Posterior a ello se lavó el compósito para remover el exceso de dióxido de titanio que no quedó impregnado y finalmente se secó en la estufa. El carbón secado se dejó en las bandejas para que se enfríen y se revise que el impregnado haya sido uniforme, así como se muestra en la figura 9.

### **Figura 9**

*Muestra de  $TiO_2$  impregnado en carbón activado.*



#### **4.2.3. Preparación de la muestra de agua con arsénico**

La muestra de agua a tratar se simuló preparando trióxido de arsénico ( $As_2O_3$ ) en agua destilada. Se utilizó la concentración máxima de arsénico encontrada en agua potable en el Perú. Para ello se dispuso de información sobre niveles de arsénico en agua potable y se seleccionó el de mayor valor en octubre del 2019. La concentración fija fue de 0.1107 mg/L.

Se hizo el cálculo para obtener la cantidad de  $As_2O_3$  a la concentración indicada.

Por cada litro de agua sintetizada, se necesitó 0.2905 mg de  $\text{As}_2\text{O}_3$ , y para nuestras corridas se prepararon 100 litros. Se utilizó un tacho de plástico de 150 L para diluir el  $\text{As}_2\text{O}_3$  y posteriormente se guardaron en galoneras de 20 L para su posterior uso.

#### **4.2.4. Corridas experimentales**

El carbón impregnado con catalizador se cargó en los recipientes del equipo experimental. Cada recipiente utilizó 2.5 Kg de carbón activado. El carbón activado impregnado se acomodó para formar una capa homogénea.

Se procedió a llenar los recipientes con el agua sintética de  $\text{As}_2\text{O}_3$  de las galoneras. Se hizo el llenado lentamente usando un vaso de precipitado de 1L, para que cada recipiente trabaje con 12 L.

Se conecta las bombas a la corriente eléctrica para hacer circular el agua y tenga el mayor contacto posible con el  $\text{TiO}_2$  impregnado en el carbón activado.

Se anotó la hora de inicio y el día para posteriormente buscar en la página web de SENAMHI los índices de radiación UV del día. Se extrajo una toma de muestra de aproximadamente 100 ml a los 45, 90, 135 y 180 minutos para cada recipiente. Estas alícuotas fueron extraídas por la válvula de salida que tiene incorporado cada recipiente, y colocadas en envases de plástico herméticos como se muestran en la figura 10 y 11.

**Figura 10**

*Toma de muestra de agua tratada*



**Figura 11**

*Muestras de agua tratada*



*Nota:* cada envase contiene 100 ml tomados a partir de cada recipiente en distintos tiempos, según nuestro diseño experimental.

#### **4.2.5. Caracterización del agua tratada**

Las muestras de agua tratada fueron caracterizadas mediante el Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer Modelo Pinnacle 500. Este equipo puede medir la concentración tanto de As(III), As(V) y arsénico total, y en el caso del hierro, puede medir hierro total.

Para saber el porcentaje de remoción durante el tratamiento fotocatalítico se analizaron las muestras de 100 ml para obtener la concentración de arsénico total y de hierro total de cada una. Para ello se filtraron las alícuotas mediante papel filtro cuantitativo Whatman de grado 40 sin cenizas el cual permite retener las partículas de  $\text{FeAsO}_4$  que tienen un diámetro de partícula de medida 50-60  $\mu\text{m}$ , que pueden ser filtrados fácilmente [44]. La alícuota filtrada se llevó a medición de arsénico y hierro total en el espectrofotómetro.

En la figura 12 se muestra el proceso de filtrado del agua tratada y el papel filtro usado.

#### **Figura 12**

*Separación del precipitado mediante filtración.*



*Nota:* a la izquierda, filtrado de agua tratada con papel filtro cuantitativo Whatman de grado 40, a la derecha, papel filtro con ligera presencia de precipitado.

### **4.3. Población y muestra**

En esta investigación no se aplica la definición de población.

La muestra consistió en 100 litros de agua sintetizada (contaminada con arsénico III mediante trióxido de arsénico) que se trataron en el equipo experimental, las cuales tuvieron una concentración inicial de 0.1107 mg/L.

### **4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado**

El presente trabajo de investigación se desarrolló en las instalaciones de la empresa AURICA SAC. por un periodo de 2 semanas. (Ver ANEXO 3).

### **4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información**

#### ***4.5.1. Caracterización de las muestras de agua tratada***

**Espectrofotometría de absorción atómica con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-MS).** La técnica de ICP utiliza el plasma para atomizar, ionizar y excitar todas las formas del arsénico que son enviadas hacia el plasma para su detección. El sistema que acopla HPLC e ICP-MS proporciona un método muy apropiado para especies no-volátiles de elementos dentro de los cuales se incluye el arsénico. El modelo del equipo utilizado es el Perkin Elmer Modelo Pinnacle 500, el cual puede medir la concentración tanto de As(III), As(V) y arsénico total, y en el caso del hierro, puede medir hierro total.

#### ***4.5.2. Cantidad de radiación ultravioleta (UV)***

Se recurrió a la información dada por SENAMHI sobre el índice de radiación ultravioleta y las horas de mayor intensidad. Para ello se anotó la hora y el día que se llevó a cabo las corridas experimentales.

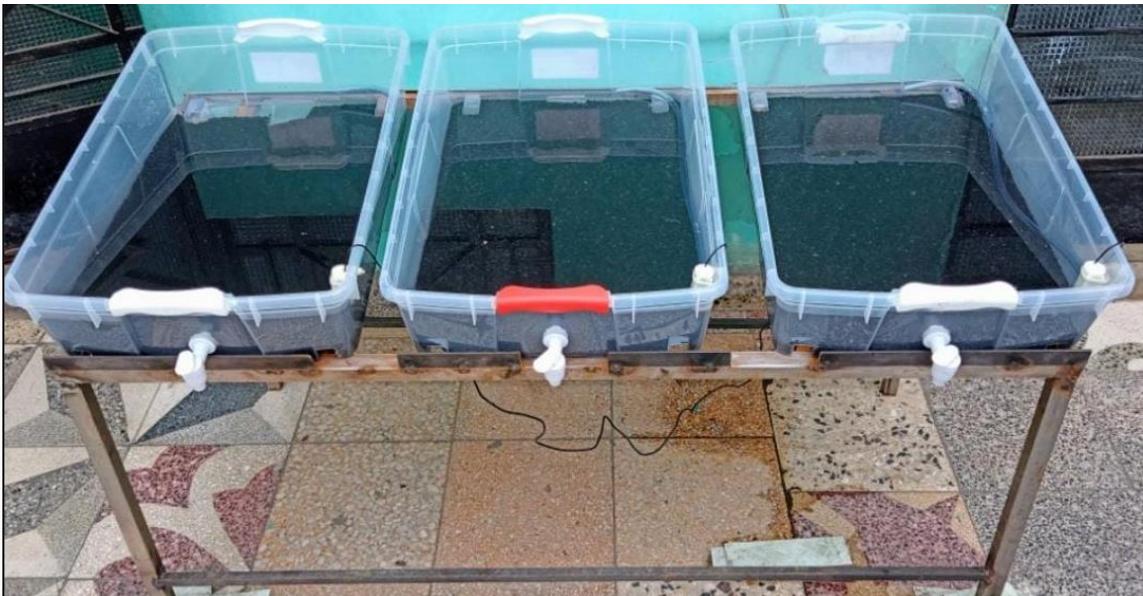
### **4.5.3. Equipos y materiales**

#### **Equipos**

Se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer Modelo Pinnacle 500, un agitador magnético, cronómetro, una estufa, una mufla, una balanza, una plancha calefactora y un equipo experimental que se construyó para la investigación, tal como se muestra en la figura 13.

#### **Figura 13**

*Equipo experimental*



En la figura 14 se observa el equipo que se utilizó para las medidas de As y Fe, calibrado y funcionando correctamente.

**Figura 14**

*Espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer Modelo Pinacle 500*



### **Materiales**

Fiola 100 ml, vasos de precipitados 1 L, recolectores estériles para análisis 100 ml, baguetas, embudos, papel filtro, piseta, luna de reloj, crisoles, bandejas esmaltadas, manguera siliconada.

### **Reactivos**

Los reactivos utilizados para este experimento fueron:  $\text{TiO}_2$  como catalizador,  $\text{FeCl}_3$  como coagulante,  $\text{As}_2\text{O}_3$  para sintetizar el agua con contenido de arsénico y carbón activado donde se fija el catalizador.

### **4.6. Análisis y procesamiento de datos**

Para el análisis y procesamiento de datos se hizo uso de la estadística descriptiva e inferencial. El software utilizado fue el Minitab de la versión 19 así como también Microsoft Excel 2019 (tabla 4, pág. 42)

#### **4.7. Aspectos éticos en investigación**

Los métodos y técnicas utilizados en esta investigación se basan en antecedentes teóricos, la parte experimental fue desarrollada por los dos tesisistas y para la veracidad de los resultados obtenidos se utilizaron equipos certificados y calibrados.

## V. RESULTADOS

### 5.1. Resultados descriptivos

En la tabla 3 se muestran las características del agua sintetizada con  $\text{As}_2\text{O}_3$  usada en nuestro experimento. La concentración inicial del agua sintetizada será constante e igual para todas las corridas experimentales. El pH se mantuvo entre 7 y 7.5.

**Tabla 3**

*Características del agua sintetizada*

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Concentración inicial	0.11 ppm
pH	7

Las corridas experimentales se realizaron en presencia de luz solar, tomando muestras de 100 ml cada 45 minutos para tener seguimiento de la concentración de arsénico y del porcentaje de remoción. De acuerdo al diseño experimental, se obtuvieron 12 tratamientos a diferentes dosis de catalizador (1, 2.5 y 5 g  $\text{TiO}_2$ /100g carbón activado) impregnado y en tiempos de 45 minutos. Se hicieron tratamientos por duplicado, haciendo un total de 24 tratamientos.

En la tabla 4 se muestra la concentración del arsénico durante en tratamiento fotocatalítico y el porcentaje de remoción durante el tiempo de remoción, tanto de la primera corrida como de la segunda corrida, y el promedio del porcentaje de remoción.

**Tabla 4**

*Porcentaje de remoción de arsénico de acuerdo al diseño experimental*

N°	Tiempo de remoción (min)	Dosis del catalizador (gTiO <sub>2</sub> /100g AC)	Porcentaje de Remoción		
			1ra corrida	2da corrida	Promedio
1	45	1.0	37.49	33.97	35.75
2	45	2.5	52.27	50.50	51.54
3	45	5.0	59.17	49.95	54.56
4	90	1.0	64.59	65.40	65.00
5	90	2.5	70.10	73.17	71.59
6	90	5.0	81.84	76.69	79.27
7	135	1.0	79.58	79.13	79.36
8	135	2.5	87.71	84.28	86.00
9	135	5.0	89.25	85.55	87.40
10	180	1.0	86.09	87.44	86.77
11	180	2.5	91.96	91.51	91.73
12	180	5.0	95.03	94.49	94.76

### 5.1.1. Porcentaje de remoción de arsénico

Los resultados de la primera corrida se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5**

*Resultados de la primera corrida*

Tiempo (min)	1gTiO <sub>2</sub> /100gAC		2.5gTiO <sub>2</sub> /100gAC		5gTiO <sub>2</sub> /100gAC	
	[ ]As	% remoción	[ ]As	% remoción	[ ]As	% remoción
0	0.1100	0	0.1100	0	0.1100	0
45	0.0692	37.09	0.0525	52.27	0.0452	58.91
90	0.0392	64.36	0.0332	69.82	0.0201	81.73
135	0.0226	79.45	0.0136	87.64	0.0139	87.36
180	0.0154	86.00	0.0089	91.91	0.0055	95.00

Los resultados de la segunda corrida se muestran en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Resultados de la segunda corrida*

Tiempo (min)	1gTiO <sub>2</sub> /100Gac		2.5gTiO <sub>2</sub> /100gAC		5gTiO <sub>2</sub> /100gAC	
	[ ]As	% remoción	[ ]As	% remoción	[ ]As	% remoción
0	0.1100	0	0.1100	0	0.1100	0
45	0.0731	33.55	0.0548	50.18	0.0554	49.64
90	0.0383	65.18	0.0227	79.36	0.0258	76.55
135	0.0231	79.00	0.0174	84.18	0.0160	85.45
180	0.0139	87.36	0.0094	91.45	0.0061	94.45

Para poder hacer una comparación del porcentaje de remoción obtenido entre las dos corridas, ordenamos la tabla 4 con respecto a la dosis de catalizador, estos promedios se muestran a continuación en la tabla 7.

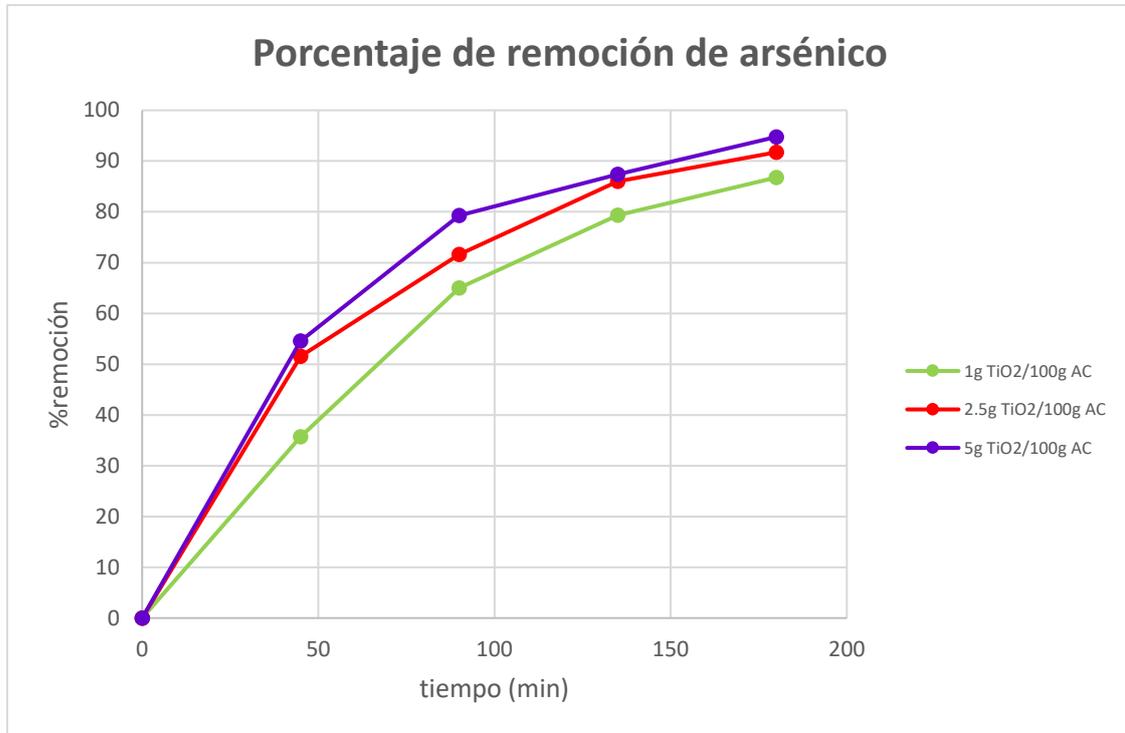
**Tabla 7***Promedio de porcentaje de remoción de arsénico*

Dosis	Tiempo (min)	% Remoción		
		1ra corrida	2da corrida	Promedio
(1g TiO <sub>2</sub> /100g AC)	0	0.00	0.00	0.00
	45	37.49	33.97	35.73
	90	64.59	65.40	65.00
	135	79.58	79.13	79.36
	180	86.09	87.44	86.77
(2.5g TiO <sub>2</sub> /100g AC)	0	0.00	0.00	0.00
	45	52.57	50.50	51.54
	90	70.01	73.17	71.59
	135	87.71	84.28	86.00
	180	91.96	91.51	91.73
(5g TiO <sub>2</sub> /100g AC)	0	0.00	0.00	0.00
	45	59.17	49.95	54.56
	90	81.84	76.69	79.27
	135	89.25	85.55	87.40
	180	95.03	94.49	94.76

Mediante una gráfica pudimos observar las diferencias entre los porcentajes de remoción a diferentes dosis, tal como lo muestra la figura 15.

**Figura 15**

*Porcentaje promedio de remoción a distintas dosis*



Los porcentajes de remoción en las tres distintas dosis presentan la misma tendencia, sin embargo, se puede apreciar en la figura 12 que el porcentaje de remoción de dosis de 1g TiO<sub>2</sub>/100g AC comparado con el porcentaje de remoción de dosis de 2.5g TiO<sub>2</sub>/100g AC difieren por casi 5%. Esta diferencia es importante puesto que con la menor dosis en comparación no se llega al LMP que exige el DS N° 031-2010-SA. Los porcentajes de remoción para las dosis de 2.5 y 5g TiO<sub>2</sub>/100g AC están por encima del 90%, los cuales si permiten llegar al LMP que indica la normativa indicada.

### **5.1.2. Adsorción de arsénico mediante FeCl<sub>3</sub>**

El As(III) es difícil removerlo por sí solo, para ellos se oxidó a As(V) mediante la fotocatalisis y se removió usando FeCl<sub>3</sub> como coagulante. Las cantidades utilizadas para la primera y segunda corrida se muestran en las tablas 8 y 9, respectivamente.

**Tabla 8***Consumo de coagulante en la primera corrida*

<b>Tiempo (min)</b>	<b>1gTiO<sub>2</sub>/100gAC</b>		<b>2.5gTiO<sub>2</sub>/100gAC</b>		<b>5gTiO<sub>2</sub>/100gAC</b>	
	[ ]As	[ ] FeCl <sub>3</sub>	[ ]As	[ ] FeCl <sub>3</sub>	[ ]As	[ ] FeCl <sub>3</sub>
<b>0</b>	0.1100	15.00	0.1100	15.00	0.1100	15.00
<b>45</b>	0.0731	11.93	0.0548	10.95	0.0554	11.11
<b>90</b>	0.0383	8.52	0.0227	7.30	0.0258	7.65
<b>135</b>	0.0231	5.21	0.0174	4.98	0.0160	4.13
<b>180</b>	0.0139	4.36	0.0094	2.87	0.0061	2.71

**Tabla 9***Consumo de coagulante en la segunda corrida*

<b>Tiempo (min)</b>	<b>1gTiO<sub>2</sub>/100gAC</b>		<b>2.5gTiO<sub>2</sub>/100gAC</b>		<b>5gTiO<sub>2</sub>/100gAC</b>	
	[ ]As	[ ] FeCl <sub>3</sub>	[ ]As	[ ] FeCl <sub>3</sub>	[ ]As	[ ] FeCl <sub>3</sub>
<b>0</b>	0.1100	15.00	0.1100	15.00	0.1100	15.00
<b>45</b>	0.0731	12.74	0.0548	11.53	0.0554	10.99
<b>90</b>	0.0383	9.26	0.0227	8.71	0.0258	6.81
<b>135</b>	0.0231	5.24	0.0174	4.06	0.0160	4.11
<b>180</b>	0.0139	3.95	0.0094	2.46	0.0061	1.99

Estos datos se ordenaron en la tabla 10 el cual muestra el gasto promedio en las dos corridas experimentales.

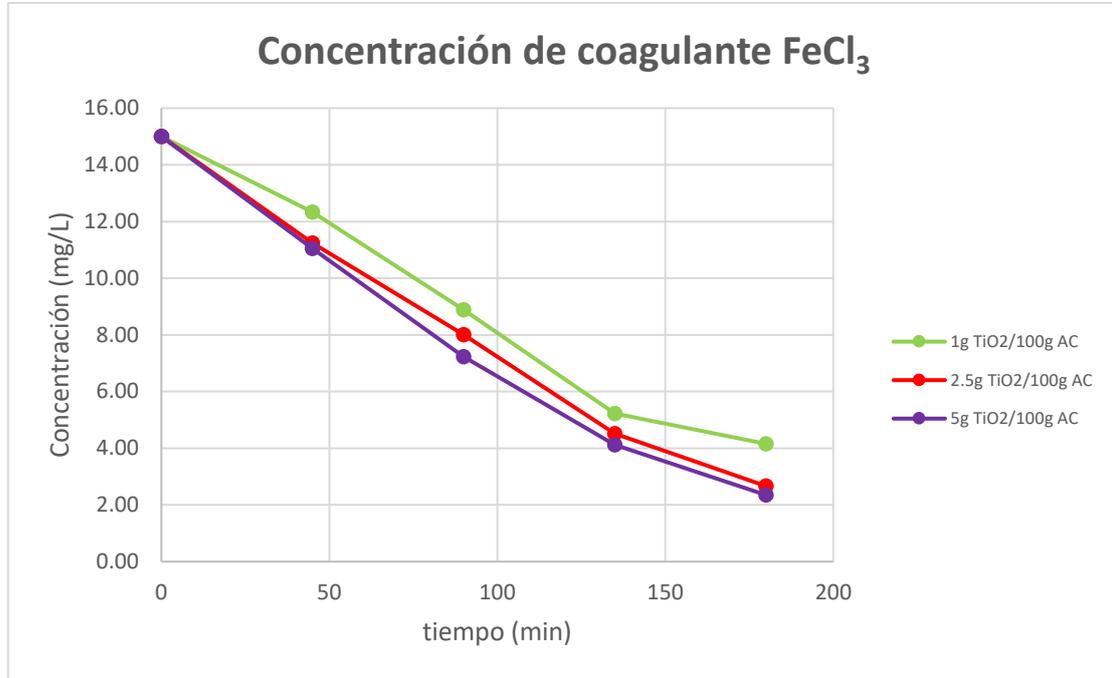
**Tabla 10***Promedio de gasto de coagulante  $FeCl_3$* 

Dosis	tiempo (min)	Concentración de coagulante		
		1ra corrida	2da corrida	promedio
(1g $TiO_2$ /100g AC)	0	15.00	15.00	15.00
	45	12.74	11.93	12.34
	90	9.26	8.52	8.89
	135	5.24	5.21	5.23
	180	3.95	4.36	4.16
(2.5g $TiO_2$ /100g AC)	0	15.00	15.00	15.00
	45	11.53	10.95	11.24
	90	8.71	7.30	8.01
	135	4.06	4.98	4.52
	180	2.46	2.87	2.67
(5g $TiO_2$ /100g AC)	0	15.00	15.00	15.00
	45	10.99	11.11	11.05
	90	6.81	7.65	7.23
	135	4.11	4.13	4.12
	180	1.99	2.71	2.35

La tabla 10 es representada en la gráfica que se observa en la figura 16. Se puede apreciar que el gasto del coagulante  $FeCl_3$  es mayor en el tratamiento de agua realizado con 5g  $TiO_2$ /100 AC debido a que hay mayor oxidación de As(III) a As(V), caso contrario que ocurre en el tratamiento de agua realizado con 1g  $TiO_2$ /100 AC, donde ocurre una menor oxidación, por ende, menor consumo de  $FeCl_3$  para la adsorción.

**Figura 16**

*Gasto de coagulante  $FeCl_3$  en la adsorción de  $As(V)$*



### **5.1.3. Índice de radiación UV**

Los días en que se realizaron las corridas experimentales fueron los días viernes 10 de marzo del 2023 y miércoles 15 de marzo del 2023, con índices promedio de radiación UV de 11.28 y 11.05, como lo indica la tabla 11.

**Tabla 11**

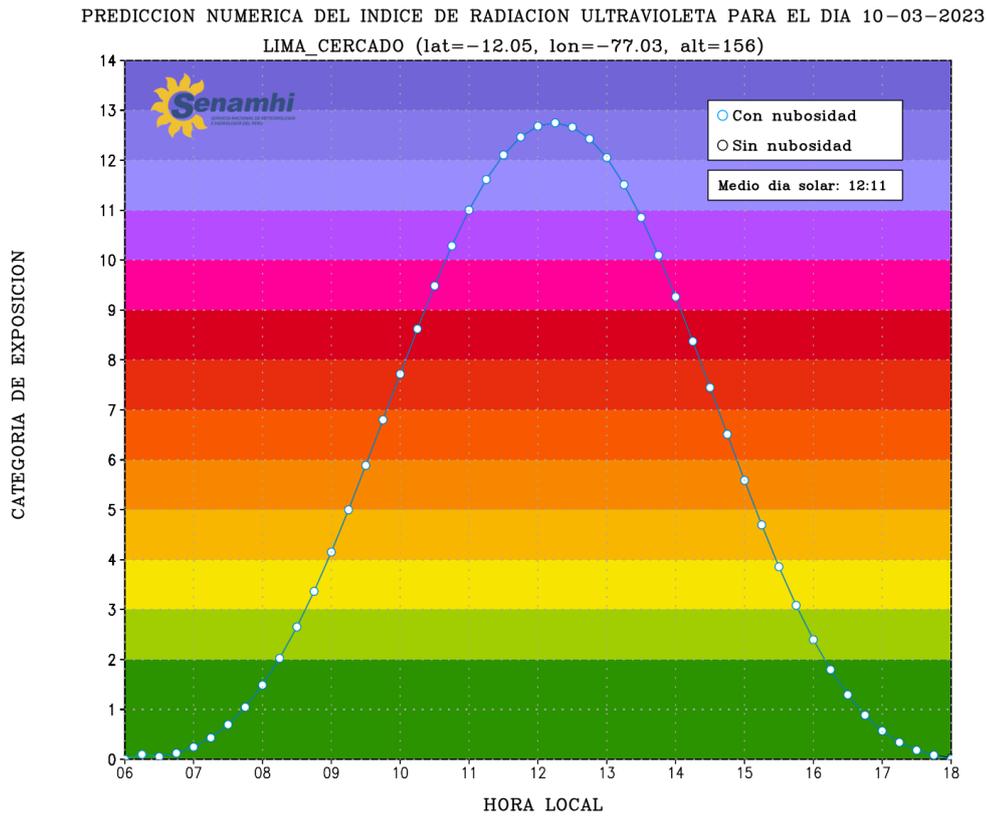
*Índice UV en las horas de tratamiento*

Hora	IUV	IUV
11:00	11	10.9
12:00	12.7	12.4
13:00	12.1	11.8
14:00	9.3	9.1
Promedio	11.28	11.05

Los datos de IUV fueron obtenidos de la página oficial de SENAMHI, las cuales se observan en las figuras 17 y 18.

### Figura 17

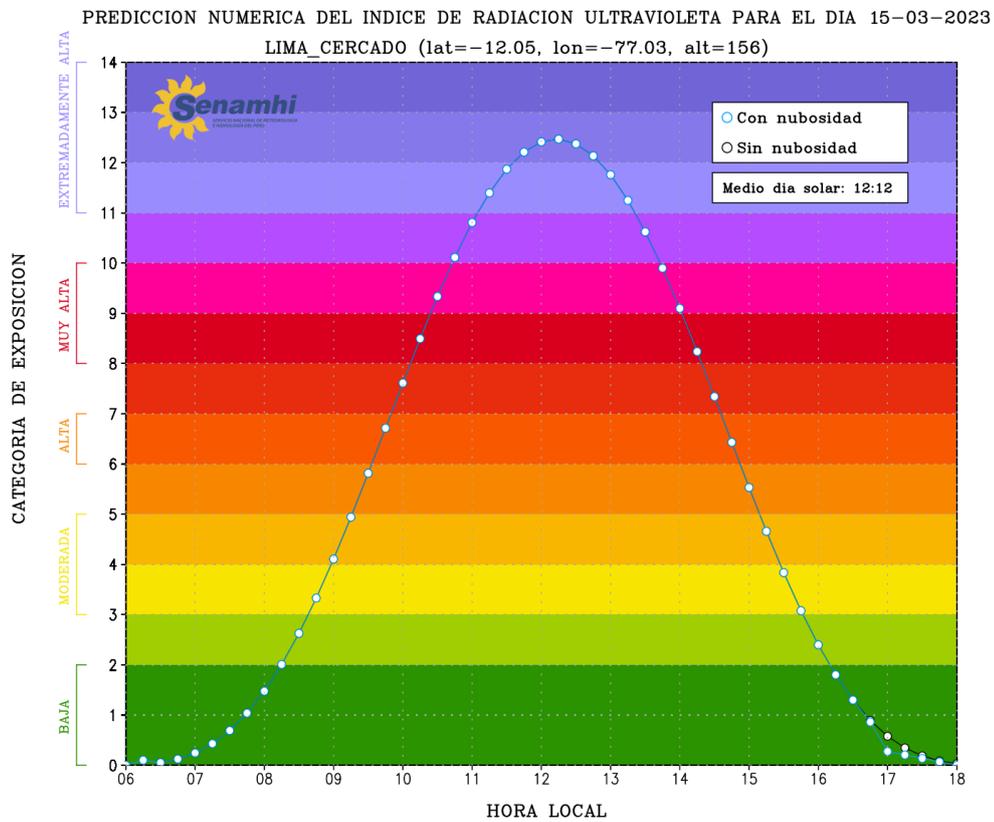
*Pronóstico de radiación UV para el 10-03-2023*



Fuente: SENAMHI, (2023).

**Figura 18**

*Pronóstico de radiación UV para el 15-03-2023*



Fuente: SENAMHI, (2023).

#### **5.1.4. Cinética de reacción de arsénico por fotocatalisis de $TiO_2$ y $FeCl_3$ como coagulante**

Para determinar la ley de velocidad es necesario que se determine el orden de la reacción. Estos ordenes por lo general son proporcionados por las gráficas de concentración contra el tiempo, de forma que concentración vs tiempo es para una reacción de orden cero;  $\ln(C)$  vs  $t$  para el primer orden y  $1/C$  vs  $t$  para la reacción de segundo orden. Las tablas 12, 13 y 14 muestran el análisis realizado según el coeficiente de correlación.

**Tabla 12**

Valores para la determinación del orden de la reacción para dosis de  $1\text{gTiO}_2/100\text{ AC}$

tiempo	[ ] As	ln (C)	1/C
0	0.1107	-2.200931439	9.033423668
45	0.0712	-2.642964954	14.05481377
90	0.0388	-3.250624523	25.80645161
135	0.0229	-3.778804162	43.76367615
180	0.0147	-4.223314944	68.25938567
correlación	-0.96298786	-0.998616692	0.968389344

**Tabla 13**

Valores para la determinación del orden de la reacción para dosis de  $2.5\text{gTiO}_2/100\text{ AC}$

Tiempo	[ ] As	ln (C)	1/C
0	0.1107	-2.20093144	9.03342367
45	0.0537	-2.92527381	18.639329
90	0.0315	-3.4593563	31.7965024
135	0.0155	-4.16691526	64.516129
180	0.0092	-4.6940014	109.289617
Correlación	-0.93020981	<b>-0.99860323</b>	0.95451293

**Tabla 14**

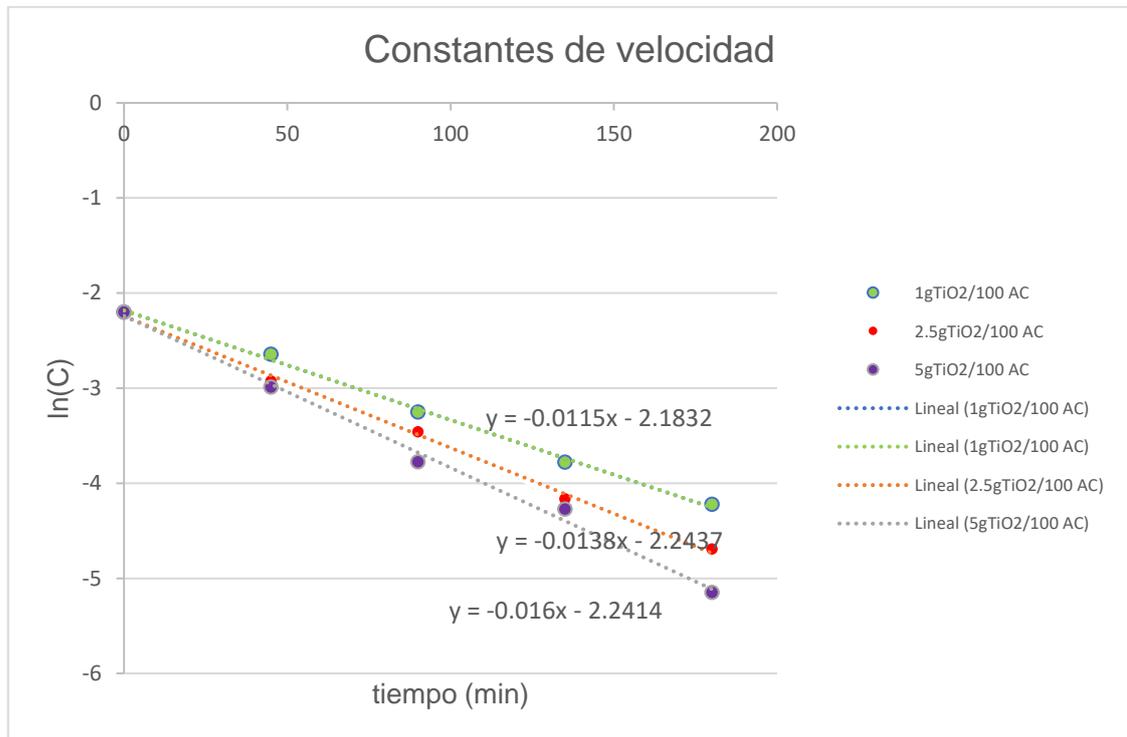
Valores para la determinación del orden de la reacción para dosis de  $5\text{gTiO}_2/100\text{ AC}$

Tiempo	[ ] As	ln (C)	1/C
0	0.1107	-2.20093144	9.03342367
45	0.0503	-2.9897502	19.8807157
90	0.02295	-3.77443734	43.5729847
135	0.01395	-4.27227577	71.6845878
180	0.0058	-5.14989736	172.413793
Correlación	-0.91475955	<b>-0.99725078</b>	0.9129232

Mediante el coeficiente de correlación, se obtiene un coeficiente negativo fuerte, el cual nos permite concluir que la reacción de oxidación de As(III) a As(V) es de orden uno, en los tres tratamientos a diferentes dosis. Las constantes de velocidad se grafican en la figura 19.

**Figura 19**

Gráfica de  $\ln(C_0/C)$  en función del tiempo de reacción para dosis de 1, 2.5 y 5gTiO<sub>2</sub>/100 AC



En una reacción de orden uno el gráfico  $\ln[C]$  vs  $t$  tiene como pendiente a  $-K_c$ , mientras que la ordenada en el origen equivale a  $\ln[C]_0$ .

Entonces, de la gráfica de la figura 18 se obtienen las constantes de velocidad:

Para dosis 1gTiO<sub>2</sub>/100 AC :  $K_c = 1.9167 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

Para dosis 2.5gTiO<sub>2</sub>/100 AC :  $K_c = 2.33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

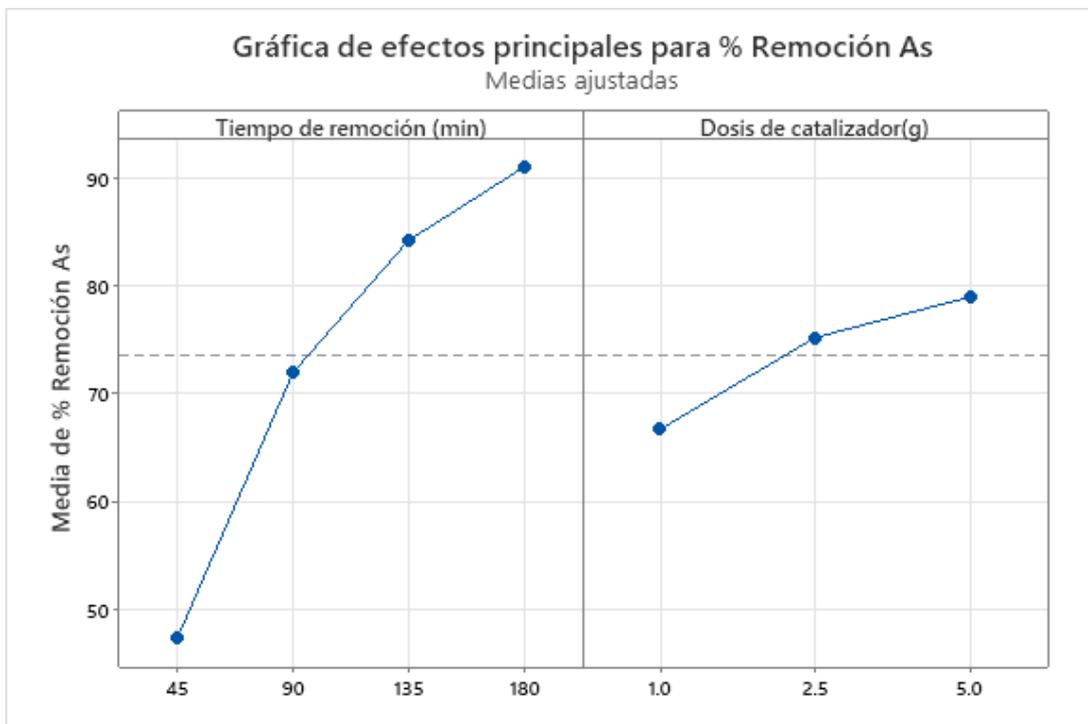
Para dosis 5gTiO<sub>2</sub>/100 AC :  $K_c = 2.67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

## 5.2. Resultados inferenciales

La figura 20 muestra el comportamiento de las variables independientes con relación al porcentaje de la remoción de As. Podemos observar que, a mayor tiempo, mayor será su porcentaje de remoción, y para la impregnación del catalizador, a mayor cantidad de dosis impregnada, aumenta el porcentaje de remoción.

**Figura 20.**

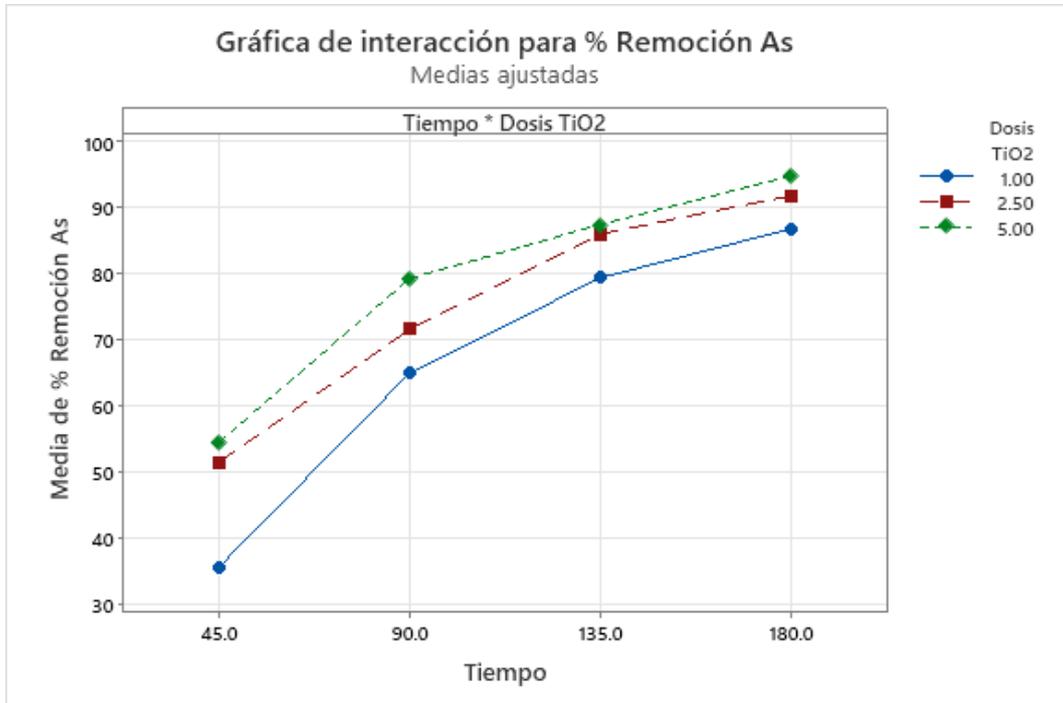
*Efectos de las variables en la remoción de As*



En la figura 21 se grafica la interacción de las condiciones de operación con respecto a la media de porcentaje de remoción. Se observa que las combinaciones de las condiciones de operación dan como resultado una curva con pendiente ascendente que indica que el porcentaje de remoción va aumentando a medida que se realizó el tratamiento.

**Figura 21.**

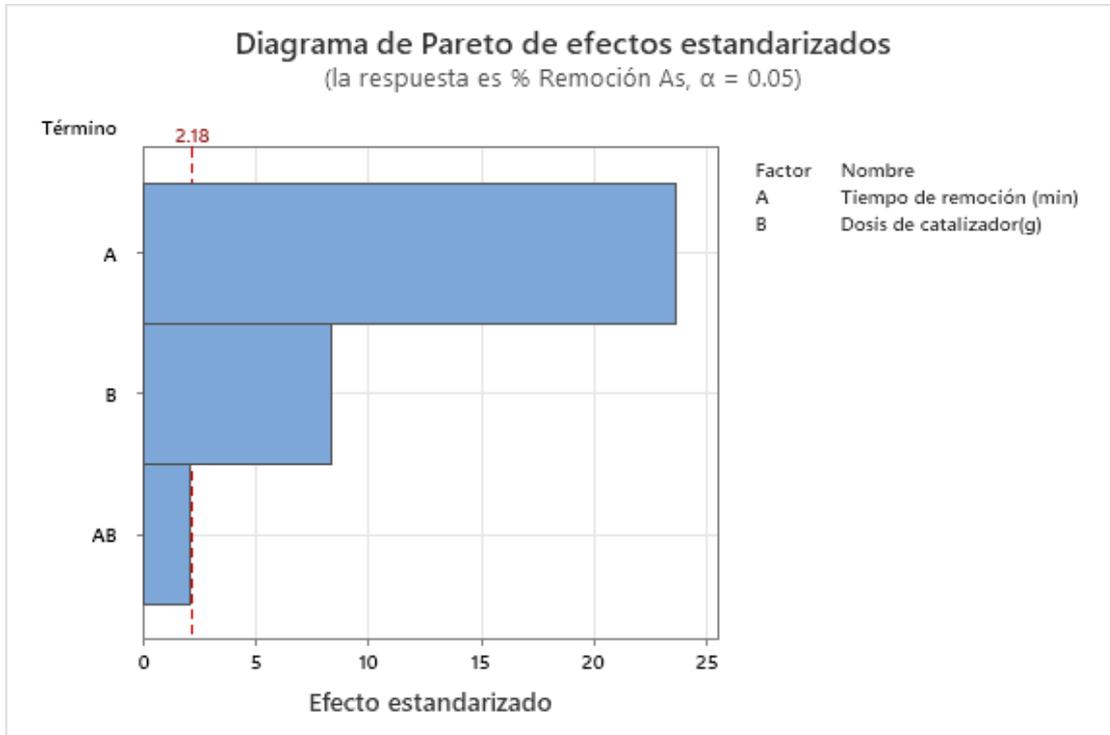
*Interacción de las condiciones de operación en la remoción*



La figura 22 se muestra un diagrama de Pareto en cual nos describe que el tiempo de tratamiento tiene una gran influencia en la remoción de As, al igual que la dosis de impregnación. Las dos condiciones de operación son de vital importancia para que se lleve a cabo la fotocatalisis heterogénea.

**Figura 22.**

*Diagrama de Pareto de las condiciones de operación*



### 5.3. Otro tipo de resultados estadísticos

Todos los resultados desarrollados en la presente investigación son mostrados en los ítems 5.1 y 5.2.

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.

Los resultados experimentales expuestos en la Tabla 4 fueron sometidos a un análisis estadístico con el objetivo de comprobar o rechazar la hipótesis planteada. Para esto, se realizó el análisis de varianza, tal como se muestra en la tabla 15.

**Tabla 15**

*Análisis de varianza (ANOVA) de remoción de arsénico*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	11	7442.13	676.56	97.32	0.000
Lineal	5	7323.30	1464.66	210.70	0.000
Tiempo de remoción (min)	3	6689.86	2229.95	320.79	0.000
Dosis de catalizador(g)	2	633.43	316.72	45.56	0.000
Interacciones de 2 términos	6	118.84	19.81	2.85	0.058
Tiempo de remoción (min)*Dosis de catalizador(g)	6	118.84	19.81	2.85	0.058
Error	12	83.42	6.95		
Total	23	7525.55			

Donde se puede observar que el valor p es menor que el nivel de significancia (0.05). Entonces, se puede afirmar que los factores: tiempo de remoción (min) y dosis del catalizador (g) son estadísticamente significativos.

Así mismo, también se tomó en cuenta el resumen del modelo utilizado. Tal cual figura en la Tabla 16.

**Tabla 16**

*Resumen del modelo utilizado para la remoción de arsénico*

<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado(ajustado)</b>	<b>R-cuadrado(pred)</b>
2.63658	98.89%	97.88%	95.57%

Donde se verifica que el valor de  $R^2$  es alto, lo que demuestra que el modelo describe adecuadamente el comportamiento de la remoción de arsénico.

Por esta razón, se rechaza la hipótesis nula y se afirma que la aplicación de fotocátalisis heterogénea utilizando óxido de titanio como catalizador nos permite la remoción de arsénico en el agua potable.

Así mismo se demuestra que el tiempo de remoción y la dosis del catalizador influyen en el proceso de fotocátalisis heterogénea, siendo el primero el de mayor importancia.

## **6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares.**

En la tabla 7 y figura 12 nos indica que el tratamiento por fotocátalisis heterogénea usando  $TiO_2$  como catalizador en diferentes dosis ha dado muy buenos resultados en la remoción de arsénico. En el artículo *“Fotocatálise heterogênea com  $TiO_2$  para oxidação de arsênio e sua remoção de águas por coprecipitação com sulfato férrico”* [10], el sistema de trabajo fue un reactor fotoquímico que contenía el catalizador inmovilizado en botellas PET y una lámpara de vapor de mercurio de 125 W para generar la radiación UV que el proceso necesita. Alcanzando así una remoción del 98% de arsénico, trabajando con una concentración inicial de 1.0 mg/L de As (III) y tiempo de tratamiento de 30 min. A diferencia respecto a estos autores, este experimento utilizó carbón activado, un material muy usado en tratamiento de agua y que puede reactivarse en caso se sature. Así mismo, se utilizó la luz solar por ser una fuente energética

limpia y sin costo. Logrando una remoción máxima promedio de 95.03% en un tiempo de 180 min.

Nuestro método de impregnación del fotocatalizador no requirió de otros reactivos químicos como en la investigación *“Desinfección y remoción de arsénico del agua por fotocatalisis heterogénea”* [11], el cual se usó ácido perclórico, ácido cítrico y acetato de sodio para preparar la superficie a impregnar. El autor obtuvo una remoción del 98%, bajo las siguientes condiciones: El catalizador  $\text{TiO}_2$  se trabajó con una concentración del 5%, fijado en botellas PET y tuberías de plástico, la concentración inicial del arsénico fue de 160  $\mu\text{g/L}$  y el tiempo de exposición fue de 180 min trabajando con luz solar. Cabe mencionar que el autor realizó la comparación entre la luz solar y la luz artificial con la finalidad de conocer quién tiene mayor potencia de efectividad. Para esto trabajo con luz ultravioleta de 15W. Concluyendo que para remover arsénico con luz artificial se requiere el doble de tiempo utilizando luz solar, lo que afirma nuestros resultados al haber utilizado de la misma manera la luz solar para el tratamiento.

Como se detalló en la tabla 3, se trabajó pH 7 (neutro) ya que a esa condición la adsorción de arsénico es mayor gracias al coagulante  $\text{FeCl}_3$  el cual logra atrapar con mucha eficiencia el arsénico oxidado. En la investigación titulada *“Fotocatalisis heterogénea como método de tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario Romerillos Del Cantón Mejía”* [12]. El autor evaluó la fotocatalisis heterogénea y el uso de óxido de titanio como catalizador y trabajando con un pH de 8.89, permitiéndole solamente llegar a una remoción del 87.126%.

Una de las ventajas de los procesos fotocatalíticos es la formación de radicales hidroxilos que permitan la oxidación de los contaminantes, en este caso el arsénico, y el  $\text{TiO}_2$  logró realizarlo sin ayuda de otro compuesto o tratamiento adicional, caso contrario de la investigación *“Tratamiento de aguas residuales de la Universidad Nacional del Centro del Perú por fotocatalisis heterogénea”* [14], donde mezcla la fotocatalisis con peróxido de hidrógeno para potenciar la oxidación, sin embargo, solo logra conseguir una degradación del 62,75%.

### **6.3. Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes.**

La presente tesis fue elaborada de acuerdo a lo señalado en el Reglamento del Código de Ética de la Investigación de la UNAC, Resolución de Consejo Universitario N° 260-2019-CU, con el objetivo que la información plasmada en esta investigación sirva para investigaciones posteriores. Por lo tanto, los autores se responsabilizan por la información emitida en este documento.

## VII. CONCLUSIONES

- Se demostró que el proceso de fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador logra remover hasta un 95.03% del arsénico presente en el agua potable. Para este valor la concentración final del arsénico fue de 0.0055 ppm, cumpliendo así con el LMP establecido en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N° 031-2010-SA.
- El contenido de arsénico presente en el agua potable fue 0.1107 ppm, resultado obtenido como el promedio de los valores más altos encontrados en los departamentos con mayor contaminación de arsénico en agua potable de nuestro país, como lo son: Lambayeque, Puno, Tacna, Arequipa, Moquegua.
- Se concluye que el tiempo de remoción y la dosis de catalizador tienen una influencia significativa en el proceso de fotocátalisis heterogénea. Siendo el tiempo, la condición de operación con mayor importancia.

## VIII. RECOMENDACIONES

- Una radiación solar muy alta puede causar daños en el equipo experimental, por lo cual se recomienda realizar este proceso en un equipo experimental cuyo material sea resistente al parámetro mencionado.
- En investigaciones futuras se recomienda aumentar el tiempo de remoción, a fin de conseguir el porcentaje de remoción máximo que se puede obtener con este proceso.
- La presente investigación eligió el carbón activado como soporte para el catalizador, por ser de uso en plantas de tratamiento de agua. Sin embargo, este material con el tiempo puede llegar a saturarse, por lo que se recomienda realizar investigaciones con otros materiales a fin de reducir trabajos de mantenimiento.
- Se recomienda investigar la eficiencia del proceso aplicado en otros metales tóxicos, cuya complejidad para que sean removidos del agua sea similar a la del arsénico. Así como también investigar acerca de otros catalizadores que puedan ser utilizados en la fotocatalisis heterogénea y que aporten mayor ventaja en el proceso.
- Durante las corridas experimentales no se presencié desgaste o desprendimiento del  $\text{TiO}_2$  del carbón activado, sin embargo, se debe realizar un mayor número de pruebas para determinar el desgaste o la duración del impregnado directo y su influencia en la eficiencia del proceso.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOCZKAJ, G. y FERNANDES, A. Tratamiento de aguas residuales mediante procesos de oxidación avanzada en condiciones básicas de pH: una revisión. *Chemical Engineering Journal* [en línea]. Julio, 2017. 320(2), 608-633 [fecha de consulta: 15 de noviembre del 2022]. ISSN 1385-8947. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.084>
- [2] CARBAJO, J., et al. Estudio de aplicación de catalizadores de titanio en fotocatalisis solar: Influencia del tipo de contaminantes y matrices de agua. *Chemical Engineering Journal* [en línea]. Mayo, 2016. 291(1), 64-73 [fecha de consulta: 15 de noviembre del 2022]. ISSN 1385-8947. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.01.092>
- [3] ESTRADA, A., et al. Fotocatálisis heterogénea para el tratamiento de aguas residuales generadas en el baño del ganado. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* [en línea]. Julio-diciembre, 2019. Bogotá: 10(2), 115-125. [fecha de consulta: 15 de julio del 2022]. ISSN 2145-6453. Disponible en: <https://doi.org/10.22490/21456453.2683>
- [4] VALL, O., et al. Assessment of Prenatal Exposure to Arsenic in Tenerife Island [en línea]. *Plos One*, 28 de noviembre de 2012. (en sección: investigación) [fecha de consulta: 17 de julio del 2022]. Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0050463>
- [5] ENRIQUEZ, D. Nivel alto de arsénico y su repercusión en la salud. *Ciencia & Desarrollo*. Junio, 2015, 19, 7-10 [fecha de consulta: 24 de enero del 2023]. ISSN: 2304-8891. Disponible en : <https://doi.org/10.33326/26176033.2015.19.496>
- [6] VILLENA, J. Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública* [internet]. Junio, 2018, 35(2), 304-308 [fecha de consulta: 24 de enero del 2023]. ISSN: 1726-4634. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.17843/rpmpesp.2018.352.3719>

- [7] TICONA, M., TEJADA, E., VARGAS, H. Contaminación del agua potable con arsénico y frecuencia del cáncer en la ciudad de Tacna. *Revista Médica Basadrina* [internet]. Junio, 2012, 6(1):4–6. ISSN: 2077-0014. Disponible en: <http://www.unibg.edu.pe/revista-medica/pdf/revistamV6-1.pdf>
- [8] D.S. N° 143-2020-PCM. Decreto Supremo que declara el Estado de Emergencia en las localidades de Pacora, Pueblo Viejo, Puente Machuca, La Victoria y Las Juntas Altas y Bajas, del distrito de Pacora, de la provincia de Lambayeque, del departamento de Lambayeque, por impacto de daños ante contaminación de agua para consumo humano [en línea]. *Diario Oficial El Peruano*, Lima, Perú, 26 de agosto de 2020 [fecha de consulta: 20 de enero del 2023]. Disponible en: <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/declaran-el-estado-de-emergencia-en-las-localidades-de-pacor-decreto-supremo-n-143-2020-pcm-1880165-3/#:~:text=Descargar%20Contenido%20en,Declaran%20el%20Estado%20de%20Emergencia%20en%20las%20localidades%20de%20Pacora,de%20agua%20para%20consumo%20humano>
- [9] MINISTERIO de Salud (Minsa). Información de la calidad de agua de consumo humano en el ámbito nacional y Lima Metropolitana. 2022 [fecha de consulta: 20 de enero del 2023]. Disponible en: web: <https://sgd.minsa.gob.pe/validadorDocumental/inicio/detalle.jsf>
- [10] MENDES, G., et al., 2009. Fotocatálise heterogênea com TiO<sub>2</sub> para oxidação de arsênio e sua remoção de águas por coprecipitação com sulfato férrico. *Química Nova* [en línea]. Julio, 2009. 32(6), 1471-1476 [fecha de consulta: 15 de noviembre del 2021]. DOI 10.1590/S0100-40422009000600021. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000600021>
- [11] CÓRDOVA, L. *Desinfección y remoción de arsénico del agua por fotocátalisis heterogénea*. Tesis (Magister en Ingeniería Química). Chihuahua: Centro de investigación en materiales avanzados, 2013, 64

pp. [fecha de consulta: 10 de julio del 2021]. Disponible en:  
<http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/404>

- [12] LLAMATUMBI, J. *Fotocatálisis heterogénea como método de tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario Romerillos Del Cantón Mejía*. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Quito: Universidad Central del Ecuador, 2019, 64 pp. [consulta: 21 de noviembre del 2021]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/19443>
- [13] ORRANTIA, I., et al. Fotocatálisis heterogénea para la remoción de antimonio (sb) en agua utilizando dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) como catalizador. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* [en línea]. Diciembre, 2019, 35(2), 65-71 [fecha de consulta: 27 de noviembre del 2021]. ISSN en trámite. Disponible en:  
<https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/RICA.2019.35.esp03.08>
- [14] HUANCA, Y. *Tratamiento de aguas residuales de la Universidad Nacional del Centro del Perú por fotocatalisis heterogénea*. Tesis (Magister en Ingeniería Química). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019, 107 pp. [fecha de consulta: 01 de diciembre del 2021]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12894/5197>
- [15] MARTINEZ, M. *Influencia del peso de TiO<sub>2</sub> en la remoción de mercurio divalente en un fotocatalizador de placas planas inclinadas*. Tesis (Título de Ingeniería Ambiental). Tingo María: Universidad Nacional Agraria de la selva, 2019, 97 pp. [fecha de consulta: 01 de diciembre del 2021]. Disponible en: <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1590>
- [16] ALARCÓN, M. *Arsénico en Agua: presencia, cuantificación analítica y mitigación* [en línea]. Chihuahua: Centro de Investigación en Materiales Avanzados, 2012 [consulta: 07 de febrero del 2022]. ISBN 978-607-8272-14-3. Disponible en :  
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/1056>

- [17] FANO, D. Exposición a arsénico en agua potable, metabolismo, y sus efectos sobre los resultados perinatales en Tacna, Perú. Tesis (Magister en Fisiología). Lima: Universidad Peruana Cayetano Heredia, 2021, 126 pp. [fecha de consulta: 15 de febrero del 2023]. Disponible en: [https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/8952/Exposicion\\_FanoSizgorich\\_Diego.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/8952/Exposicion_FanoSizgorich_Diego.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [18] LOPEZ, M., et al. Oxidación avanzada como tratamiento alternativo para las aguas residuales. Una revisión. *Enfoque UTE* [en línea]. Diciembre, 2021, 12(4), 76-87 [fecha de consulta: 19 de febrero del 2023]. ISSN: 1390-6542. Disponible en: [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1390-65422021000400076](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-65422021000400076)
- [19] DOMÈNECH, X, JARDIM, W. Y CAMADA, M. *Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes* [en línea]. Argentina: ..... , 2000, pp. 3–26 [ fecha de consulta: 05 de febrero del 2023]. Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea. Disponible en : [https://www.academia.edu/14116027/PROCESOS\\_AVANZADOS\\_DE\\_OXIDACION\\_PARA\\_LA\\_ELIMINACION\\_DE\\_CONTAMINANTES](https://www.academia.edu/14116027/PROCESOS_AVANZADOS_DE_OXIDACION_PARA_LA_ELIMINACION_DE_CONTAMINANTES)
- [20] SARABIA, A. Producción de hidrógeno a partir del tratamiento de agua residual mediante el proceso de fotocátalisis heterogénea. Tesis (título de Ingeniería en sistemas ambientales). Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional, 2018. 55 pp. [fecha de consulta: 10 de enero del 2023]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/26951/SARABIA%20ROQUE%20ALBERTO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [21] GARCÍA, E. Películas delgadas de TiO<sub>2</sub> + ZnO y sus propiedades fotocatalíticas. Tesis (Maestro en Ingeniería de Manufactura). Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional, 2011. 91 pp. [fecha de consulta: 15 de enero del 2023]. Disponible en:

<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/9842/213.pdf?sequence=1>

- [22] DIAZ, P. *Degradación de la tartrazina mediante fotocatalisis solar heterogénea usando óxido de zinc*. [en línea]. Informe final de investigación. Callao: Universidad Nacional del Callao, 2020 [consulta: 10 de julio del 2022]. Disponible en: <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/5156>
- [23] RIVERA, M., et al. Análisis técnico y económico del proceso de coagulación con cloruro férrico para remover arsénico de agua subterránea. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales* [en línea]. Junio, 2011, 4(1), 46-56 [fecha de consulta: 27 de febrero del 2023]. ISSN: 0718-378X. Disponible en: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/26011>
- [24] SHREEMOYEE, S., et al. Arsenic and iron removal from groundwater by oxidation–coagulation at optimized pH: Laboratory and field studies. *Journal of Hazardous Materials* [en línea]. Setiembre, 2013, 260(1), 618-626 [fecha de consulta: 27 de febrero del 2023]. ISSN 0304-3894. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.06.017>
- [25] CASTRO, M., (2006). *Remoción Del Arsénico En El Agua Para Bebida Y Biorremediación De Suelos* [en línea]. Ciudad de México: Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America [consulta: 28 de febrero del 2023]. Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/remocion-aqua.pdf>
- [26] PUMA, Y. Evaluación del proceso de coagulación y floculación con mucilago de opuntia ficus indica como adyuvante del FeCl<sub>3</sub> en efluentes de servicios de comida. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2020. 79 pp. [fecha de consulta: 28 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/52bfb4d4-2708-4a65-90c2->

[e63685db114f](#)

- [27] BOURNOD, L. Remoción del Arsénico mediante Coagulación, Filtración y Sedimentación Comparación con tecnologías disponibles y análisis de una planta tipo [en línea]. Bahía Blanca: Universidad Tecnológica Nacional, 2010 [fecha de consulta: 28 de febrero del 2023]. Disponible en: <http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/agua.html>
- [28] MARTINEZ, C. Diseño de un reactor fotocatalítico para la degradación de contaminantes emergentes presentes en el efluente de una Estación Depuradora de Aguas Residuales. Tesis (título de Ingeniero Químico). Castellón: Universidad Jaume I, 2020. 104 pp. [fecha de consulta: 01 de marzo del 2023]. Disponible en: [https://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/189369/TFG\\_2020\\_Martinez\\_Castillo\\_Carla.pdf?sequence=1](https://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/189369/TFG_2020_Martinez_Castillo_Carla.pdf?sequence=1)
- [29] MINISTERIO de Salud (MINSA). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. 2010 [fecha de consulta: 07 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/244805-031-2010-sa>
- [30] ORTIZ, D. Aplicación de la fotocatalisis oxidativa con ZnO y luz solar para el tratamiento de agua contaminada con colorantes industriales. Tesis (Magister en Química del Medio Ambiente). Arequipa: Universidad Católica de Santa María, 2016, 172 pp. [fecha de consulta: 10 de marzo del 2023]. Disponible en: <https://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/20.500.12390/131/3/CONCYTEC0000103.pdf>
- [31] ORGANIZACIÓN Mundial de la Salud (OMS). Índice UV mundial solar: Guía Práctica. 2018 [fecha de consulta: 21 de agosto de 2018]. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42633>
- [32] MINISTERIO de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MINAM). Índice Ultravioleta (IUV). 2003 [fecha de consulta: 25 de marzo del 2023].

Disponible en: [http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/indice-ultravioleta-iuv-#:~:text=El%20%C3%ADndice%20UV%20\(IUV\)%20es,da%C3%B1os%20en%20la%20piel%20humana.](http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/indice-ultravioleta-iuv-#:~:text=El%20%C3%ADndice%20UV%20(IUV)%20es,da%C3%B1os%20en%20la%20piel%20humana.)

- [33] FRANCO, F. y CARRO. M. Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. Revista internacional de contaminación ambiental [en línea]. Mayo, 2014, 30(2), [fecha de consulta: 5 de febrero de 2023]. ISSN: 0188-4999. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992014000200005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000200005)
- [34] PAITAN, L. y Palomino, D. Remoción de arsénico del agua potable del distrito de Quero Provincia de Jauja por el método de electrocoagulación a nivel laboratorio. Tesis (título de Ingeniero Químico). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2017. 115 pp. [fecha de consulta: 7 de febrero del 2023]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3773/Paitan%20De%20La%20Cruz%20-%20Palomino%20Barrientos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [35] MENDOZA, W. Fotocatálisis para la degradación de detergentes en aguas residuales. Tesis (Título de Ingeniero Químico). Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2019. 60 pp. [fecha de consulta: 9 de agosto del 2023]. Disponible en: <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/7920>
- [36] HINCAPIE-MEJIA, G., et al. Fotocatálisis Heterogénea y Foto-Fenton Aplicadas al Tratamiento de Aguas de Lavado de la Producción de Biodiesel. Información Tecnológica [en línea]. Abril, 2011, 22(2), 33-42 [fecha de consulta: 10 de febrero del 2023]. ISSN: 0718-0764. Disponible en: [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642011000200005#:~:text=La%20fotocat%C3%A1lisis%20heterog%C3%A9nea%20se%20basa,o%20el%20per%C3%B3xido%20de%20hidr%C](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642011000200005#:~:text=La%20fotocat%C3%A1lisis%20heterog%C3%A9nea%20se%20basa,o%20el%20per%C3%B3xido%20de%20hidr%C)

[3%B3geno.](#)

- [37] GUTIERREZ, M. Estudio de la naturaleza de las bandas de valencia y conducción de los sólidos cristalinos. Tesis (título de Físico Puro). Cantabria, Universidad de Cantabria, 2016. 54 pp. [fecha de consulta: 10 de febrero del 2023]. Disponible en:  
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/9204/Gutierrez%20Ruiz%20Marina.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [38] PALLARÉS, M. Hacia el motor superconductor: estudio de las interacciones entre un rotor superconductor y un estator convencional y de la viabilidad de su uso para producir par y levitación. Tesis (Doctor en Energías). Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2002. 207 pp. [fecha de consulta: 12 de febrero del 2023]. Disponible en:  
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93600?show=full>
- [39] Garca' Pulido Daury, "Agua potable para comunidades rurales, reúso y tratamientos avanzados de aguas residuales domesticas [en línea]. Bogotá: Revista VirtualPRO, 2007. pp. 1-14. [fecha de consulta: 12 de febrero del 2023]. Capítulo 1. Remoción de arsénico a nivel domiciliario. ISSN: 1794-4449. Disponible en:  
[https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/GONZ%C3%81LEZ%20y%20MART%C3%8DN%202003.%20Agua%20potable%20para%20comunidades%20rurales.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/GONZ%C3%81LEZ%20y%20MART%C3%8DN%202003.%20Agua%20potable%20para%20comunidades%20rurales.pdf)
- [40] PABÓN, S. Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. Entre Ciencia e Ingeniería [en línea]. Marzo, 2021, 14(27), 9-18 [fecha de consulta: 12 de febrero del 2023]. ISSN: 1909-8367. Disponible en:  
<http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v14n27/1909-8367-ecei-14-27-9.pdf>
- [41] HERRMANN, J. *Fotocatálisis heterogénea: fundamentos y aplicaciones* a la remoción de varios tipos de contaminantes acuosos [en línea]. Francia: Ecole Centrale de Lyon, 1999 [fecha de consulta: 31 de enero del 2023].

ISSN 0920-5861. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586199001078>

[42] INSTITUTO Profesional Chileno de la Fundación DUOC UC de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Investigación Aplicada. 2022 [fecha de consulta: 04 de febrero del 2023]. Disponible en: web: <https://bibliotecas.duoc.cl/investigacion-aplicada/definicion-proposito-investigacion-aplicada#:~:text=La%20Investigaci%C3%B3n%20Aplicada%20tiene%20p,del%20desarrollo%20cultural%20y%20cient%C3%ADfico>

[43] HERNANDEZ, R. *Metodología de la Investigación*. [en línea]. México: McGRAW-HILL / Interamericana Editores, 2014. [fecha de consulta: 04 de febrero del 2023]. ISBN: 978-1-4562-2396-0. Disponible en: <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>

[44] ROJAS-CHAVES, P. Estudio de remoción de arsénico en agua potable a nivel domiciliario mediante oxidación solar y coagulación-floculación. *Tecnología en marcha* [en línea]. Diciembre, 2015, 28(4), 55-65 [fecha de consulta: 02 de marzo del 2023]. ISSN: 0379-3982. Disponible en: [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/2443](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/2443)

[45] SERVICIO Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Tiempo/Radiación UV. 2023 [fecha de consulta: 10 y 15 de marzo del 2023]. Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=radiacion-uv>

## **ANEXOS**

**Anexo 1:** Matriz de consistencia.

**Anexo 2:** Certificados de verificación y calibración del espectrofotómetro y balanza utilizados.

**Anexo 3:** Certificación del uso del lugar de experimentación.

**Anexo 4:** Resultados de la primera corrida.

**Anexo 5:** Resultados de la segunda corrida.

**Anexo 6:** Imágenes del experimento.

## ANEXO 1: Matriz de consistencia

### ***“Remoción de arsénico en el agua potable mediante fotocátalisis heterogénea usando TiO<sub>2</sub> como catalizador”***

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	METODOLOGÍA
<p><b>General</b></p> <p>¿Cómo se removerá el arsénico del agua potable mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador?</p>	<p><b>General</b></p> <p>Remover el arsénico en el agua potable mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador.</p>	<p><b>General</b></p> <p>La aplicación de fotocátalisis heterogénea utilizando óxido de titanio como catalizador nos permitirá la remoción de arsénico en el agua potable.</p>	<p><b>Dependiente</b></p> <p>Remoción de arsénico</p>	Remoción	% de remoción	<p>Tipo aplicada</p> <p>Enfoque cuantitativo</p> <p>Nivel explicativo (Causa efecto)</p> <p>Diseño experimental</p>
<p><b>Específico</b></p> <p>¿Cuál es el contenido de arsénico del agua potable a ser tratada mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador?</p>	<p><b>Específico</b></p> <p>Determinar el contenido de arsénico del agua potable a tratar mediante la remoción de arsénico en el agua potable mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador.</p>	<p><b>Específico</b></p> <p>El contenido de arsénico del agua potable a tratar mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador está fuera del LMP.</p>	<p><b>Independiente</b></p> <p>Contenido de arsénico</p>	concentración	0.1107ppm	
<p>¿Cuáles son las condiciones de operación para la remoción de arsénico en el agua potable mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador?</p>	<p>Determinar las condiciones de operación para la remoción de arsénico en el agua potable mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador.</p>	<p>Las condiciones de operación para la remoción de arsénico en el agua potable mediante fotocátalisis heterogénea usando óxido de titanio como catalizador determinarán un buen rendimiento del proceso.</p>	condiciones de operación	tiempo	<p>t<sub>1</sub> = 45 min</p> <p>t<sub>2</sub> = 90 min</p> <p>t<sub>3</sub> = 135 min</p> <p>t<sub>4</sub> = 180 min</p>	
				catalizador	<p>c<sub>1</sub> = 1g/100g de AC</p> <p>c<sub>2</sub> = 2.5g/100g de AC</p> <p>c<sub>3</sub> = 5g/100g de AC</p>	

**ANEXO 2:** Certificados de verificación y calibración del espectrofotómetro utilizado.

	<b>CERTIFICADO DE VERIFICACIÓN DE RENDIMIENTO PINAACLE 500</b>	CÓDIGO : FGPV_CVR_PIN500 REVISIÓN : 02 APROBADO : GOC ELABORADO: APV FECHA : 09-03-2020
---	--	---

**ESPECTROFOTÓMETRO DE ABSORCIÓN ATÓMICA**

PERKIN ELMER MODELO PINAACLE 500

Compañía:	<b>AURICA S.A.C.</b>
Dirección:	CAL. PABLO DE OLAVIDE NRO. 340 - URB. IND. PANAMERICANA NORTE - INDEPENDENCIA
Área:	LABORATORIO
Responsable:	KATHERINE QUIÑONES SALCEDO
Teléfono:	986602352
Código del Cliente:	NA
Fecha de Evaluación:	29 DE SETIEMBRE DEL 2022
Próxima Certificación	
Periodo recomendado:	<b>ANUAL</b>
Fecha Sugerida:	SETIEMBRE DEL 2023
No. de Certificado:	MS00152
Fecha Ultimo Certificado:	NA
Teléfono de Consultas:	201 5800 / 444 9993

	<b>CERTIFICADO DE VERIFICACIÓN DE RENDIMIENTO PINAACLE 500</b>	<b>CÓDIGO</b> : FGPV_CVR_PIN500 <b>REVISIÓN</b> : 02 <b>APROBADO</b> : GOC <b>ELABORADO</b> : APV <b>FECHA</b> : 09-03-2020
---	--	---

<b>CONFIGURACIÓN EVALUADA:</b>		<b>ACCESORIOS / COMPONENTES, NO INCLUIDOS en la descripción del modelo pero utilizado en la prueba.</b>	
<b>Modelo</b> PINAACLE 500	<b>No. Serie</b> P5PS19082701	<b>Modelo</b>  	<b>No. Serie</b>  
<b>Equipo de Prueba</b> Filtro Densidad Neutral (0.2 A) Filtro Densidad Neutral (1.0 A) Filtro Densidad Neutral (2.0 A)	<b>Número de Serie</b> MG0-066 MG2-503 MG3-253		
<b>Estándares Utilizados</b> Solución de Cobre	<b>Número de Lote</b> P2-CU679499	<b>Fecha de Expiración</b> 25-05-2023	
<b>Suministrado por Cliente</b> Agua Ultra Pura	<b>Observaciones</b> NA	<b>Iniciales de Cliente</b> AURICA	



**CERTIFICADO DE VERIFICACIÓN  
DE RENDIMIENTO  
PINAACLE 500**

CÓDIGO : FGPV\_CVR\_PIN500  
REVISIÓN : 02  
APROBADO : GOC  
ELABORADO: APV  
FECHA : 09-03-2020

CERTIFICADO No : MS000152

FECHA DE EVALUACIÓN : 29-09-2022

1. Linealidad del detector con Bario (553.5 nm)(Con filtros de densidad neutral)

Parámetro	Especificaciones		Valor Obtenido(VO)	Diferencia  VN - VO	Pasó / No Pasó
	Valor Nominal(VN)	Tolerancia			
Filtro de densidad neutral (0.2 A)	0.1608	±10% de VN	0.1672	-0.0064	Pasó
Filtro de densidad neutral (1.0 A)	1.0077	±10% de VN	1.0130	-0.0053	Pasó
Filtro de densidad neutral (2.0 A)	1.9249	±10% de VN	1.9863	-0.0614	Pasó

2. Ruido de línea base con Bario (553.5 nm) (Filtro 1.0 A)

(Con un tiempo de integración 0.5 segundos y 99 réplicas.)

Parámetro	Especificación	Valor Obtenido	Pasó / No pasó
Desviación Estándar	SD ≤ 0.010	0.0010	Pasó

3. Ruido de línea base con Cobre (324.8 nm)

(Con un tiempo de integración 0.5 segundos y 99 réplicas.)

Parámetro	Especificación	Valor Obtenido	Pasó / No pasó
Desviación Estándar	SD ≤ 0.001	0.0000	Pasó

4. Compensación Corrector de Fondo D2 (Cobre 324.8 nm)

(Con filtro de densidad de 1.0 A)

Parámetro	Especificación	Valor Obtenido	Pasó / No pasó
Desviación Estándar	≤ 0.010 Abs	0.006	Pasó

5. Ruido de línea base Cu-BG (Cobre 324.8 nm)

(Con un tiempo de integración 2.0 segundos y 99 réplicas.)

Parámetro	Especificación	Valor Obtenido	Pasó / No pasó
Desviación Estándar	SD ≤ 0.005	0.0004	Pasó

6. Ruido de línea base con As-BG (Arsénico 193.7 nm)

(Con un tiempo de integración 2.0 segundos y 99 réplicas)(Lámpara EDL)

Parámetro	Especificación	Valor Obtenido	Pasó / No pasó
Desviación Estándar	SD ≤ 0.005	0.0007	Pasó



### CERTIFICADO DE VERIFICACIÓN DE RENDIMIENTO PINAACLE 500

CÓDIGO : FGPV\_CVR\_PIN500  
REVISIÓN : 02  
APROBADO : GOC  
ELABORADO: APV  
FECHA : 09-03-2020

CERTIFICADO No : MS000152

FECHA DE EVALUACIÓN : 29-09-2022

7. Revisión de Seguridad de la Flama

Regulación correcta?

Si  No  N/A

8. Revisión de Seguridad de los Interlocks

Funcionamiento correcto?

Si  No  N/A

9. Llama con Óxido Nitroso

Encendido, apagado correcto?

Si  No  N/A

10. Sensibilidad y Precisión con Cobre (324.8 nm)

(Estándar de 5 mg/L de Cu en tiempo de lectura de 10 segundos, 10 réplicas y Quemador 10 cm)

	Especificación de Sensibilidad	Especificación de RSD (%)	Sensibilidad Obtenida (Abs.)	RSD (%) Obtenido
Nebulizador de Alta Sensibilidad con impact bead	≥ 0.500 Abs	≤ 0.40 %	0.720	0.32
Nebulizador Estándar	≥ 0.250 Abs	≤ 0.30 %	NA	NA

CONCLUSIONES: Todas las pruebas pasaron satisfactoriamente.

Este documento CERTIFICA que las pruebas realizadas y la configuración evaluada

[ X ] cumple

[ ] no cumple

Con las especificaciones de PERKIN ELMER, indicadas en este Certificado.

Este documento no modifica los términos estándar y las condiciones de venta de PERKIN ELMER, incluyendo los términos de garantía. PERKIN ELMER no asume compromiso por los resultados de las pruebas,

CIENTIFICA ANDINA S.R.C.  
ÁREA DE POST VENTA

Ing. Marco Soto

Ing. de servicio

Firma de Cliente

## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° MLM-482-2022

Página 1 de 3

**FECHA DE CALIBRACIÓN** : 2022-09-14

**FECHA DE EMISIÓN** : 2022-09-19  
**ORDEN DE TRABAJO** : OTC-095-2022

**1. SOLICITANTE** : AURICA S. A. C.

**DIRECCIÓN** : Calle Pablo de Olavide N° 340, Urb. Panamericana Norte Indust

**2. INSTRUMENTO DE MEDICIÓN** : **BALANZA**

**MARCA** : METTLER TOLEDO

**ALCANCE DE INDICACIÓN** : 220 g

**MODELO** : MS204TS/00

**DIVISIÓN DE ESCALA / RESOLUCIÓN** : 0,0001 g

**NÚMERO DE SERIE** : C024547049

**PROCEDENCIA** : SUIZA

**DIVISIÓN DE VERIFICACIÓN ( e )** : 0,001 g

**IDENTIFICACIÓN** : NO IDICA

**TIPO** : ELECTRÓNICA

**UBICACIÓN** : LABORATORIO DE ANÁLISIS

**3. FUNDAMENTO DEL MÉTODO Y PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN**

La Calibración se realizó según el método de comparación de las indicaciones de la balanza contra cargas aplicadas de valor conocido (pesas patrón).

Procedimiento para la Calibración de Balanzas de Funcionamiento no Automático Clase I y II; PC-011 del SNM-INDECOP, 4ta edición Abril 2010.

**4. LUGAR DE CALIBRACIÓN**

LABORATORIO DE ANÁLISIS de AURICA S. A. C.  
Calle Pablo de Olavide N° 340, Urb. Panamericana Norte Industrial - Independencia

**5. DECLARACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE**

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura  $k=2$ . La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la Expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

Los resultados son válidos en el momento y en las condiciones de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración, la cual está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o a reglamentaciones vigentes.

METROLAB S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

Los resultados de este certificado de calibración no debe ser utilizado como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Firmado digitalmente por: JORGE LUIS PACHECO CRISTOBAL  
Rol: GERENTE TÉCNICO  
Organización: METROLAB SAC  
Unidad organizacional: GERENCIA Issued by AC CAMERFIRMA  
PER.XC3V9A SAC ER [PEI]  
Limitación de uso: Explicit Text: CERTIFICADO DE PERSONA FISICA CON  
VINCUACION A EMPRESA  
Fecha: 19/09/2022 17:01:16



  
Jorge Pacheco Cristóbal  
Gerente Técnico

Código: PT-07-R12

Versión: 04

Elaborado : JLPC

Revisado: HRMP

Aprobado por: HRMP

Calle José Olaya Balandra N° 185 Urb. Los Próceres – Santiago de Surco, Lima-Peru. Telf: 323 8479 - Cel: 994 221 268 / 994 188 775

Email: [atencion\\_al\\_cliente@metrolabsac.com](mailto:atencion_al_cliente@metrolabsac.com) / [metrologia@metrolabsac.com](mailto:metrologia@metrolabsac.com) / [ventas@metrolabsac.com](mailto:ventas@metrolabsac.com)

Prohibida la reproducción total a parcial del documento sin la aprobación del JSG de Metrolab S.A.C.

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° MLM-482-2022**

Página 2 de 3

**6. CONDICIONES AMBIENTALES**

	Mínima	Máxima
Temperatura	19,7 °C	19,8 °C
Humedad Relativa	65 %	65 %

**7. TRAZABILIDAD**

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales e internacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Código	Certificado de calibración
Patrones de referencia del INACAL - DM	pesas (exactitud E2)	E2-001A	LM-C-055-2022

**8. OBSERVACIONES**

(\*) Código indicado en una etiqueta adherida al instrumento.

Los errores máximos permitidos (e.m.p.) para esta balanza corresponden a los e.m.p. para balanzas en uso de funcionamiento no automático de clase de exactitud I, según la Norma Metrológica Peruana 003.

Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva de color verde con la indicación "CALIBRADO".

**9. RESULTADOS DE MEDICIÓN**

INSPECCIÓN VISUAL			
AJUSTE DE CERO	TIENE	ESCALA	NO TIENE
OSCILACIÓN LIBRE	TIENE	CURSOR	NO TIENE
PLATAFORMA	TIENE	SISTEMA DE TRABA	NO TIENE
NIVELACIÓN	TIENE		

**ENSAYO DE REPETIBILIDAD**

	Inicial	Final
Temp. (°C)	19,7	19,7
HR (%)	65	65

Medición N°	Carga L1= 100,0000 g			Carga L2= 199,9999 g		
	I(g)	Δ L(g)	E(g)	I(g)	Δ L(g)	E(g)
1	100,0000	0,0000	0,0000	200,0000	0,0000	0,0001
2	100,0000	0,0000	0,0000	200,0001	0,0000	0,0002
3	100,0002	0,0000	0,0002	199,9999	0,0000	0,0000
4	100,0001	0,0000	0,0001	199,9999	0,0000	0,0000
5	100,0001	0,0000	0,0001	200,0000	0,0000	0,0001
6	100,0001	0,0000	0,0001	200,0001	0,0000	0,0002
7	100,0001	0,0000	0,0001	200,0001	0,0000	0,0002
8	100,0000	0,0000	0,0000	200,0000	0,0000	0,0001
9	100,0001	0,0000	0,0001	200,0001	0,0000	0,0002
10	100,0001	0,0000	0,0001	200,0000	0,0000	0,0001
Diferencia Máxima		0,0002				0,0002
Error máximo permitido	±	0,002 g		±	0,002 g	



Código: PT-07-R12

Versión: 04

Elaborado : JLPC

Revisado: HRMP

Aprobado por: HRMP

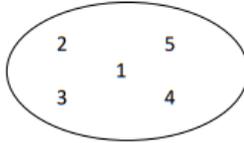
Calle José Olaya Balandra N° 185 Urb. Los Próceres – Santiago de Surco, Lima-Peru. Telf: 323 8479 - Cel: 994 221 268 / 994 188 775

Email: atencion\_al\_cliente@metrolabsac.com / metrologia@metrolabsac.com / ventas@metrolabsac.com

Prohibida la reproducción total a parcial del documento sin la aprobación del JSG de Metrolab S.A.C.

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° MLM-482-2022**

Página 3 de 3



**ENSAYO DE EXCENTRICIDAD**

Vista Frontal		Temp. (°C)		HR (%)	
		Inicial	Final		
		19,7	19,7		
		65	65		

Posición de la Carga	Determinación de E <sub>0</sub>				Determinación del Error corregido				
	Carga *** Mínima (g)	l(g)	Δ L(g)	E <sub>0</sub> (g)	Carga L (g)	l(g)	Δ L(g)	E(g)	Ec(g)
1	0,0010	0,0010	0,0000	0,0000	70,0000	70,0001	0,0000	0,0001	0,0001
2		0,0009	0,0000	-0,0001		70,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3		0,0009	0,0000	-0,0001		70,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4		0,0009	0,0000	-0,0001		69,9999	0,0000	-0,0001	0,0000
5		0,0009	0,0000	-0,0001		69,9998	0,0000	-0,0002	-0,0001

(\*\*\*) valor entre 0 y 10 e

Error máximo permitido : ± 0,002 g

**ENSAYO DE PESAJE**

		Temp. (°C)		HR (%)	
		Inicial	Final		
		19,8	19,8		
		65	65		

Carga L (g)	CRECIENTES				DECRECIENTES				emp **** ±(g)
	l(g)	Δ L(g)	E(g)	Ec(g)	l(g)	Δ L(g)	E(g)	Ec(g)	
0,0010	0,0010	0,0000	0,0000						0,001
0,0100	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0100	0,0000	0,0000	0,0000	0,001
0,1000	0,1000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1000	0,0000	0,0000	0,0000	0,001
1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,001
20,0000	20,0000	0,0000	0,0000	0,0000	19,9999	0,0000	-0,0001	-0,0001	0,001
50,0000	50,0000	0,0000	0,0000	0,0000	49,9999	0,0000	-0,0001	-0,0001	0,001
70,0000	70,0000	0,0000	0,0000	0,0000	69,9999	0,0000	-0,0001	-0,0001	0,002
100,0000	99,9999	0,0000	-0,0001	-0,0001	99,9999	0,0000	-0,0001	-0,0001	0,002
150,0000	149,9999	0,0000	-0,0001	-0,0001	149,9999	0,0000	-0,0001	-0,0001	0,002
199,9999	200,0000	0,0000	0,0001	0,0001	199,9999	0,0000	0,0000	0,0000	0,002
219,9999	220,0000	0,0000	0,0001	0,0001	220,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,003

(\*\*\*\*) error máximo permitido

**LECTURA CORREGIDA E INCERTIDUMBRE DE LA BALANZA**

Ecuación para determinar la Lectura Corregida	=	$R + 0,000000720 \times R$
Ecuación para determinar la Incertidumbre Expandida	=	$2 \times \sqrt{0,0000000872 \text{ g}^2 + 0,0000000000338 \times R^2}$

R: Indicación de la balanza en g      Capacidad mínima : 0,0100 g

Cálculo de Lectura Corregida para la Capacidad Máxima

$R_{\text{corregida}} = ( 220,0000 \pm 0,0008 ) \text{ g}$

Nota: Los errores máximos permitidos **emp** corresponden a la Clase de Exactitud I



----- FIN DEL DOCUMENTO -----

Codigo: PT-07-R12      Versión: 04      Elaborado : JLPC      Revisado: HRMP      Aprobado por: HRMP

Calle José Olaya Balandra N° 185 Urb. Los Próceres – Santiago de Surco, Lima-Peru. Telf: 323 8479 - Cel: 994 221 268 / 994 188 775

Email: atencion\_al\_cliente@metrolabsac.com / metrologia@metrolabsac.com / ventas@metrolabsac.com

Prohibida la reproducción total a parcial del documento sin la aprobación del JSG de Metrolab S.A.C.

### ANEXO 3: Certificación del uso del lugar de experimentación

Independencia, 27 de febrero del 2023

**Solicito: Uso de laboratorio e instalaciones de AURICA SAC**

**Ing. César Alva Castillo**

**Jefe de Operaciones AURICA SAC**

**Oliver Jesús Chavarría Córdova** con DNI 71693322 y **Karely Anabel Calla Acero** con DNI 4843417, bachilleres de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao, nos presentamos ante usted con el debido respeto y exponemos lo siguiente:

Que estando en el desarrollo de la tesis para obtener el título profesional, es que solicitamos el uso del laboratorio y las instalaciones de AURICA SAC para realizar los análisis de metales en agua, la preparación de reactivos y las corridas experimentales, para las fechas del 6 al 20 de marzo del 2023

Por lo expuesto, agradecemos de antemano la atención solicitada: Nos despedimos cordialmente de usted.

Atentamente,



Oliver Jesús Chavarría Córdova



Karely Anabel Calla Acero

Solicitamos la firma de usted, como evidencia de aprobación de la solicitud.



AURICA S.A.C  
Ing. César Alva Castillo  
Jefe de Operaciones

Ing. César Alva Castillo

## ANEXO 4: Resultados de la primera corrida



### INFORME DE ENSAYO

N.º 0406/LAB-23

Tipo de muestra : Agua  
Cantidad : 100 ml por muestra  
Envase : recolector estéril para análisis  
Fecha de recepción : 10/03/2023  
Fecha de análisis : 13/03/2023  
Entrega de resultados : 17/03/2023

Muestra	As total	Fe total
1	0.0692	12.74
2	0.0392	9.26
3	0.0226	5.24
4	0.0154	3.95
5	0.0525	11.53
6	0.0332	8.71
7	0.0136	4.06
8	0.0089	2.46
9	0.0452	10.99
10	0.0201	6.81
11	0.0139	4.11
12	0.0055	1.99

Método utilizado: ICP-MS

Independencia, 17 de marzo del 2023

  
AURICA S.A.C.  
Ing. César Alpe Cevallos  
Gerente Operaciones  
AURICA SAC  
Control de Calidad

\*El resultado de los ensayos corresponden a la cantidad de muestra recibida.

\*Este informe no podrá ser reproducido sin la autorización de AURICA SAC

📍 Calle Pablo de Olavide 340 Independencia – Lima, Perú  
🌐 [www.grupoaurica.pe](http://www.grupoaurica.pe)

## ANEXO 5: Resultados de la segunda corrida



### INFORME DE ENSAYO

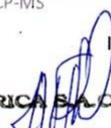
N.º 0411/LAB-23

Tipo de muestra : Agua  
Cantidad : 100 ml por muestra  
Envase : recolector estéril para análisis  
Fecha de recepción : 15/03/2023  
Fecha de análisis : 17/03/2023  
Entrega de resultados : 22/03/2023

Muestra	As total	Fe total
1	0.0731	11.93
2	0.0383	8.52
3	0.0231	5.21
4	0.0139	4.36
5	0.0548	10.95
6	0.0227	7.30
7	0.0174	4.98
8	0.0094	2.87
9	0.0554	11.11
10	0.0258	7.65
11	0.0160	4.13
12	0.0061	2.71

Método utilizado: ICP-MS

Independencia, 22 de marzo del 2023

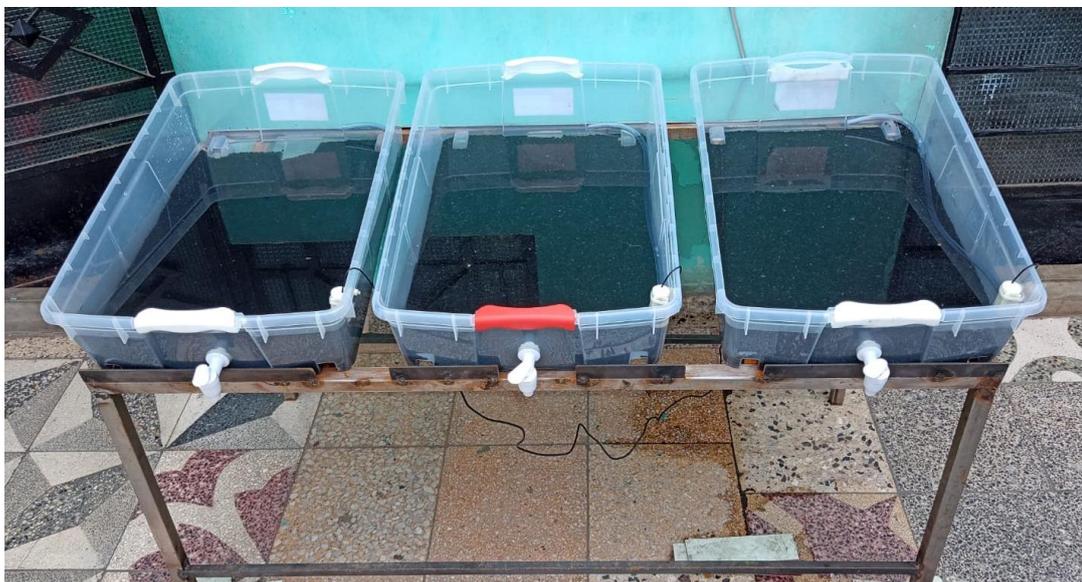
  
AURICA S.A.C.  
*Ing. Claudia Jilina Casaballe*  
AURICA SAC  
Control de Calidad

\*El resultado de los ensayos corresponden a la cantidad de muestra recibida.  
\*Este informe no podrá ser reproducido sin la autorización de AURICA SAC

📍 Calle Pablo de Olavide 340 Independencia – Lima, Perú  
🌐 [www.grupoaurica.pe](http://www.grupoaurica.pe)

## Anexo 6: Imágenes del experimento.

### a) Equipo experimental



**b) Equipo experimental en funcionamiento**



### c) Equipos utilizados



