

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Química

**REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE ARSÉNICO A NIVEL  
PERMISIBLE, MEDIANTE UN REACTOR QUÍMICO  
DISCONTINUO (BATCH) EN EL AGUA DE  
CONSUMO DEL DISTRITO DE  
HUANUARA – TACNA**

**TESIS**

Presentada por:

Bach. Carlos Roberto Costa Gil

Para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO QUÍMICO**

TACNA – PERÚ

2024

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN


**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Química

**REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE ARSÉNICO A  
NIVEL PERMISIBLE, MEDIANTE UN REACTOR  
QUÍMICO DISCONTINUO (BATCH) EN EL  
AGUA DE CONSUMO DEL DISTRITO  
DE HUANUARA – TACNA**

Tesis sustentada por Bach. Carlos Roberto Costa Gil el día 17 de setiembre del 2024, estando integrado por:

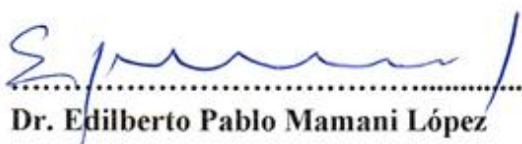
Presidente:

  
.....  
Dr. Manuel de Jesús Sánchez Rosales

Secretario:

  
.....  
Mgr. William Edgar Torres Huayta

Vocal:

  
.....  
Dr. Edilberto Pablo Mamani López


### **CERTIFICADO DE SIMILITUD**

Yo, Dr. Edilberto Pablo Mamani López en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N° 08147-2023-FAIN/UNJBG de la tesis titulada: “REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE ARSÉNICO A NIVEL PERMISIBLE, MEDIANTE UN REACTOR QUÍMICO DISCONTINUO (BATCH) EN EL AGUA DE CONSUMO DEL DISTRITO DE HUANUARA - TACNA”

Presentado por el Bachiller, Carlos Roberto Costa Gil para optar el título profesional de Ingeniero Químico.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual turnitin cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 7% (siete). Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis está de acuerdo a nivel **PERMITIDO**, para continuar con los tramites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los tramites respectivos para su obtención del título.



DNI: 00470787  
Dr. Edilberto Pablo Mamani López  
Asesor



DNI: 75731060  
Carlos Roberto Costa Gil  
Bachiller

## **DEDICATORIA**

A mis amados abuelos, que partieron de este mundo, pero cuya esencia permanece viva en mis recuerdos y en mi corazón.

A mis amados padres, Fresia Gil Basadre y Carlos Costa Pineda, por su inquebrantable amor y apoyo a lo largo de mi vida académica. Sus sacrificios, su paciencia y su fe en mí han sido fundamentales para alcanzar este logro. Esta tesis es una expresión de mi profunda gratitud y amor por todo lo que han hecho y siguen haciendo por mí.

A mis queridos hermanos, Jessenia, Heber, Liz, Pamela, y sobrinos, cuya alegría y amor han sido una fuente constante de fortaleza y motivación en mi vida.

A Dulce, quien me acompañó en largas horas de estudio, siendo mi primer oyente de mis exposiciones, y mi soporte emocional.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, cuya infinita gracia y amor me han sostenido a lo largo de este arduo camino. Su presencia ha sido mi fortaleza y consuelo, brindándome la esperanza y la claridad necesarias para superar cada obstáculo.

A mi asesor, Dr. Edilberto Pablo Mamani López, por su inquebrantable apoyo y guía en cada etapa de esta tesis. Su paciencia, sus valiosas observaciones y su constante motivación han sido un faro de luz en este arduo camino. Agradezco de corazón su compromiso y su dedicación a mi desarrollo académico

A mi coasesor, Otto Alberto Quispe Jiménez, por su compromiso y apoyo continuo. Su enfoque meticuloso y su disposición para compartir conocimientos han sido una fuente de aprendizaje invaluable. Agradezco profundamente su paciencia y dedicación.

Al Dr. Edgardo Oscar Avendaño Cáceres, Jefe del Laboratorio de Procesos Químicos de la Escuela de Ingeniería Química de la UNJBG, por sus consejos y facilitarme su equipamiento.

A mis amigos y colegas, en especial a la Ing. Nancy Flores, a la Ing. Erika Vargas, al Ing. Diego Salazar, al Arq. Luis Garate, cuya colaboración y apoyo han sido esenciales para la realización de esta tesis. Su disposición para ayudar, su aliento constante y compromiso.

A mi querida Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, y a la Escuela Profesional de Ingeniería Química, por ser un segundo hogar donde he crecido no solo como estudiante, sino como persona. Gracias por brindarme la oportunidad de aprender, explorar y desarrollarme plenamente en un entorno tan enriquecedor.

## **INDICE**

DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
RESUMEN .....	7
ABSTRACT.....	9
INTRODUCCION .....	11
Capítulo I. Planteamiento del problema .....	13
1.1. Antecedentes del problema a investigar.....	13
1.2. Descripción del problema .....	15
1.3. Formulación del problema .....	16
1.4. Objetivos de la investigación .....	16
1.5. Justificación e importancia de la investigación.....	17
1.6. Limitaciones.....	18
1.7. Viabilidad del estudio .....	18
1.8. Formulación de hipótesis .....	18
1.9. Variables .....	18
1.10. Operacionalización de variables .....	19
Capítulo II. Marco teórico .....	20
2.1. Antecedentes del trabajo de investigación .....	20
2.2. BASES TEÓRICAS.....	21
2.2.1 Área de estudio .....	21
2.2.2. Calidad del agua del manantial .....	23
2.2.3. Arsénico .....	24
2.2.4. Química del arsénico .....	24
2.2.5. Adsorción del arsénico.....	25
2.2.6. Efecto del tipo de hierro.....	25

2.2.7. Óxidos de hierro.....	26
2.2.8. Efectos del arsénico en la salud .....	28
2.2.9. Reactores químicos .....	29
2.2.10. Tipos de reactores .....	29
2.2.11. Fenómenos que se rigen en un reactor .....	31
2.2.12. Tanques agitados.....	33
2.2.13. Impulsadores .....	33
2.3. Definición conceptual .....	38
Capítulo III. Marco metodológico .....	40
3.1. Planteamiento metodológico .....	40
3.2. Población y muestra .....	40
3.3. Equipos y materiales .....	41
3.4. Procedimiento de las pruebas experimentales.....	43
3.5. Técnicas de recolección de datos .....	57
3.6. Técnicas para el procesamiento de datos .....	58
Capítulo IV. Resultados y Discusión .....	59
4.1. Resultados del desarrollo de las etapas para el diseño del reactor discontinuo ...	59
4.2. Resultados de las pruebas en el reactor discontinuo .....	70
4.2.1. Análisis estadístico para la remoción de arsénico .....	77
4.2.2. Análisis estadístico para la variable de respuesta de Hierro total residual .....	83
4.3. Contrastación de hipótesis.....	90
4.4. Discusión de resultados .....	90
CONCLUSIONES .....	95
RECOMENDACIONES.....	96
REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS.....	97
ANEXOS .....	102

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de la región Tacna – Distrito de Huanuara.....	21
Figura 2 Captación de agua del manantial.....	22
Figura 3 Mecanismo de la adsorción del arsénico por óxidos de hierro.....	27
Figura 4 Tipo de reactores .....	29
Figura 5 Tanque típico del proceso con agitación .....	33
Figura 6 Tipos de agitadores hélice .....	35
Figura 7 Tipos de agitadores turbina .....	36
Figura 8 Tipos de agitadores de pala .....	38
Figura 9 Ubicación de la toma de muestra del agua a tratar.....	41
Figura 10 Diagrama de etapas para el diseño del reactor discontinuo.....	46
Figura 11 Proporciones geométricas para un reactor batch.....	48
Figura 12 Gráfica para hallar el número de potencia en función al número de Reynolds .....	51
Figura 13 Agitador Rushton .....	60
Figura 14 Sistema de filtrado.....	61
Figura 15 Sistema de Conexiones.....	62
Figura 16 Sistema de purga, almacenamiento y soporte .....	63
Figura 17. Dimensiones del reactor discontinuo .....	65
Figura 18 Medidas del agitador Rushton fabricado.....	67
Figura 19 Gráfica para hallar el número de potencia en función al número de Reynolds .....	68
Figura 20 Armado del sistema eléctrico para la agitación.....	69
Figura 21 Concentración de As vs tiempo de reacción .....	71
Figura 22 Reacción de primero orden.....	72
Figura 23 Capacidad de adsorción vs tiempo de reacción.....	74
Figura 24 Gráfica de probabilidad normal para As .....	79
Figura 25 Diagrama de pareto estandarizado para la concentración de arsénico .....	80
Figura 26 Gráfica de efectos principales para As .....	80
Figura 27 Gráfica de interaccion para As .....	81
Figura 28 Gráfica de superficie de respuesta estimada para el As .....	82
Figura 29 Contorno de la superficie de respuesta estimada de la remoción de arsénico	83

Figura 30 Diagrama de Pareto estandarizada para la concentración de hierro total residual.....	85
Figura 31 Gráfica de efectos principales para Fe .....	86
Figura 32 Gráfica de superficie de respuesta estimada para el Fe .....	87
Figura 33 Contorno de la superficie de respuesta estimada de la concentración de Fe..	88
Figura 34 Comparación de las concentraciones de arsénico final en ambos sistemas ..	91
Figura 35 Comparación de la concentración de hierro residual en ambos sistemas.....	92
Figura 36 Solución patrón de Hierro- Titrisol- Eisen-Standardlösung.....	106
Figura 37 Curva de calibración para determinación de hierro.....	107
Figura 38 Solución Estándar de Arsénico Merck Supelco .....	108
Figura 39 Curva de comparación.....	109
Figura 40 Reactivo de hierro FerroVer.....	110
Figura 41 Espectrofotómetro UV-VIS.....	110
Figura 42 Kit de determinación de Arsénico Palintest .....	112
Figura 43 Test de Jarras Digital Marca DAIHAN.....	115
Figura 44 kit medidor portátil multiparametro .....	115
Figura 45 Comportamiento de los tipos de óxidos de hierro respecto a la remoción de As .....	117
Figura 46 Comportamiento de la remoción de arsénico respecto al número de malla.	120
Figura 47 Diagrama de Pareto estandarizada para As .....	126
Figura 48 Efecto principales para As.....	126
Figura 49 Superficie de respuesta tridimensional para As .....	128
Figura 50 Acondicionamiento de la muestra de óxido de hierro.....	129
Figura 51 Reconocimiento del lugar de muestreo de los óxidos de hierro.....	146
Figura 52 Fabricación de la estructura metálica .....	146
Figura 53 Captación de la muestra de agua de manantial de Huanuara .....	147
Figura 54 Medición de parámetros fisicoquímicos in situ.....	147
Figura 55 Sistema del Reactor discontinuo para la remoción de As .....	148
Figura 56 Vista trasera del sistema del reactor discontinuo .....	149
Figura 57 Vista del controlador, motor, agitador.....	149

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Nivel de riesgo químico por arsénico del agua de consumo humano, para la provincia de Candarave - región Tacna .....	14
Tabla 2 Resultados de análisis de muestras de agua para consumo humano para el distrito de Huanuara, provincia de Candarave .....	15
Tabla 3 Operacionalización de variables .....	19
Tabla 4 Poblacion de los Distritos de la Provincia de Candarave de Tacna.....	22
Tabla 5 Análisis fisicoquímico de la muestra de agua sin tratar .....	23
Tabla 6 Características del agitador hélice .....	34
Tabla 7 Características de agitadores turbina .....	36
Tabla 8 Características de agitadores tipo pala.....	37
Tabla 9 Análisis de muestra de óxidos de hierro .....	44
Tabla 10 Selección del impulsor.....	47
Tabla 11 Arreglo experimental .....	54
Tabla 12 Delineamiento estadístico del diseño experimental factorial .....	55
Tabla 13 Análisis de varianza. ....	56
Tabla 14 Comparación del material para el reactor batch .....	59
Tabla 15 Comparación del material para el agitador .....	60
Tabla 16 Comparación del material y composición del filtro .....	61
Tabla 17 Resultados de la concentración de arsénico, hierro residual, pH y parámetros fisicoquímicos del agua tratada.....	70
Tabla 18 Determinación del orden de reacción .....	72
Tabla 19 Resultados de la adsorción de los FeO y el porcentaje de remoción.....	73
Tabla 20 Resultados de concentración de arsénico, hierro residual y pH en el agua de consumo humano, además del porcentaje de remoción de arsénico.....	76
Tabla 21 Resultados de los parámetros fisicoquímicos del diseño.....	77
Tabla 22 Análisis de varianza para la remoción de As.....	78
Tabla 23 Análisis de la regresión múltiple para la remoción de arsénico .....	78
Tabla 24 Resumen de ajuste estadístico para el Arsénico total residual .....	79
Tabla 25 Análisis de Varianza para Concentración de Fe .....	84
Tabla 26 Análisis de la regresión múltiple para el Hierro total residual .....	84
Tabla 27 Resumen de ajuste estadístico para el hierro total residual .....	85
Tabla 28 Resumen de costos.....	89

Tabla 29 Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N°031-2010-SA. Límites Máximos permisibles de parámetros de Calidad Organoléptica. ....	102
Tabla 30 Límites Máximos Permisibles de Parámetros Químicos Inorgánicos .....	102
Tabla 31 Concentración de hierro vs absorbancia .....	107
Tabla 32 Comparación de resultados de la solución Merck vs kit Arsenator.....	109
Tabla 33 Procedimiento para la programación y lectura .....	111
Tabla 34 Determinación del material óptimo de óxido de hierro .....	116
Tabla 35 Determinación del número de malla optima variando la masa de óxido de hierro.....	118
Tabla 36 Comportamiento de la remoción de As respecto al número de malla y masa .....	119
Tabla 37 Determinación del tiempo de reacción optimo .....	119
Tabla 38 Determinación de la velocidad de agitación óptima para remover arsénico .	121
Tabla 39 Determinación de la remoción de As con óxido de hierro reutilizado .....	122
Tabla 40 Determinación del arreglo experimental y resultados .....	123
Tabla 41 Análisis de varianza (ANOVA).....	124
Tabla 42 Coeficientes del modelo .....	125
Tabla 43 Resumen de ajuste estadístico para el Arsénico total residual .....	125
Tabla 44 Serie de mallas ASTM y equivalente de Tyler .....	130

## RESUMEN

Estudios del Gobierno Regional, el Ministerio de Salud y el Ministerio del Ambiente del Perú, han identificado hasta 0,76 mg/L de arsénico en los ríos Callazas y Salado, afectando la laguna de Aricota en Tacna. Esta contaminación impacta las aguas superficiales y manantiales de la cuenca del río Callazas, afectando a Candarave, Quilahuani, Cairani y Huanuara, donde las aguas se usan para consumo, riego y ganadería, exponiendo a la población a altos riesgos por arsénico.

En este trabajo, se realizaron pruebas preliminares en un equipo de prueba de jarras para optimizar las condiciones de remoción de arsénico en agua, utilizando óxidos de hierro y ajustando el tiempo de reacción. Como resultado, se logró reducir la concentración de arsénico a 0,002 mg/L, alcanzando una eficiencia de remoción del 99,73% y un nivel de hierro residual de 0,090 mg/L. Posteriormente, se diseñó un reactor químico discontinuo de 20 litros para uso doméstico en Huanuara. Este sistema incluye un reactor, un filtro, tanques de almacenamiento y purga, y un sistema de agitación equipado con un motor y un agitador tipo Rushton.

En los resultados obtenidos del reactor, se determinó mediante el método gráfico que la reacción es de primer orden, debido al ajuste de los datos, que arrojó un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,9626. Se estableció un tiempo de reacción óptimo de 8 horas, logrando una concentración de arsénico de 0,005 mg/L. Además, se determinó que la capacidad de adsorción de los óxidos de hierro fue de 0,232 mg/g, lo que corresponde a una eficiencia de remoción del 99,29%. Consecutivamente, se realizó un diseño experimental factorial  $2^2$  con 4 puntos estrella y 3 puntos centrales, totalizando 11 experimentos, en los que se ajustaron la masa de óxido de hierro y el tiempo de reacción.

Este ajuste permitió reducir la concentración de arsénico de 0,53003 mg/L a 0,00491 mg/L, cumpliendo con las normativas nacionales e internacionales. El análisis estadístico mostró un  $R^2$  de 95,96% y un  $R^2$  ajustado de 91,92% para la remoción de arsénico, lo que indica un alto grado de precisión en el modelo. Se concluye que el reactor es una solución viable y accesible para la remoción de arsénico en agua potable en zonas rurales como Huanuara, mejorando la calidad del agua y protegiendo la salud pública.

Palabras clave: Reactor, adsorción, óxidos de hierro, arsénico

## ABSTRACT

Studies by the Regional Government, the Ministry of Health and the Ministry of the Environment of Peru have identified up to 0,76 mg/L of arsenic in the Callazas and Salado rivers, affecting the Aricota lagoon in Tacna. This contamination impacts the surface waters and springs of the Callazas river basin, affecting Candarave, Quilahuani, Cairani and Huanuara, where the waters are used for consumption, irrigation and livestock, exposing the population to high risks from arsenic.

In this study, preliminary tests were carried out in a jar test equipment to optimize the conditions of arsenic removal in water, using iron oxides and adjusting the reaction time. As a result, the arsenic concentration was reduced to 0,002 mg/L, reaching a removal efficiency of 99,73% and a residual iron level of 0,090 mg/L. Subsequently, a 20-liter batch chemical reactor was designed for domestic use in Huanuara. This system includes a reactor, a filter, storage and purge tanks, and a stirring system equipped with a motor and a Rushton-type stirrer.

In the results obtained from the reactor, it was determined by the graphical method that the reaction is first order, due to the adjustment of the data, which yielded a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0,9626. An optimal reaction time of 8 hours was established, achieving an arsenic concentration of 0,005 mg/L. In addition, it was determined that the adsorption capacity of iron oxides was 0,232 mg/g, which corresponds to a removal efficiency of 99,29%. Consecutively, a  $2^2$  factorial experimental design was carried out with 4 star points and 3 central points, totaling 11 experiments, in which the mass of iron

oxide and the reaction time were adjusted. This adjustment allowed to reduce the concentration of arsenic from 0,53003 mg/L to 0,00491 mg/L, complying with national and international regulations. The statistical analysis showed an  $R^2$  of 95,96% and an adjusted  $R^2$  of 91,92% for the removal of arsenic, indicating a high degree of accuracy in the model. It is concluded that the reactor is a viable and accessible solution for the removal of arsenic in drinking water in rural areas such as Huanuara, improving water quality and protecting public health.

Keywords: Reactor, adsorption, iron oxides, arsenic

## INTRODUCCIÓN

El agua de consumo humano en muchas regiones, enfrenta el problema de la contaminación por arsénico. Este elemento, presente de forma natural en el suelo y el agua subterránea, puede alcanzar niveles tóxicos debido a actividades humanas como la minería y el uso de pesticidas. La exposición prolongada al arsénico en el agua potable puede causar graves problemas de salud, incluyendo cáncer, enfermedades cardiovasculares y daños en el sistema nervioso. En respuesta a esta preocupación, se han desarrollado diversos métodos de tratamiento para reducir los niveles de arsénico en el agua, siendo el diseño de un reactor químico discontinuo (Batch) una opción viable y eficiente.

En el distrito de Huanuara-Tacna, la concentración de arsénico en el agua de consumo ha sido reportada consistentemente por encima de los límites permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud (0,01 mg/L). Esta situación presenta un riesgo significativo para la salud pública, especialmente en comunidades rurales donde los recursos para tratamientos avanzados de agua son limitados. La falta de infraestructura adecuada para el tratamiento del agua y la dependencia de fuentes contaminadas agravan el problema, requiriendo soluciones inmediatas y efectivas.

El objetivo general es la reducción del contenido de arsénico a nivel permisible mediante un Reactor químico discontinuo (Batch), en el agua de consumo del Distrito de Huanuara – Tacna. Los objetivos específicos son: (1) Establecer las condiciones de operación óptimas que permitan reducir el contenido de Arsénico a menos de 0,01 mg/L, garantizando la concentración de Hierro residual dentro de la normativa de 0,3 mg/L y (2) diseñar un reactor químico discontinuo (Batch), de tamaño consistente con la necesidad volumétrica de demanda del consumidor a nivel domiciliario.

Este trabajo de investigación constituye varios capítulos que cubren diferentes aspectos del estudio. En el capítulo I: Introducción, describe el problema de la contaminación por arsénico en el agua y los objetivos del estudio. El capítulo II: Revisa las tecnologías para la remoción de arsénico y los criterios para el diseño de un reactor batch. En el capítulo III explica los métodos, procedimientos de la investigación y las técnicas de análisis

utilizadas para evaluar la operatividad del reactor. Además del análisis económico donde se detalla los costos asociados con el diseño, construcción, operación y mantenimiento del reactor químico discontinuo, ajustado a la realidad económica de Tacna, Perú. En el capítulo IV se muestran los resultados y discusiones obtenidos de las pruebas experimentales, basado en el diseño experimental, seguido de una discusión sobre la efectividad del reactor químico discontinuo, las condiciones óptimas de operación y las implicaciones de los hallazgos, además del resumen de costos, las conclusiones y recomendaciones.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Antecedentes del problema a investigar

La contaminación del agua por arsénico se presenta en diversas partes del mundo, incluyendo Bangladesh, Taiwán, y el norte de Chile, así como en Argentina y el sur de Perú, particularmente en la región de Tacna, y en menor grado en Arequipa y Moquegua. Investigaciones médicas han demostrado que esta contaminación tiene efectos perjudiciales en la salud, tales como daños cutáneos, alteraciones metabólicas y la proliferación de varios tipos de cáncer, especialmente en la piel, vejiga, riñones, pulmones e hígado. (Ticona, Tejada, & Vargas, 2012)

En Tacna, se llevaron a cabo diversos monitoreos sobre la calidad del agua. Según un estudio de DIGESA, el agua potable de las viviendas supera en cuarenta veces el límite permitido por la legislación peruana y la OMS (Organización Mundial de la Salud) para el consumo humano, señalando el arsénico como la principal fuente de contaminación, (Ticona et al., 2012). Esta situación afecta principalmente a la provincia de Candarave, en especial a los distritos de Cairani, Huanauara, Quilahuani y Candarave.

A lo largo del tiempo, se ha desarrollado en la región de Tacna el programa PVICA (Programa de Vigilancia de la Calidad del Agua para Consumo Humano). Este programa, establecido por la dirección de DIGESA, incluye estudios fisicoquímicos, como la medición de la concentración de arsénico. Los resultados de estos estudios se presentan en la Tabla 1. (PVICA, 2017)

**Tabla 1**

*Nivel de riesgo químico por arsénico del agua de consumo humano, para la provincia de Candarave - región Tacna*

Provincia de Candarave		
Distrito	Nivel de riesgo	Concentración de As
Candarave	alto	0,30 mg/L
Cairani	alto	0,58 mg/L
Camilaca	medio	0,11 mg/L
Curibaya	alto	0,60 mg/L
Quilahuani	alto	0,27 mg/L
Huanuara	alto	0,45 mg/L

*Nota.* Adaptado de *Situación de la calidad de agua para consumo humano en la región Tacna* (p. 4), MCLCP, 2017, PVICA

A través de los años se ha llevado a cabo una recopilación de información de los últimos siete años sobre análisis fisicoquímicos de las aguas superficiales de la provincia de Candarave, específicamente del distrito de Huanuara, fueron realizados por parte de la autoridad del Ministerio de Salud – DIGESA, certifican que la concentración de arsénico sobrepasa los límites establecidos por la norma peruana, como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Resultados de análisis de muestras de agua para consumo humano para el distrito de Huanuara, provincia de Candarave*

Laboratorio	Nro de Informe de ensayo	Fecha del muestreo	Tipo de muestra	Técnica	Parámetro	
					As, mg/L	Fe, mg/L
Ministerio de Salud	0363-2017-LM (01837) (*)	13/03/2017	Agua para uso y consumo humano/Reservorio R1	ICP óptico	<b>0,58</b>	<b>0,051</b>
Ministerio de Salud	0363-2017-LM (01838) (*)	13/03/2017	Agua para uso y consumo humano/Reservorio R3	ICP óptico	<b>0,59</b>	<b>0,029</b>
AGQLabs	A-18/086104 (**)	24/11/2018	Agua de manantial/Pozo	ICP-MS	<b>0,70983</b>	<b>&lt;0,03</b>
AGQLabs	A-18/086105 (**)	24/11/2018	Agua potable	ICP-MS	<b>0,75968</b>	<b>&lt;0,03</b>
AGQLabs	A-19/080961 (**)	20/09/2019	Agua potable	ICP-MS	<b>0,71840</b>	<b>&lt;0,03</b>
AGQLabs	A-21/107842 (**)	13/09/2021	Agua de manantial/Pozo	ICP-MS	<b>0,59625</b>	<b>&lt;0,03</b>
AGQLabs	A-21/107843 (**)	11/09/2021	Agua potable	ICP-MS	<b>0,60008</b>	<b>&lt;0,03</b>
Hidrolab	(FAP-009-01) 2210037-1	3/10/2022	Agua potable	ICP-MS	-	<b>&lt;0,0064</b>
AGQLabs	A-23/039035 (**)	31/03/2023	Agua potable	ICP-MS	<b>0,58197</b>	<b>&lt;0,0300</b>

PNT: (\*) Epa Method 200.7 Rev.4.4(1994) // (\*\*) Epa Method 200.8 Rev.5.4(1994)

*Nota.* Adaptado de *Informes de ensayos de análisis de muestras de agua para consumo humano* (AGQLabs y Hidrolab), (p.1- 4), 2017, DIGESA

## 1.2.Descripción del problema

En la actualidad, la contaminación ambiental en nuestra región representa el problema de salud más serio para los habitantes de la provincia de Tacna. El arsénico es uno de los contaminantes principales, y es uno de los 20 elementos más comunes en la corteza terrestre y el agua, además de ser reconocido como un riesgo significativo para la salud a nivel mundial. (Ale-Mauricio, Villa , & Gastañaga, 2018)

La contaminación por arsénico es preocupante debido a su toxicidad y capacidad cancerígena. La exposición prolongada al arsénico puede causar una serie de efectos secundarios, como cáncer, problemas en la piel, trastornos digestivos, neuropatía periférica, diabetes, insuficiencia renal y enfermedades del corazón. (Karungamy, Selemeni, & Niau, 2023)

Además, la OMS estima que, una exposición prolongada, una de cada diez personas que beben agua que contiene 500ug/L podría morir debido a cáncer. (Demissie, Mekonen, & Teshome, 2024)

La concentración de arsénico en el agua potable no debe exceder 0,01 mg/L (10 µg/L), según la guía para la calidad de agua potable de la Organización Mundial de la Salud. (Truque , 2020)

Actualmente la comunidad de Huanuara carece de un sistema de tratamiento que reduzca eficazmente los niveles de arsénico a las concentraciones estipuladas por las normas internacionales y nacionales, que exigen niveles inferiores a 0,01 mg/L.

### **1.3. Formulación del problema**

El consumo de las aguas superficiales y de manantiales con concentraciones de arsénico por encima de lo establecido por las normas (>0,01 mg/L) afecta la salud y la calidad de vida de los pobladores.

En el distrito de Candarave, en la región de Tacna, no se han realizado estudios específicos sobre el diseño de un reactor químico para la eliminación de arsénico. Aunque se han llevado a cabo análisis de parámetros fisicoquímicos del agua, no existe ninguna investigación o propuesta para el diseño de un reactor a nivel doméstico para los residentes. Por esta razón, se quiere ofrecer un prototipo que proporcione una solución a este problema, planteándose la siguiente pregunta:

¿Permitirá el estudio la reducción del contenido de arsénico a nivel permisible mediante un reactor químico discontinuo (batch), en el agua de consumo del Distrito de Huanuara - Tacna?

### **1.4. Objetivos de la investigación**

#### **1.4.1. Objetivos generales**

- Reducción del contenido de arsénico a nivel permisible mediante un Reactor químico discontinuo (Batch), en el agua de consumo del Distrito de Huanuara – Tacna.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Establecer las condiciones de operación óptimas que permitan reducir el contenido de Arsénico a menos de 0,01 mg/L, garantizando la concentración de Hierro residual dentro de la normativa de 0,3 mg/L
- Diseñar un reactor químico discontinuo (Batch), de tamaño consistente con la necesidad volumétrica de demanda del consumir a nivel domiciliario.

#### **1.5. Justificación e importancia de la investigación**

En el Perú, la región de Tacna enfrenta un grave problema de salud debido a las elevadas concentraciones de arsénico en el agua potable. Esta situación es especialmente alarmante en los distritos de la provincia de Candarave, generando preocupación por los potenciales daños a la salud a largo plazo y el impacto en el desarrollo de las personas. (Ale et al., 2018)

El consumo prolongado de agua con altos niveles de arsénico causa el hidroarsenismo crónico regional endémico (HACRE). Esta enfermedad puede ocasionar problemas cardíacos, neurológicos y vasculares, así como enfermedades hepáticas y renales, hiperqueratosis en la piel y, en casos graves, puede llevar al desarrollo de tumores o cáncer. (Villa Gonzales , Chavez Ruiz , Mamani Pacsi, & Huamani Azorza, 2018)

En el distrito de Huanuara, los habitantes consumen agua potable con niveles de arsénico superiores a 0,70 mg/L, cifra por encima de los estándares establecidos por la OMS de 0,01mg/L. Casi mil residentes en Huanuara siguen utilizando agua subterránea a través de antiguas tuberías de hierro sin tratamiento adecuado, más allá de la cloración, proceso que no elimina ni reduce los metales pesados. (Saenz, 2022)

En la actualidad, se han desarrollado varios métodos y tecnologías nuevas para la adsorción de arsénico como alternativa, ofreciendo mejoras y ventajas significativas sobre las tecnologías tradicionales para el tratamiento de aguas contaminadas. Estas soluciones son más económicas y simples, proporcionando un tratamiento efectivo para el agua potable de la población del distrito de Huanuara. (Polo , Choque, & Cuevas, 2017)

## **1.6. Limitaciones**

- La variación de la concentración del arsénico a lo largo del año, está asociado con la disminución del caudal de las aguas superficiales y de los manantiales, debido a la alta pendiente de su geografía que incide a una rápida filtración.
- Para analizar el arsénico se empleó un kit de arsénico de la marca Palintest, esta se asocia con la sensibilidad a la presencia de otros metales y condiciones ambientales.

## **1.7. Viabilidad del estudio**

Para la evaluar la viabilidad del estudio, se consideraron 3 aspectos claves:

- En el aspecto tecnológico: El uso de los óxidos de hierro para la adsorción de arsénico es una tecnología probada y eficaz. La metodología propuesta, que incluye un reactor químico discontinuo, está bien documentada y se basa en principios científicos, esta implementación es relativamente simple y puede llevarse a cabo con equipos disponibles comercialmente.
- Aspecto ambiental: El uso de óxidos de hierro como adsorbente es ambientalmente amigable, y no genera subproductos tóxicos.
- Aspecto social: La aceptación del sistema no solo depende de su efectividad, sino también de cómo se integra en la vida cotidiana de la comunidad. Esto implica un proceso de diálogo y adaptación cultural donde se debe involucrar a líderes comunitarios y educar a la población sobre los beneficios del sistema.

## **1.8. Formulación de hipótesis**

- Es posible reducir la concentración de arsénico del agua de consumo de los pobladores del distrito de Huanuara-Tacna, a niveles menores de 0,01 mg/L y la concentración de hierro residual inferior a 0,3 mg/L, empleando un reactor químico discontinuo (batch).

## **1.9. Variables**

Las variables son las siguiente:

- Variables independientes: óxidos de hierro y tiempo de reacción
- Variables dependientes: arsénico total residual y hierro total residual
- Variables restrictivas: pH, Temperatura

### 1.10. Operacionalización de variables

Se ajustaron las variables y se evaluaron sus indicadores mediante el análisis de la relación causa-efecto. Se detallan las variables dependientes (VD) en la Tabla 3, donde se especifica su operacionalización.

**Tabla 3**

*Operacionalización de variables*

Variables	Factores	Indicador	Unidades
Dependiente	Arsénico total residual	Concentración de arsénico	mg/L
	Hierro total residual	Concentración de hierro	mg/L
Independiente	Óxidos de hierro	Masa de óxidos de hierro	g
	Tiempo de reacción	Tiempo	h
Restrictivas	pH	Concentración de H <sup>+</sup>	
	Temperatura	Temperatura	°C

*Nota.* En la tabla se detallan las variables utilizadas en el estudio, clasificadas en dependientes, independientes y restrictivas.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes del trabajo de investigación

Existen varias publicaciones como artículos y trabajos de investigación donde propusieron un diseño de un reactor con el objetivo de remover el arsénico, utilizando diferentes tecnologías con coagulantes económicos y eficientes

- Larico Mamani, (2019), empleó lana de acero junto con un sistema de aireación para remover arsénico del agua domiciliaria en el distrito de Sama – Tacna. El estudio empleó la metodología de "superficie de respuesta" mediante un diseño experimental Box-Benhken. En este se analizaron factores como la cantidad de lana de acero y el tiempo de contacto, mientras se mantuvieron constantes el caudal de aireación y el volumen. Los resultados mostraron que se lograron reducciones de arsénico desde 0,05 mg/L hasta 0,005 mg/L, cumpliendo con los límites máximos permitidos por la normativa peruana de 0,01 mg/L de arsénico en agua. El tiempo, el pH y la interacción entre estos factores fueron determinantes en el proyecto. Como conclusión, se propuso el diseño de un reactor tipo batch con una capacidad de 10 litros, utilizando 15 gramos de lana de acero, un pH de 8,14 y un tiempo de 70 minutos, con un sistema de aireación constante.
- Gutiérrez Cámero, (2019), aborda el problema de las elevadas concentraciones de sulfato de aluminio y cloruro férrico, que superan los límites máximos permitidos y afectan la salud y la estética del agua. El estudio propone reemplazar el cloruro férrico con almidón de yuca en los procesos de coagulación y floculación. Se buscó determinar el porcentaje óptimo para la clarificación y eliminación de arsénico, utilizando un diseño experimental de superficie de respuesta y factorial. Se consideraron factores como la velocidad y tiempo de agitación, el tiempo de sedimentación y la concentración de coagulante. Para la eliminación de arsénico, se analizaron la velocidad de agitación y la dosis óptima de coagulante. Los resultados revelaron una disminución del hierro total a 0,15 mg/L y del arsénico a 0,005 mg/L, logrando reemplazar el 40% del cloruro férrico con almidón de yuca en un 60% de

cloruro férrico en el proceso de clarificación. Finalmente, se diseñó un reactor batch de 20 litros, con dimensiones del tanque y la paleta basadas en pruebas previas.

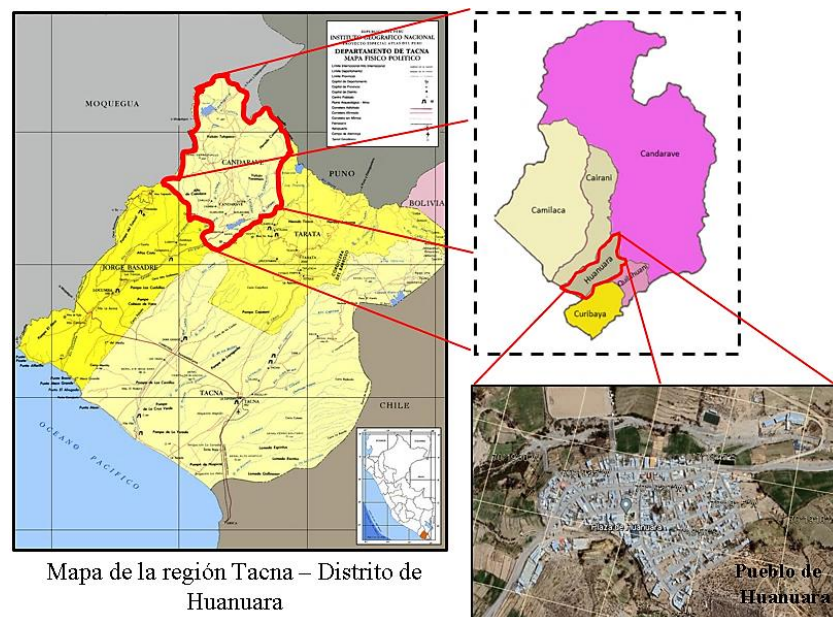
## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1 Área de estudio

El distrito de Huanuara se ubica en la provincia de Candarave, departamento de Tacna, en su extremo norte, mediante la cual limita con Moquegua y Puno. La altura en Huanuara es de 3223 m.s.n.m. (precisión 40 m). En dicho lugar, la latitud sur es  $17^{\circ} 18' 810$  y la longitud oeste es  $70^{\circ} 19' 335$ .

### Figura 1

*Mapa de la región Tacna – Distrito de Huanuara*



*Nota.* Adaptado de (Google, s.f.) [Mapa geográfico de la región de Tacna – Distrito de Huanuara].

El distrito de Huanuara está geográficamente delimitado al norte por Cairani, al sur por Quilahuani y Curibaya, al este por Candarave, y al oeste por Ilabaya.

El distrito de Huanuara no cuenta con estación del SENAMHI, pero en general se considera para Candarave un promedio de temperatura máxima igual a 20° C, y la mínima de 3°C, la presión atmosférica en promedio unos 545 mmHg. (Mamani López, 2014)

**Tabla 4**

*Poblacion de los Distritos de la Provincia de Candarave de Tacna*

Población de los Distritos de la Provincia de Candarave - Departamento Tacna					
Distrito\Año	2018	2019	2020	2021	2022
Candarave	2473	2420	2359	2353	2343
Cairani	1022	997	970	965	959
Camilaca	1200	1161	1120	1105	1088
Curibaya	420	449	479	517	554
Huanuara	524	503	480	470	457
Quilahuani	739	712	685	673	661
Total	6378	6242	6093	6083	6062

*Nota.* Adaptado de Boletín Especial N° 27 (p. 101) por (INEI, 2022))

El agua destinada al consumo de la población proviene de dos manantiales cercanos entre sí, situados a latitudes de 17° 18' 527 y longitudes de 70° 19' 385. El manantial más elevado se encuentra a 3324 m.s.n.m, mientras que el otro está a 3310 m.s.n.m. El agua se canaliza desde estos puntos hasta dos pozos ubicados frente al pueblo y luego se distribuye a los hogares a través de un sistema de tuberías. Para asegurar su calidad biológica, se le añade hipoclorito de calcio.

**Figura 2**

*Captación de agua del manantial*



*Nota.* Adaptado de (Google maps, s.f.) [Vista Satelital Mapa de Distrito de Huanuara].

## Clima

La zona tiene un clima frío y seco, la humedad relativa media histórica es del 60,3%, alcanzando un máximo de 88,2% en febrero y un mínimo de 42,1% en julio. La evaporación promedio es de 126,6 mm, con picos de 240 mm en diciembre y enero, y mínimos de 42,1 mm en junio y agosto. La precipitación media es de 18,43 mm, variando entre 194,38 mm y 0,09 mm. La presión atmosférica promedio es de 545 mmHg. (Mamani López, 2014)

### 2.2.2. Calidad del agua del manantial

**Tabla 5**

*Análisis fisicoquímico de la muestra de agua sin tratar*

Parámetros	Unidades	Norma DIGESA	Medida muestra
pH	-	6,5 a 8,5	7,4
Turbidez	UNT	5	0,4
Conductividad	$\mu\text{g cm}^{-1}$	1500	1207,0
Alcalinidad soluble	$\text{mg L}^{-1} \text{CaCO}_3$	-	124,7
TDS	$\text{mg L}^{-1}$	1000	603,5
Cloruros	$\text{mg L}^{-1} \text{Cl}^-$	250	162,7
Sulfatos	$\text{mg L}^{-1} \text{SO}_4^{2-}$	250	240
Dureza total	$\text{mg L}^{-1} \text{CaCO}_3$	500	416
Arsénico	$\text{mg L}^{-1} \text{As}$	0,01	0,5161
Calcio	$\text{mg L}^{-1} \text{Ca}^{2+}$	-	118,2
Sodio	$\text{mg L}^{-1} \text{Na}^{+1}$	200	122,3
Magnesio	$\text{mg L}^{-1} \text{Mg}^{2+}$	-	27,91
Potasio	$\text{mg L}^{-1} \text{K}^{1+}$	-	13,51
Boro	$\text{mg L}^{-1} \text{B}$	1,500	4,70
Oxígeno disuelto	$\text{mg L}^{-1} \text{O}_2$	-	8,0
Hierro	$\text{mg L}^{-1} \text{Fe}$	0,3	<0,3

*UNT: unidad nefelometría de turbidez*

*Nota.* Adaptado del reglamento de calidad del agua para consumo humano (p.28), por DIGESA, 2010

### 2.2.3. Arsénico

El nombre arsénico (As) proviene de la palabra griega arsenikon, que significa oropimento amarillo. (Karungamye, et al., 2023)

Es omnipresente en el medio ambiente y altamente tóxico para toda forma de la vida, es un metaloide cristalino, un elemento natural con características intermedias entre metales y no metales. Es el vigésimo elemento más abundante en la corteza terrestre, el decimocuarto en el agua de mar y el duodécimo en el cuerpo humano. (Singh, Parihar, & Pratap, 2015)

### 2.2.4. Química del arsénico

Es un metaloide con múltiples isótopos que varían en coloración entre amarilla, gris y negra; siendo la forma gris la más prevalente. Este elemento, con número atómico 33, tiene aplicaciones industriales significativas y se encuentra en la corteza terrestre principalmente en forma de sales como arseniatos, arseniuros, sulfatos de arsénico y otros compuestos. (Sánchez, 2016)

Los compuestos de arsénico pueden clasificarse en 3 grandes grupos: inorgánicos, orgánicos y gas arsina, además existe en cuatro estados de oxidación: arsénico As V (+5), arsenito As III (+3), Arsénico As 0, y arsina As III (-3) y su solubilidad depende del pH y de contenido iónico, entre ellos el As V es la forma más estable. Los arsenicales inorgánicos son más tóxicos que los orgánicos tóxicos que As V, ácido dimetilarsinoso y ácido monometilarsinoso, son más tóxicos que sus compuestos originales. (Singh, et al., 2015)

Arsénico (V): Se encuentra como oxianiones del ácido arsénico, mientras que el As(III) se encuentra como ácido arsenioso. El Arsenito es la especie predominante en ambientes anaeróbicos, mientras que el arseniato ocurre en ambientes aeróbicos. (Karungamye, et al., 2023)

Arsénico (III): El arsenito es entre 20 y 60 veces más tóxico que el arsénico (V), además es más móvil que el arseniato y termodinámicamente más estable para reducir las condiciones del agua subterránea. (Karungamye, et al., 2023)

### **2.2.5. Adsorción del arsénico**

Durante el proceso de adsorción del arsénico, principalmente en forma de arseniato, es transportado desde la fase inicial hacia una fase final, conocida como adsorbato, mediante el cual es eliminado del agua superficial. El adsorbente en este caso son las partículas sólidas de oxi-hidroxido de hierro, donde se incrusta el arseniato. (Diéguez Ramírez, 2020)

El arsénico se adsorbe en características superficiales de varios adsorbentes, en medios especiales como:

- Carbón activado
- Alúmina activada
- Adsorbentes de óxidos de hierro

### **2.2.6. Efecto del tipo de hierro**

Los estudios muestran que la limadura de hierro es generalmente más eficaz que los clavos de hierro para la eliminación de arsénico. Las muestras de hierro de diferentes orígenes pueden comportarse de manera distinta en este proceso. Factores como el área de superficie del hierro, sus impurezas, la presencia de óxido y los recubrimientos superficiales influyen en la eficiencia del hierro en su forma de valencia cero para remover arsénico.

El área superficial de un material es vital para la adsorción, ya que influye en el número de sitios disponibles para atrapar contaminantes. A mayor superficie de hierro, mayor es la tasa de eliminación de arsénico. Además, las partículas más pequeñas de hierro tienen mayor reactividad con el arsénico, aumentando la tasa de eliminación. Por lo tanto, el tamaño de las partículas de hierro es crucial para la eficacia de la adsorción e interacción con los contaminantes. Sin embargo, algunos otros estudios sugieren que la eliminación del arsénico no solo depende del área superficial, la abrasión mecánica y el tipo de óxido. (Karungamy, et al., 2023)

Se deben tener en consideración, los factores ambientales como la temperatura y el pH, que pueden tener un impacto en la eliminación de arsénico.

### 2.2.7. Óxidos de hierro

Los óxidos de hierro, compuestos de hierro y oxígeno, son los materiales más comunes que se encuentran en la naturaleza y se utilizan en muchos procesos geológicos y biológicos. Generalmente, el hierro en los óxidos de hierro se encuentra en dos estados de oxidación,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ . Por tanto, los materiales formados a partir de iones  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  son de naturaleza magnética. Los tipos de óxidos de hierro más considerados por la bibliografía son: óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) y goethita ( $\text{-FeO(OH)}$ ).

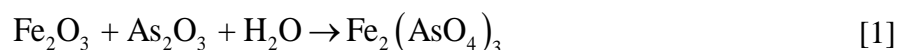
Mecanismo de adsorción con óxidos de hierro

El mecanismo de eliminación de arsénico se debe principalmente a la adsorción espontánea y la coprecipitación de arsénico con óxidos o hidróxidos de hierro (II) y hierro (III), que se forman in situ durante la oxidación (corrosión). (Abedin, Katsumi, Inui, & Kamon, 2011)

La adsorción del arsénico en óxidos de hierro se basa en varios mecanismos:

1. Adsorción superficial: El arsénico se adhiere a la superficie de los óxidos de hierro mediante enlaces químicos, formando complejos de superficie.
2. Intercambio iónico: Los aniones de arsénico pueden reemplazar a los aniones en la superficie del óxido de hierro.
3. Formación de complejos de superficie: El arsénico forma enlaces fuertes con los grupos hidroxilo en la superficie de los óxidos de hierro.

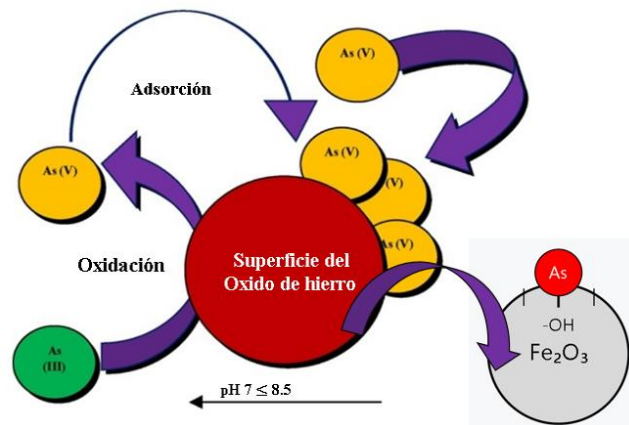
La estequiometría específica del mecanismo para remover As, puede variar dependiendo de las condiciones exactas de la reacción y los compuestos involucrados. Sin embargo, la reacción típica es:



el óxido de hierro  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  reacciona con el óxido de  $\text{As}_2\text{O}_3$  presente en la solución, produciendo el compuesto de hierro-arsénico  $\text{Fe}_2(\text{AsO}_4)_3$ , que es un sólido que puede precipitar o adsorberse de la solución.

### Figura 3

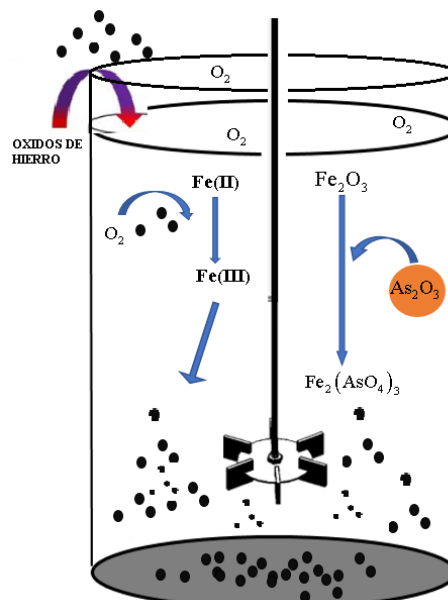
Mecanismo de la adsorción del arsénico por óxidos de hierro



Nota. Adaptado de *Iron oxide and its modified forms as an adsorbent for arsenic removal: A comprehensive recent advancement [Óxido de hierro y sus formas modificadas como adsorbente para la eliminación de arsénico: Un avance reciente e integral]* por. Siddiqui, Sh et al., 2017, Process Safety and Environmental Protection

### Figura 4

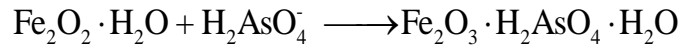
Mecanismo de la precipitación del arsénico por adsorción de óxidos de hierro



Nota. Adaptado de *Remoción de arsénico de agua de pozo para el consumo humano del caserío Casa Blanca - Mórrope empleando hierro y ácido cítrico (tesis de pregrado)*, por Carranza Luliquis et al., 2020.

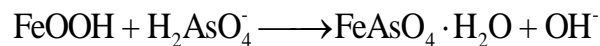
Los mecanismos de adsorción y reacciones para la adsorción de As(V)

- La hematita: posee sitios activos en su superficie que pueden adsorber iones de arseniato ( $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  y  $\text{HAsO}_4^{2-}$ )



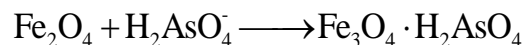
Aquí, el arseniato se une a los grupos hidroxilo en la superficie de la hematita formando un complejo adsorbido.

- La goethita tiene una gran capacidad de adsorción debido a su superficie hidroxilada.



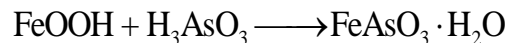
Aquí, el ion arseniato se adsorbe a la superficie de la goethita desplazando un ion hidroxilo

- La magnetita también adsorbe arseniato, aunque con menos eficiencia comparada con la goethita



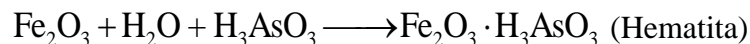
Los mecanismos de adsorción y reacciones para la adsorción de As(III)

- La goethita, el As III siendo menos cargado, se adsorbe de manera diferente, formando complejos neutros



En esta reacción, el ácido arsenioso se une a la superficie de la goethita sin desplazar iones hidroxilo

- Hematita y magnetita, el As III puede adsorberse a través de interacciones superficiales menos estables



### 2.2.8. Efectos del arsénico en la salud

Los impactos del arsénico en la salud van más allá del cáncer, abarcando una gama amplia de efectos negativos no relacionados con el cáncer. Estos incluyen enfermedades cardiovasculares, hipertensión, problemas respiratorios, neurológicos, hepáticos y renales, pérdida de memoria, abortos espontáneos y partos prematuros, bajo peso al nacer, enfermedades como el pie negro, anemia e infertilidad masculina. Estos problemas están

estrechamente ligados a la exposición crónica al arsénico en concentraciones bajas. Además, la exposición al arsénico a través del agua potable puede desencadenar neuropatía periférica y afectar la audición, la visión y las funciones sensoriales del cuerpo. (Demissie, et al., 2024)

## REACTORES

### 2.2.9. Reactores químicos

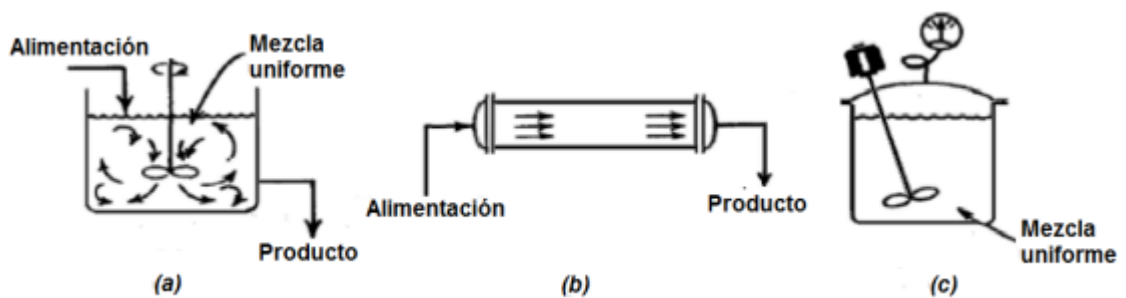
Un reactor químico está diseñado para realizar diversas mezclas y composiciones en su interior, produciendo productos óptimos. Para su diseño, es crucial considerar sus dimensiones (altura, ancho, etc.), el tipo de agitador, los reactantes y el material de fabricación. (Levenspiel, 2004)

### 2.2.10. Tipos de reactores

Existe una variedad de reactores químicos con diferentes usos y características. Se pueden clasificar en tres tipos, los más conocidos son el reactor batch también llamado discontinuo, el reactor flujo pistón por sus siglas PFR, y el reactor CSTR denominado reactor perfectamente agitado, de los cuales cada uno es utilizado para diferentes aplicaciones y productos. (Levenspiel, 2004)

#### Figura 4

*Tipo de reactores*



*Nota.* Adaptado de *Ingeniería de las reacciones químicas* (p.106), por Levenspiel, 2004, Reverte S.A.

- (a) Los CSTR operan en un modo de flujos continuo y se usa cuando hay una demanda constante de un producto a gran escala. Este reactor tiene como finalidad funcionar

durante largos trayectos de tiempo sin interrumpir su funcionamiento. (Levenspiel , 2004)

- (b) Los PFR se caracterizan por operar de una manera ordenada el flujo del fluido respecto al mezclado o sobrepase otro elemento empleado, siendo fundamental que el tiempo de reacción dentro del reactor, sea el mismo para los distintos componentes del fluido. . (Levenspiel , 2004)
- (c) Reactor batch, discontinuo o por lotes, su operación consta de los reactivos que se agreguen con el objetivo de que se opere una buena mezcla, determinando un tiempo de agitación específico, para que reaccionen y den como resultado una óptima descarga. (Levenspiel , 2004)

### 2.2.11. Ecuación general de diseño de un reactor discontinuo

Levenspiel (2004), menciona que para diseñar un reactor es conveniente hacer un balance de materiales, se considera que es un tipo de reactor discontinuo (batch), por tanto, no tiene ingresos y tampoco salidas. Este reactor se carga con reactivos y se establece a medida que la reacción se complete en un tiempo. Por ello se tiene:

$$\boxed{\text{ENTRADA} = \text{SALIDA} + \text{GENERACIÓN (CONSUMO)} + \text{ACUMULACIÓN}}$$

El balance de materia para este reactor esta dado como:

$$\boxed{\text{GENERACIÓN (CONSUMO)} = - \text{ACUMULACIÓN}}$$

Esto se demuestra como

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad de pérdida o consumo} \\ \text{de un reactivo al reaccionar} \\ \text{dentro del volumen del reactor} \end{array} \right\} = - \left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad de acumulación del} \\ \text{reactivo dentro del volumen} \\ \text{del reactor} \end{array} \right\}$$

Expresamos primero el término de la descomposición de la especie A en la reacción dada por unidad de tiempo en un determinado volumen:

$$(-r_A)V \tag{2}$$

Donde:

$-r_A$  , velocidad de reacción de la especie A

V , volumen de reacción en el reactor

Se puede expresar al segundo término como la masa molar de acumulación de la especie A por unidad de tiempo:

$$\frac{dN_A}{dt} = \frac{d[N_{A0}(1-X_A)]}{dt} = N_{A0} \frac{dX_A}{dt} \quad [3]$$

dado  $N_{A0}$ , los moles iniciales de la especie A; donde la conversión de A es  $X_A$ ; además el tiempo de reacción está dado por  $t$ . Finalmente, la ecuación final se expresa como:

$$(-r_A)V = N_{A0} \frac{dX_A}{dt} \quad [4]$$

Esta expresión se puede reordenar y posteriormente integrar:

$$t = N_{A0} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{(-r_A)V} \quad [5]$$

La expresión [5] da el tiempo requerido para alcanzar la conversión  $X_A$ , en condiciones de operación isotérmicas o no isotérmicas; el volumen del fluido reaccionante y la velocidad quedan bajo el signo integral, porque varían durante el transcurso de la reacción. La ecuación se puede simplificar de modo que, si la densidad del líquido permanece constante: (Levenspiel, 2004)

$$t = C_{A0} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{-r_A} = \int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{-r_A} \quad [6]$$

## 2.2.11. Fenómenos que se rigen en un reactor

### 2.2.11.1 Velocidad de reacción

Factores de los que depende la velocidad de reacción (Estudio cualitativo)

- Concentración de las sustancias reaccionantes.
- Temperatura.
- Estado físico de los reactivos y grado de división.
- Influencia de los catalizadores.

#### **2.2.11.2. Tiempo de reacción**

Se refiere al tiempo promedio que una sustancia permanece en el reactor antes de salir. Es una métrica fundamental en el diseño y operación de reactores, pues afecta la conversión y la eficiencia de la reacción química.

Para un reactor discontinuo o de lote, el tiempo de reacción es simplemente el tiempo de reacción o el tiempo durante el cual los reactivos permanecen en el reactor.

#### **2.2.11.3. Dosificación o carga del reactivo**

La dosificación o carga de reactivos en diseño de reactores es fundamental para el diseño y operación eficiente de los procesos químicos. Este aspecto impacta directamente la velocidad de la reacción, la conversión de reactivos, la seguridad del proceso y la calidad del producto final.

#### **2.2.11.4. Agitación y mezcla de líquidos**

**Agitación:** La agitación es el movimiento controlado de un material dentro de un contenedor, generalmente siguiendo un patrón circular. En cambio, la mezcla implica la distribución aleatoria de dos o más fases inicialmente separadas, permitiendo que se integren entre sí. Un material homogéneo, como un tanque lleno de agua fría, puede ser agitado, pero no se considera mezclado hasta que se incorpora otro material, como agua caliente o un sólido en polvo. (McCabe, Smith, & Harriot, 2007)

**Mezcla:** La eficiencia y uniformidad de la mezcla en un reactor son cruciales para optimizar las tasas de reacción, controlar la temperatura y garantizar una distribución adecuada de los reactivos, productos y catalizadores dentro del sistema. (McCabe, 2007)

#### **2.2.11.5. Potencia de agitación**

La potencia de agitación depende de las propiedades físicas del fluido como la viscosidad y densidad del líquido (Nuñez & Udeos, 2015, citado en Mosquera & Muñoz, 2017), pero también del tipo de agitador, de su velocidad (RPM), diámetro y número de bafles (Dondé Castro, 2005).

### 2.2.12. Tanques agitados

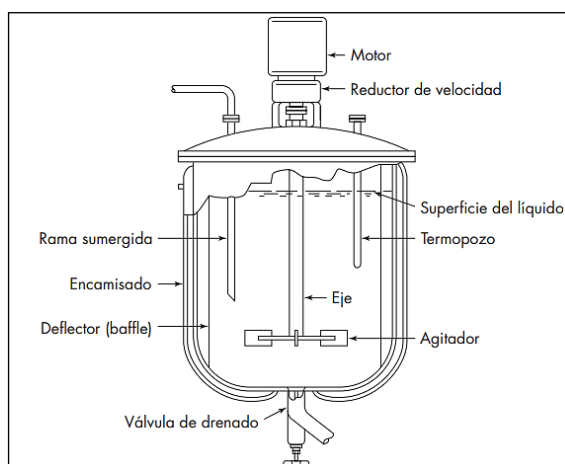
(McCabe, 2007), Los líquidos se agitan comúnmente en tanques cilíndricos con un eje vertical, que pueden estar abiertos o cerrados en la parte superior. Las dimensiones del tanque varían según el tipo de agitación requerida. En un diseño estandarizado de reactor, se adoptan las siguientes configuraciones:

- La altura del líquido es aproximadamente igual al diámetro del tanque.
- Un agitador está montado en un eje que cuelga desde la parte superior.
- El eje es impulsado por un motor, generalmente con la ayuda de una caja reductora de velocidad.

Adicionalmente, se incorporan accesorios como líneas de entrada y salida, serpentines, encamisados y puertos para equipos de medición de temperatura.

### Figura 5

*Tanque típico del proceso con agitación*



*Nota.* Adaptado de *Operaciones unitarias en ingeniería química* (p. 260), por McCabe, Smith, Harriot, 2007, McGraw-Hill

### 2.2.13. Impulsadores

Los agitadores de impulso se clasifican en dos tipos:

- Impulsores de flujo axial: producen corrientes paralelas al eje del impulsor.

- Impulsores de flujo radial: generan corrientes en dirección tangencial o perpendicular al eje.

Los tres tipos principales de impulsores utilizados para líquidos de baja a moderada viscosidad son hélices, turbinas e impulsores de alta eficiencia. Cada uno de estos tipos incluye múltiples variantes y subtipos. (McCabe, et al., 2007)

### **Agitadores de tipo hélice**

Se trata de un impulsor de flujo axial de alta velocidad diseñado para líquidos de baja viscosidad. Las hélices de menor tamaño operan a la misma velocidad que el motor, típicamente a 1150 o 1750 rpm, mientras que las hélices de mayor tamaño giran a velocidades reducidas, entre 400 y 800 rpm. (Bustillos Alvarez & Obando Tapia, 2021). La rotación del impulsor se orienta para dirigir el líquido hacia abajo, creando corrientes de flujo que mantienen esta trayectoria hasta que alcanzan el fondo del tanque. Las hélices generalmente no exceden las 18 pulgadas de diámetro, sin importar el tamaño del tanque. (Blas Camones , Bravo, & Effio, 2022)

**Tabla 6**

*Características del agitador hélice*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Usos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Son eficaces para tanques de gran tamaño</li> <li>▪ Poco costoso, sencillo y compacto.</li> <li>▪ La homogenización del líquido es efectiva porque el movimiento del impulsor arrastra el líquido estancado, integrándolo en el flujo.</li> <li>▪ Rapidez de maniobra obteniéndose un perfecto mezclado final.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No son adecuados para líquidos con alta viscosidad.</li> <li>▪ No previenen la sedimentación.</li> <li>▪ Su eficacia depende de la forma del cilindro, ya que esta influye en la homogenización mediante las corrientes generadas, afectando así su eficiencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Líquidos de baja viscosidad.</li> <li>▪ Preparación de reactivos químicos como coagulantes, hidróxido de sodio, cal viva, cal apagada, antiespumantes, nutrientes, entre otros.</li> </ul>

*Nota.* Adaptado de *Tipos de agitadores* (p.1-3), por Vazquez, 2015, Instituto Politécnico Nacional

## Figura 6

### *Tipos de agitadores hélice*



*Hélice de tres hojas Hélice de cuatro hojas inclinada Hélice cubierta*

*Nota.* Adaptado de, *Tipos de agitadores* (p.1-3), por Ramirez Alpizar, 2015, Instituto Politécnico Nacional

### **Agitadores de tipo turbina**

Los agitadores tipo turbina son apropiados para una amplia variedad de viscosidades y producen corrientes radiales y tangenciales. Por esta razón, se suelen utilizar placas deflectoras para prevenir la formación de vórtices y controlar las turbulencias.

Este tipo de agitador generalmente tiene múltiples palas cortas, que pueden ser rectas o curvas, y orientadas en forma inclinada o vertical. Funcionan a velocidades medias entre 100 y 300 rpm, y a velocidades altas entre 300 y 1000 rpm, girando en un eje montado en el centro del tanque. (Bustillos Alvarez, et al., 2021)

El diámetro del impulsor puede variar entre un 30 y un 50 % del diámetro del tanque.

**Tabla 7**

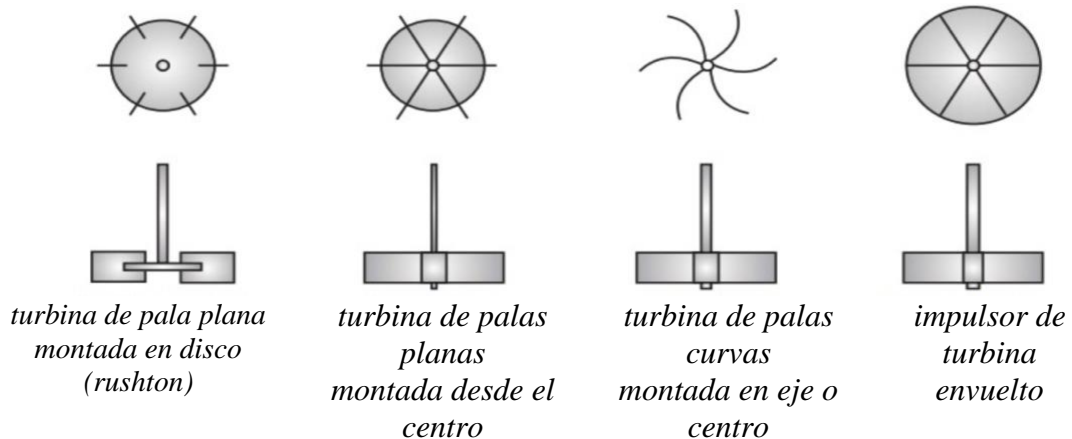
*Características de agitadores turbina*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Usos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Son buenos para líquidos con varias viscosidades.</li> <li>▪ Buen mezclador de gases en líquidos.</li> <li>▪ Economiza el uso de energía” debido al movimiento de los alabes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Más costosos que el agitador de hélice debido a que utiliza equipos adicionales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ En líquidos poco viscosos, producen corrientes intensas, que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado.</li> <li>▪ Disuelve gas en líquidos.</li> <li>▪ Preparación de sales, salmueras, emulsiones, jarabes.</li> </ul>

*Nota.* Adaptado de *tipo de agitadores* (p.1-4), por Ramirez Alpizar, 2015, Instituto Politécnico Nacional

**Figura 7**

*Tipos de agitadores turbina*



*Nota.* Adaptado de *Turbine Agitators*, por Engineer's, 2020, Team engineers group,

### **Agitadores de tipo pala**

Las paletas giran a velocidades bajas o moderadas en el centro del tanque, creando movimientos radiales y tangenciales en el líquido. A menos que estén inclinadas, no generan movimiento vertical relativo al agitador. Las corrientes de líquido resultantes se dirigen hacia la pared del tanque y luego fluyen hacia arriba o hacia abajo. (Nuñez Estrella & Udeos Zabala, 2015)

Un flujo que combina componentes axiales y radiales es efectivo en procesos que requieren mantener sólidos en suspensión y transferir una alta potencia al producto. La longitud total de un impulsor de paletas abarca típicamente entre el 50% y el 80% del diámetro interno del tanque, mientras que el ancho de las paletas varía entre 1/6 y 1/10 de su longitud. (Bustillos Alvarez, et al., 2021)

**Tabla 8**

*Características de agitadores tipo pala*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Usos</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Las paletas pueden ser diseñadas para ajustarse a la geometría del fondo del tanque.</li><li>▪ Previenen la acumulación de sólidos en las superficies de transferencia de calor.</li><li>▪ Mueven o arrastran el material mezclado alrededor del recipiente.</li><li>▪ Son los agitadores más simples de operar.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ No son eficaces para mezclar de manera óptima.</li><li>▪ Operan a velocidades relativamente bajas.</li><li>▪ Requieren ser complementados con otros tipos de agitadores para mejorar su desempeño.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Manipulación de materiales cristalinos delicados.</li><li>▪ Aplicaciones en la industria bioquímica.</li><li>▪ Usos comunes en la industria alimentaria.</li><li>▪ Mezcla de líquidos que se mezclan fácilmente.</li><li>▪ Disolución de sólidos en productos.</li></ul>

*Nota.* Adaptado de *Tipos de agitadores* (p.1-3), por Vazquez, 2015, Instituto Politécnico Nacional

## Figura 8

### Tipos de agitadores de pala



Nota. Adaptado de *Operaciones unitarias en ingeniería química* (p.262), por McCabe, et al., 2007, McGraw-Hill

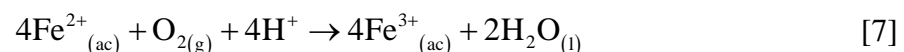
### 2.3. Definición conceptual

**Diseño:** Es la ciencia que implica esencialmente la creación de un mecanismo el cual involucre el tamaño, el volumen del medio, para una cantidad determinada de producto en medios determinados de operación. (Treybal, 1997)

#### Adsorción:

Consiste en la transferencia de masa donde una sustancia es transportada desde una fase líquida a una superficie sólida y se retiene por fuerzas químicas y físicas. La adsorción se basa en la interacción de partículas sólidas con el medio estacionario, y su eficiencia aumenta con el área superficial del sólido con el medio estacionario, y su eficiencia aumenta con el área superficial del sólido. Ejemplos de adsorbentes que pueden retener arsénico incluyen óxidos de hierro y alúmina activada. (Hernández Tapia, 2007)

**Hierro:** El hierro está presente en soluciones acuosas en un estado de oxidación de +2 (ferroso) además como +3 (férrico). Por otro lado, en presencia de aire el  $\text{Fe}_{(\text{ac})}^{2+}$  tiende a oxidarse a  $\text{Fe}_{(\text{ac})}^{3+}$ . (Abedin, Katsumi, Inui, & Kamon, 2011)



**pH:** Indica el grado de acidez o alcalinidad de una solución que depende de la cantidad de iones de hidrógeno o iones-OH. El control del factor pH va de 1 a 14, siendo 7 neutral. (Alpizar Antillón, 2006)

**Óxidos de hierro:** Son minerales nuevos que se forman a partir de la transformación de rocas y suelos porque no están relacionados química o estructuralmente con los silicatos. Se presentan como óxidos libres, estos óxidos de hierro en los suelos son importantes ya que a menudo no tienen existencia habitual en el suelo. (Acevedo & Ortiz , 2004)

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Planteamiento metodológico

##### 3.1.1. Tipo, nivel y diseño de la investigación

**Tipo:** El trabajo de investigación es de tipo aplicada, se enfoca en aplicar conocimientos científicos para resolver un problema práctico. En este caso, se busca desarrollar un sistema de tratamiento de agua que reduzca eficazmente la concentración de arsénico en aguas de consumo humano en una comunidad específica.

**Nivel:** Investigación experimental, se realizan experimentos controlados para evaluar la eficacia de un reactor en la adsorción de arsénico utilizando óxidos de hierro. Esto implica la manipulación de variables independientes como la masa de óxido de hierro y el tiempo de reacción para observar su efecto en la reducción de arsénico.

**Diseño de la investigación:** Se basa en la construcción del diseño experimental factorial ( $2^2$ ) con 4 puntos estrella y 3 puntos centrales, totalizando 11 experimentos. Este diseño se emplea para explorar los efectos y las interacciones entre las variables independientes (masa de óxido de hierro y tiempo de reacción) sobre la variable dependiente (concentración de arsénico), con base en el diseño y operación del reactor químico discontinuo.

#### 3.2. Población y muestra

Se tomó las muestras de agua representativa y estudiada de dos hogares y de la I.E. San Agustín, se tomó como base la guía técnica peruana ISO 5667-3-2001 para la preservación y manejo adecuado de muestras.

La ubicación satelital es: Hogar 1 (-17.313184, -70.322790), Hogar 2(-17.313639, -70.322067) e I.E San Agustín (-17, 314436, -70,323634).

La figura siguiente ilustra la ubicación donde se realiza la toma de muestra:

## Figura 9

*Ubicación de la toma de muestra del agua a tratar*



*Nota.* Los puntos de coloración roja, indican los 3 lugares de donde se tomó la muestra de agua.

Se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica del agua muestreada según las normas técnicas peruanas, tanto en el sitio de muestreo como en el laboratorio de fisicoquímica de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann de Tacna.

### 3.3. Equipos y materiales

#### Equipos

- 01 estufa
- 01 balanza analítica
- 01 pH metro- portátil
- 01 kit de arsénico, marca Palintest - Water Analysis Technologies
- 01 espectrofotómetro UV-visible doble haz, marca PEAK INSTRUMENTS – serie T-9200s
- 01 Test de Jarras Digital, marca DAIHAN Científic modelo “JT-M6C”
- 01 kit medidor portátil – Multiparametro de Environmental Express PCD380

## **Materiales**

- 08 vasos precipitados de 1000 mL
- 06 vaso de precipitado de 2000 mL
- 04 varilla de vidrio
- 04 fioles de 500 mL, 1L
- 06 fioles de 250 mL, 50 mL
- 04 pipeta de 10 ml, 20 ml
- 06 matraces de 250 ml, 500 ml
- 06 vaso precipitado de 100 ml
- 03 probetas de 50ml, 1L
- 02 micropipetas de 1mL
- 50 envases de 1L estériles (conservado de muestra)
- 02 baldes de plástico de 5L, 20L
- 10 bidones o galones para almacenar agua de 20L
- 05 llaves de paso pequeñas (válvulas de plástico) de 3/4"
- 05 siliconas
- 01 pistola de silicona
- 01 tubería de PVC de 3/4"
- 03 codos de 3/4"
- 02 llaves tipo jardín de plástico
- 02 bidones de agua potable de 20L
- 01 arco sierra
- 01 pote de pegamento para PVC
- 01 tarraja hembra de 3/4"
- 05 pegamentos (súper tris)
- 04 pliegos de lija
- 05 cinta teflón
- 01 caudín para soldar
- 01 wincha de 5 m
- 02 kit de cuidado de seguridad personal (guantes, lentes, respirador, zapatos)
- 01 guardapolvo

- 02 imán
- 20 pliegos de papel filtro
- 01 filtro de agua de polietileno

### **Reactivos**

- 650 litros de la muestra de agua
- 05 kg de birutas de óxidos de hierro (carpintería metálica)
- 30 L de agua destilada
- 20 L de agua desionizada
- Reactivos para determinar el hierro (Reactivo de hierro FerroVer para muestra de 10mL– Marca HACH)
- 06 sachet de soluciones Buffer (p: 10; 7 y 4)
- Hidróxido de sodio
- Ácido clorhídrico al 0,1 y 1 N
- Hidróxido de sodio al 0,1 y 1 N
- Ácido nítrico al 0,1 y 1 N
- Algodón de farmacia

## **3.4. Procedimiento de las pruebas experimentales**

### **3.4.1 Acondicionamiento de la muestra**

Preparación de los óxidos de hierro

El óxido de hierro que se utilizó en la presente tesis, se constituye de las partículas de acero industrial o denominadas como virutas, en si es un desecho particulado que se recolecto de varios talleres de carpintería metálica, que se ubican cerca de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, donde soldadores trabajan y utilizan distintos tipos de hierro, aceros y aleaciones. Se pidió la autorización de los dueños de los talleres, para poder recolectar las muestras de óxidos de hierro. Luego en laboratorio se realizó una secuencia de acontecimientos para la limpieza y clasificación de tamaño en una serie de tamices o cedazos, que se clasifican por una serie de número de malla (N°30 a N°200), para este caso, a partir de las pruebas preliminares que se obtuvieron (Ver Anexo 11), se utilizó malla N°40, ya que tiene una mejor remoción de arsénico a diferencia de las otras mallas. (Ver Anexo 12)

Mamani López, (2014), Según el estudio del análisis por espectrometría de fluorescencia de rayos X de muestras de los óxidos de hierro, se obtuvo:

**Tabla 9**

*Análisis de muestra de óxidos de hierro*

Análisis FXR	Resultado, %
SiO <sub>2</sub>	1,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	93,9
TiO <sub>2</sub>	0,05
MnO	0,39
Otros (*)	1,41

(\*) SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Na<sub>2</sub>O, MgO, CaO, Cl, Sr, Ba, Cu, Zn, Ni, Cr, Co, Mo

*Nota.* Adaptado de *Estudio de remoción de arsénico del agua de consumo humano del distrito de Huanuara - Tacna, Empleando Fe<sup>0</sup>* (p.121), por, Mamani López, 2014.

Los compuestos de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, MnO, y TiO<sub>2</sub>, son los componentes más relevantes en la Tabla 9 para la remoción de arsénico en el agua. El Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es particularmente el más eficaz (93,9 %), especialmente para remover As(V), el MnO puede oxidar As(III) a As(V), y hace que sea más fácil de adsorber.

### 3.4.2. Análisis preliminares

Se realizaron estudios preliminares, en el equipo de prueba de jarras, se trabajó con un volumen de muestra problema del agua de Huanuara de 500 mL y 1 L, en condiciones naturales como la temperatura y pH (no se alteró su estado). Los parámetros que se utilizaron para los análisis fueron tomados de referencias de estudios ya realizados. Se efectuaron una serie de análisis. (Ver Anexo 11)

- A. Determinación del material óptimo de óxido de hierro
- B. Determinación del número de malla óptimo variando la masa (dosis) de óxido de hierro
- C. Determinación del tiempo de reacción óptimo
- D. Determinación de la velocidad de agitación óptima para remover arsénico
- E. Determinación de la remoción de As con óxido de hierro reutilizado (adsorbido de As)

De los resultados de los análisis preliminares, queda como variables experimentales la masa de óxido de hierro y el tiempo de reacción. A partir de estas condiciones preliminares se planteó un diseño experimental  $2^2$  + punto estrella, con el propósito de evaluar las variables de respuesta: concentración de arsénico residual total en mg/L y la concentración de hierro residual total en mg/L, además, como complemento, los resultados del pH y el porcentaje de remoción de cada prueba. (Ver Anexo 11)

F. Determinación del arreglo experimental y resultados para la remoción de arsénico total, hierro residual y pH residual

Una vez encontradas las condiciones óptimas de operación en escala de prueba de jarras, se procedió a realizar la construcción y análisis del diseño experimental para la realización de las pruebas en el reactor químico discontinuo.

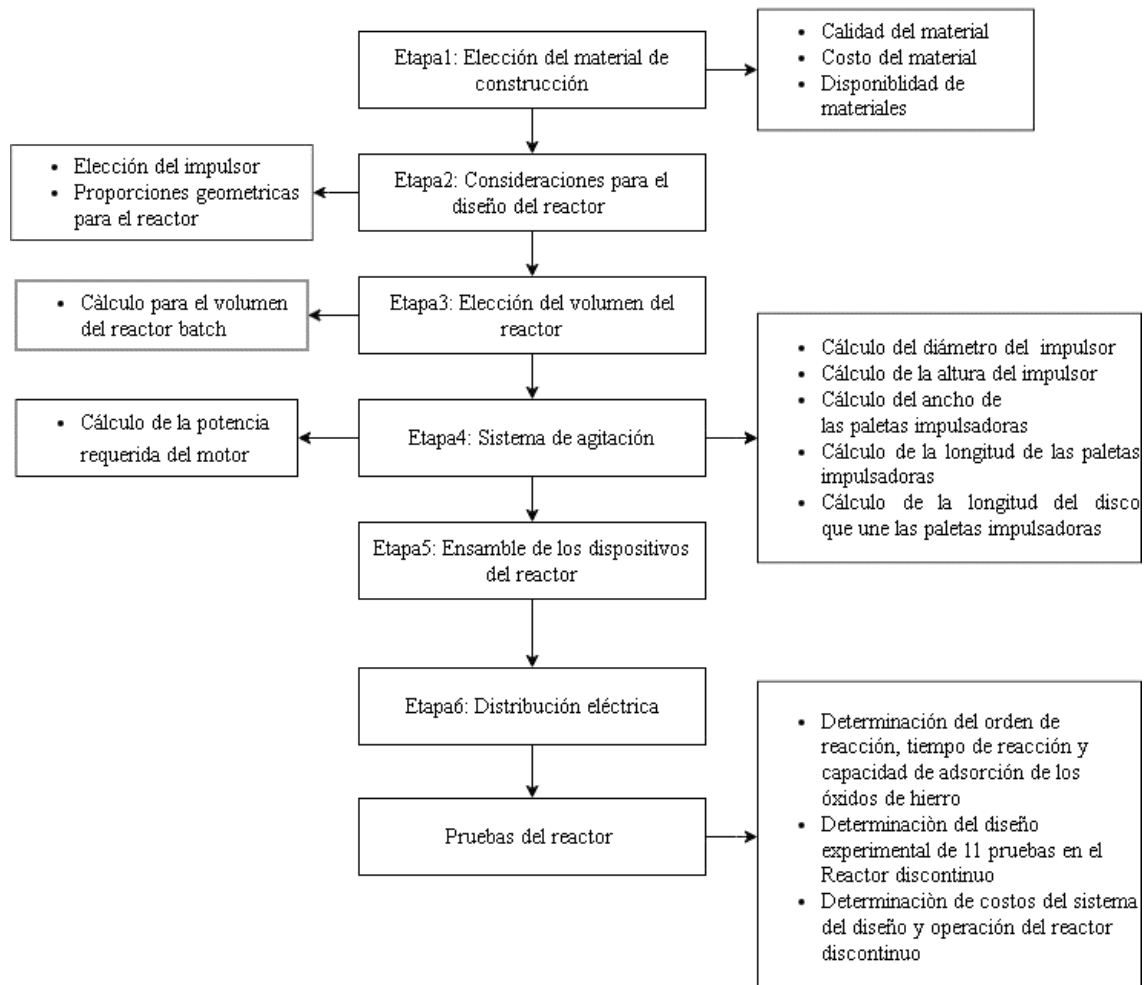
**3.4.3. Desarrollo del diseño del reactor químico discontinuo batch para la remoción de arsénico**

Para el diseño del reactor se tuvieron en consideración los criterios específicos descritos en referencias bibliográficas, donde involucran una serie de ecuaciones para el desarrollo del diseño.

Para el diseño del reactor discontinuo, conlleva los siguientes pasos:

**Figura 10**

*Diagrama de etapas para el diseño del reactor discontinuo*



*Nota.* Diagrama de etapas para el diseño del reactor discontinuo, considerando criterios específicos, lo cual facilita un desarrollo ordenado.

### **Etapa 1: Selección del material de construcción**

- Calidad del material
- Costo del material
- Disponibilidad de materiales

### **Etapa 2: Consideraciones para el diseño**

Para la selección del tipo de rodete o impulsor, se tomó en cuenta la siguiente tabla 10:

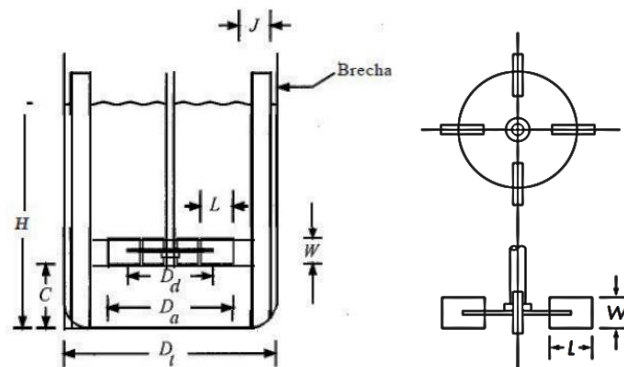
**Tabla 10***Selección del impulsor*

<b>Servicio</b>	<b>Impulsor</b>	<b>Rango</b>	<b>Diámetro del tanque a diámetro del impulsor</b>	<b>Impulsores y posición de estos</b>
Aplicaciones con alta viscosidad	Turbina	100%	1.5:1 hasta 2.5:1	Sencillos o múltiples
	Propala Paleta	5% De 75% a 100%		
Hasta viscosidad de 1,00,000cps				
Mezclado	Turbina	De 50% a 100%	3:1 hasta 6:1	Sencillos o múltiples
	Propala Paleta	100% 15%		
Hasta volumen de 50m <sup>3</sup>				
Transferencia de calor	Turbina	100 %	Relacionado con otros servicios	Sencillos o múltiples. Impulsor opuesto a la superficie de transferencia cuando se usan serpentines
	Propala Paleta	5% 25%		
Hasta volumen de 5000m <sup>3</sup>				
Reacciones en soluciones	Turbina	100%	2.5:1 hasta 3.5:1	Sencillos o múltiples
	Propala Paleta	50% 5%		
Hasta volumen de 50 m <sup>3</sup>				

*Nota.* Adaptado de *Manual del Ingeniero Químico* (p.220), por (Valiente & Noriega, 1993), Limusa.

**Figura 11**

*Proporciones geométricas para un reactor batch*



*Nota.* Adaptado de *Operaciones unitarias en ingeniería química* (p.263) por McCabe y Smith, 2007, McGraw Hill

$\frac{Da}{Dt} = \frac{1}{3}$	$\frac{H}{Dt} = 1$	$\frac{J}{Dt} = \frac{1}{12}$	$\frac{Dd}{Da} = \frac{2}{3}$
$\frac{E}{Dt} = \frac{1}{3}$	$\frac{W}{Da} = \frac{1}{5}$	$\frac{L}{Da} = \frac{1}{4}$	

[8]

Donde:

$Da$  = Diámetro del impulsor

$Dt$  = Diámetro del tanque

$H$  = Altura óptima del líquido

$J$  = Ancho de los deflectores (de ser necesarios)

$W$  = Ancho de las paletas impulsoras

$L$  = Longitud de las paletas impulsoras

$Dd$  = longitud del disco que une a las paletas impulsoras

$E$  = Altura del impulsor desde el fondo del tanque

### Etapa 3: Elección del volumen del reactor

- **Cálculo para el volumen del reactor batch**

La altura del reactor se calculará con la siguiente ecuación:

$$H_C = \frac{4V_C}{\pi D_C^2} \quad [9]$$

$H_C$ , longitud del tanque, cm

$V_C$ , volumen del tanque, L

$D_C$ , diámetro del tanque, cm

- **Cálculo del volumen de seguridad**

El volumen de seguridad se calculará considerando un porcentaje del volumen operativo del reactor, respecto a un volumen menor que su capacidad máxima. Este cálculo corresponderá a una altura adicional  $H_S$ , la cual se sumará a la altura inicial del cilindro  $H_C$  para determinar la altura final del reactor.

### Etapa 4: Sistema de agitación

#### **Cálculo del diámetro del rodete (impulsor)**

El cálculo del diámetro del impulso debe estar en unidades de cm:

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \Rightarrow D_a = \frac{D_t}{3} \quad [10]$$

donde,  $D_a$  = Diámetro del impulsor

#### **Cálculo de la altura optima del rodete (impulsor)**

La altura optima del impulsor tiene como objetivo situar a una determinada distancia (cm) con la del fondo del recipiente del agitador, se calcula mediante:

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} \Rightarrow E = \frac{D_t}{3} \quad [11]$$

donde  $E = D_a$

### **Cálculo de las dimensiones de las paletas**

#### **Cálculo del ancho de las paletas**

El cálculo del ancho debe estar en unidades de cm:

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \Rightarrow W = \frac{D_a}{5} \quad [12]$$

#### **Cálculo de la longitud de las paletas**

El cálculo de la longitud debe estar en unidades de cm:

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \Rightarrow L = \frac{D_a}{4} \quad [13]$$

### **Cálculo para la Potencia requerida de motor**

Para determinar la potencia requerida, depende de:

#### **a) Determinación del Número de Reynolds.** (Treybal, 1997)

Se caracteriza los movimientos de un fluido, además de ser una expresión adimensional, donde se relaciona la viscosidad, densidad, la dimensión típica de un flujo y la velocidad. La turbulencia de un fluido presente o ausente donde hay una agitación se relacionan con el número de Reynolds, esta se expresa de la siguiente:

$$N_{Re} = \frac{D_t^2 N \rho}{\mu} \quad [14]$$

donde:

$D_t$  = diámetro del reactor, m

$N$  = número de revoluciones por segundo, rps

$\mu$  = viscosidad presente de la mezcla del fluido, kg/ms

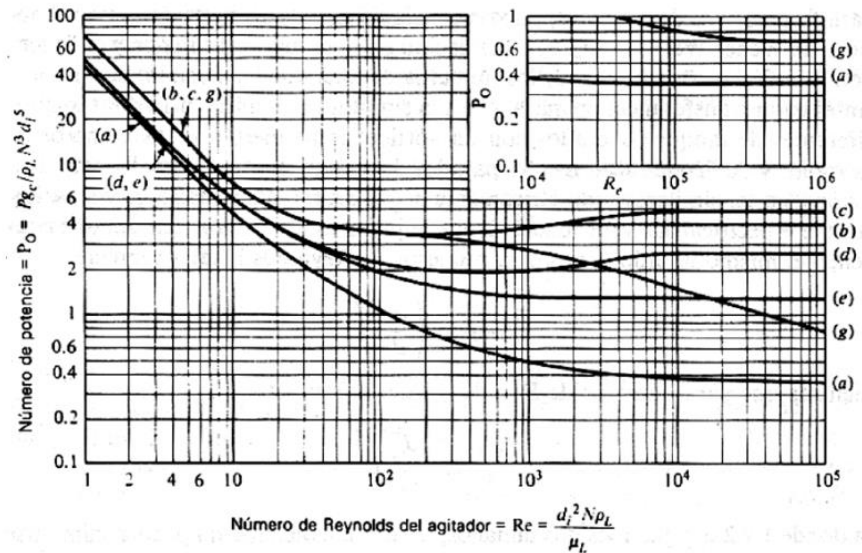
$\rho$  = densidad del fluido, kg/m<sup>3</sup>

El número de Reynolds, determina si un fluido es laminar o turbulento. Se considera que la relación del régimen turbulento y el régimen laminar no es de manera inmediata, respecto a una zona de transición. Esta se expresa:

- régimen laminar:  $Re < 10$
- régimen de transición:  $10 < Re < 10,000$
- régimen turbulento:  $Re > 10,000$

**Figura 12**

Gráfica para hallar el número de potencia en función al número de Reynolds



Nota. Adaptado de *Operaciones de transferencia de masa* (p.172), por Tryebal, 1997, McGraw Hill

**b) Cálculo del número de potencia ( $N_p$ )**

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 Da^5} \quad [15]$$

donde:

$Da$  = Diámetro del agitador, m

$N$  = Número de revoluciones, rps

$\rho$  = Densidad del fluido,  $kg/m^3$

$P$  = Potencia del agitador, W

De la ecuación [17], despejamos P, para determinar la potencia requerida:

$$P = N_p N^3 Da^5 \rho \quad [16]$$

### **Etapa 5: Ensamble de los dispositivos del reactor**

Comprende el montaje del reactor, acoplado los subsistemas internos y externos del reactor batch como sistemas de drenado, sistema de agitación, sistema de filtrado, sistema de almacenamiento final, conexiones de tuberías, válvulas, entre otros, incluyendo una estructura de soporte para todo el sistema que involucra al reactor discontinuo removedor de arsénico.

### **Etapa 6: Distribución eléctrica**

En este punto, comprende la implementación de un motor de engranajes, un regulador de velocidad y un transformador de voltaje para el funcionamiento del impulsor que es parte del sistema de agitación.

### **Pruebas del reactor**

Para el desarrollo de esta etapa se dividió en dos análisis; a) determinación del orden de reacción, tiempo de reacción y capacidad de adsorción de los óxidos de hierro, y b) determinación de un arreglo experimental  $2^2 + 4$  punto estrella + puntos centrales, de 11 pruebas, con el propósito de evaluar las variables de respuesta, concentración de arsénico residual total en mg/L y la concentración de hierro residual total en mg/L, además como complemento, los resultados del pH y el porcentaje de remoción de cada prueba.

#### **a) Determinar el orden de reacción, tiempo de reacción y capacidad de adsorción de los óxidos de hierro**

Esta etapa comprende el desarrollo de la puesta en marcha del reactor discontinuo; esto permitirá medir cómo cambia la concentración de reactivos y productos con el tiempo (en un volumen fijo de 20 litros, utilizando 60 gramos de óxidos de hierro), además, cada hora se tomará una muestra para su medición por As en mg/L. Estos datos ayudarán a determinar el orden de reacción y tiempo de reacción, lo que es crucial para el diseño, parte de estudios cinéticos de reacciones que se llevan a cabo en reactores químicos, generalmente a temperatura constante, se mide el cambio de la concentración de reactivos o de productos en el tiempo. (Levenspiel , 2004)

Se considera una reacción estequiometria:  $A \xrightarrow{k} P(\text{productos})$ , siendo k la constante de velocidad.

La ecuación cinética del tipo es

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A$$

Separando variables e integrando se obtiene

$$-\int_{C_{A0}}^{dC_A} \frac{dC_A}{dt} = k \int_0^t dt \quad \text{O} \quad -\ln \frac{C_A}{C_{A0}} = kt \quad [17]$$

Si al graficar la concentración de un reactivo  $\ln(C_A / C_{A0})$ , en función del tiempo, se obtiene una línea recta que pasa por el origen, esto sugiere que los datos experimentales siguen una cinética de primer orden. Sin embargo, si los datos experimentales se ajustan mejor a una curva en lugar de una línea recta, es recomendable probar con otro modelo cinético, ya que la cinética de primer orden no explicaría adecuadamente los resultados. (Levenspiel , 2004)

Asimismo, se medirá los parámetros fisicoquímicos a cada muestra. Además, de determinar la capacidad de adsorción de óxido de hierro a partir de los resultados anteriores, para hallar la adsorción para una fase sólido-líquida se pueden describir con la ecuación [18]. (Hernández, Otero, & Falcón, 2017)

$$q_0 = \frac{C_0 - C_f}{m} V \quad [18]$$

$q_0$  = concentración de soluto adsorbido por peso de adsorbente, mg/g

$C_0$  = concentración inicial de soluto en la solución, mg/L

$C_f$  = concentración de soluto en equilibrio, mg/L

$V$  = volumen de la fase líquida, L

$m$  = masa del adsorbente, g

Para determinar el porcentaje, % de adsorción, se calcula de la siguiente manera:

$$\% q_0 = \left( \frac{C_0 - C_f}{C_0} \right) \times 100 \quad [19]$$

$\% q_0$  = Porcentaje de adsorción o remoción, %

## b) Desarrollo de un diseño experimental de 11 pruebas en el reactor discontinuo

Se pone en marcha su funcionamiento del reactor discontinuo para efectuar las pruebas experimentales para la remoción de arsénico en el agua, a partir del diseño experimental:  $2^2$  puntos factoriales + 4 puntos estrella + 3 puntos centrales, además de cumplir con la concentración del hierro residual total y el pH final a límites permitidos establecidos por la norma Peruana.

### Construcción y análisis del diseño experimental

Las pruebas experimentales en el reactor discontinuo, de remoción de la concentración de arsénico en el agua, y cumplir con la concentración del hierro residual total y el pH final a límites permitidos se ajustaron para el análisis de datos experimentales, el diseño factorial  $2^2$  + 4 puntos estrella + 3 puntos centrales, estableciendo variables experimentales y de respuesta, además de seleccionar un diseño de superficie de respuesta y especificando un modelo cuadrático

**Tabla 11**

*Arreglo experimental*

Nivel	Masa de óxido de hierro, g	Tiempo de reacción, h	Variables codificadas	
			x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>
Alto	80	9	+1	+1
Medio	60	7	0	0
Bajo	40	5	-1	-1

*Nota:* Elaboración del arreglo experimental, donde se tienen variables codificadas, que se basa en tres niveles, alto (+1), medio (0) y bajo (-1), esto es con respecto a las variables experimentales.

Se registraron como variables de interés el nivel de arsénico total (mg/l) y hierro total (mg/l). El diseño experimental comprendió tres puntos centrales y un solo bloque que

incluía 11 experimentos. Los niveles de los factores fueron designados como -1 (bajo), 0 (punto central) y +1 (alto).

Donde:

$x_1$  = Masa de óxido de hierro, g

$x_2$  = Tiempo de reacción, h

**Tabla 12**

*Delineamiento estadístico del diseño experimental factorial*

		Concentración inicial del agua, mgAs/L				0,53003	
Prueba	Variables de nivel codificadas		Variables de nivel reales		Variables de Respuesta		
	Masa de FeO, g	Tiempo de reacción, h	Masa de FeO, g	Tiempo de reacción, h	Arsénico residual Total (mg/L)	Hiero residual Total (mg/L)	pH
	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$	$y_1$	$y_2$	
1	0	+ $\alpha$	60	9,82843			
2	0	- $\alpha$	60	4,17157			
3	-1	+1	40	9			
4	+ $\alpha$	0	88,2843	7			
5	+1	+1	80	9			
6	-1	-1	40	5			
7	+1	-1	80	5			
8	- $\alpha$	0	31,7157	7			
9	0	0	60	7			
10	0	0	60	7			
11	0	0	60	7			

*Nota:* Se muestra la ejecución de la matriz del arreglo experimental, donde muestra las

11 pruebas experimentales, en diferentes tiempos de reacción y masa de óxidos de hierro.

## Construcción del Modelo

Para el modelo estructural del diseño factorial  $2^2$  puntos factoriales + 4 puntos estrella + 3 puntos centrales, donde:  $x_1$  (masa de óxido de hierro en gramos) y  $x_2$  (tiempo de reacción en horas). La función del modelo empírico cuadrático propuesto es: (Lawson , Madrigal, & Erjavec, 1992)

$$y = \beta_0 + \sum_{i=0}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad [20]$$

$\beta_{ii}$  = coeficiente que explica la curvatura del factor  $x_i^2$

Para la determinación de las expresiones para los cálculos del ANOVA (análisis de varianza), se muestra a continuación:

**Tabla 13**

*Análisis de varianza.*

Fuente de variación	Confidencia de regresión	Error o residual	Total
Suma de cuadrados	<i>SSR</i>	<i>SSE</i>	<i>SST</i>
Grados de libertad	<i>k</i>	<i>n - k - 1</i>	<i>n - 1</i>
Cuadrado medio	<i>MSR</i>	<i>MSE</i>	
Estadístico o valor F	$\frac{MSR}{MSE}$		

Nota: Adaptado de *Estadística para ingeniero y científicos* (p. 630) por (Navidi, 2006), McGraw-Hill

Donde:

SSR: Suma de los cuadrados de la regresión:

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 = SST - SSE \quad [21]$$

SSE: Suma de los cuadrados de los residuos o error:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = (Y - X\hat{B})' (Y - X\hat{B}) \quad [22]$$

SST: Suma total de los cuadrados:

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = Y'Y - n(\bar{Y})^2 \quad [23]$$

Para el estadístico F o valor F:

$$F = \frac{SSR / (p)}{SSE / (n - p - 1)} \quad [24]$$

Los parámetros estadísticos para la regresión múltiple son: Coeficientes de determinación múltiple  $R^2$  y  $R^2$  ajustado. (Lawson , et al., 1992)

Donde:

$p$ : Número de coeficiente excluyendo  $\beta_0$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

$$R_{ajustada}^2 = 1 - \frac{SSE / (n - p)}{SST / (n - 1)} = 1 - \left( \frac{n - 1}{n - p} \right) (1 - R^2) \quad [25]$$

### c) Costos del sistema del diseño y operación del reactor discontinuo

Para desarrollar de los costos, comprenderá de los componentes involucrados en el sistema. Luego, se asignarán los costos unitarios basándose en los precios por unidad, también se calcularán la cantidad necesaria de cada componente. Además, se incluirán otros costos relevantes, como los de ensamblaje, operativos, energía, soporte estructural y mantenimiento general. Finalmente, toda esta información se organizará en una tabla, donde los sistemas, componentes, costos unitarios, cantidades y costos totales por tanto asegurará que todos los elementos del sistema tengan una visión clara de los costos totales.

### 3.5. Técnicas de recolección de datos

Para el análisis de las muestras se utilizaron las siguientes técnicas:

- Calidad del agua muestreada: Directrices para la preservación y manejo de muestras según la Norma Técnica Peruana ISO 5667-3-2001.

- NTP 214.003.87: Normativa sobre agua para consumo humano.
- NTP 214.025:1990 Agua Potable. Determinación del pH. Método Potenciométrico
- NTP 214.026:1999 Agua para consumo humano. Método de determinación de la alcalinidad mediante técnicas volumétricas
- NTP 350.001:1970 Tamices de ensayo. Análisis granulométrico
- EPA 200.8, Rev 5.4:1994. Determination of Trace Elements in Waters and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (Validado).2016. Análisis de Masas mediante Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-MS).

### **3.6. Técnicas para el procesamiento de datos**

- Para el registro y organización de datos, se usó la herramienta hoja de cálculo (Excel), que permitió la organización de tablas, cálculo y análisis de datos.
- Para el análisis estadístico, se hizo uso de herramientas como los softwares, Statgraphics Centurion versión XVI y Design-Expert versión 12, con el fin de identificar las variables operativas (masa de óxido de hierro, tiempo de reacción), para luego partir de la construcción del modelo matemático y que esta se relacione con el diseño experimental y se evalúen los efectos principales y las iteraciones entre los factores mencionados mediante el análisis de varianza (ANOVA) y ver cómo influyen en la eficiencia de remoción de arsénico.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Resultados del desarrollo de las etapas para el diseño del reactor discontinuo

Para el desarrollo del diseño del reactor discontinuo, comprendió de una serie de etapas, donde se involucraron consideraciones y ecuaciones para la operatividad del reactor

##### a) Etapa 1: Selección del material de construcción

##### Calidad, costo y disponibilidad del material

Para la selección de los materiales que implicaron en la construcción de todo el sistema, se hizo una comparación con distintos tipos de materiales de fabricación, se buscó que sea económico y de fácil acceso, es crucial elegir materiales que ofrezcan un buen equilibrio entre calidad, costo y disponibilidad.

- Sistema del reactor batch

**Tabla 14**

*Comparación del material para el reactor batch*

<b>Material</b>	<b>Calidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Disponibilidad</b>
Polietileno de Alta Densidad (HDPE)	Resistencia a la corrosión química y al impacto, además de tener un peso ligero	Material económico en comparación con otros plásticos	Es extremadamente común y fácil de obtener
Acero Inoxidable	Excelente resistencia mecánica y a la corrosión Su superficie dificulta la adhesión de las bacterias, resulta muy sencillo y rápido de limpiar	Material caro, debido a aplicaciones de alta exigencia, conlleva elementos en su composición como el manganeso, el níquel y el cromo	El material no es comúnmente disponible en todos los mercados, lo que puede requerir tiempo adicional para la adquisición
Acrílico	Media resistencia al impacto Resistencia a la corrosión química	Costo moderado, siendo una opción de equilibrio entre calidad y precio.	Ampliamente disponible en la mayoría de los mercados

*Nota.* Se seleccionó como material para el reactor el polietileno de alta densidad (HDPE), ya que tiene ventajas, es económico, de peso ligero y fácil de transportar, su instalación es rápida y sencilla. Costo: Aproximado entre S/15 a 20.

- **Sistema de agitación:**

**Tabla 15**

*Comparación del material para el agitador*

<b>Material</b>	<b>Calidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Disponibilidad</b>
Acero Inoxidable	Pesado pero excelente resistencia a la corrosión Ideal para aplicaciones en ambientes hostiles y agresivos	Costoso debido a su alta calidad, durabilidad, y resistencia a la corrosión	Requiere de un tiempo adicional para la adquisición
PVC	Ligero, material duradero y resistencia a la corrosión química	Material muy económico	Disponible en el mercados, fácil de obtener en diferentes formas y tamaños

*Nota.* Para el caso del agitador o impulsor, se ha optado por elegir el material de acero inoxidable, debido a sus buenas características, como se muestra en la Tabla 15, es verdad que tiene un costo mayor y es más pesado, sin embargo, el impulsor asegurará que los óxidos de hierro dentro del reactor se mezclen de manera uniforme, garantizando un contacto entre las partículas sólidas y el líquido, mejorando la calidad del producto final. Se consideró un agitador tipo turbina (Rushton), ya que tiene características adecuadas como se menciona en la Tabla 10, la fabricación del agitador se muestra en la Figura 14. Costo: Aproximado entre S/ 70 a 100.

**Figura 13**

*Agitador Rushton*



*Nota:* En la Figura 15, se muestra el agitador tipo Rushton, donde se constituye en tres partes: a) la base, que se conforma por 6 palas que se unen por un disco, b) tuercas y arandelas de presión y c) el cuerpo de la varilla.

- Para sistema de filtrado:

**Tabla 16**

*Comparación del material y composición del filtro*

<b>Material</b>	<b>Calidad</b>	<b>Costo y mantenimiento</b>	<b>Disponibilidad</b>
Cartucho de PVC	Alta, retiene partículas mayores a 50 micras	Asequible al mercado, duración de 6 meses	Materiales como PVC y algodón son fáciles de encontrar en el mercado
Filtro de Arena con Hierro de Valencia Cero	Requiere un largo tiempo de filtrado	El mantenimiento implica cambiar el material adsorbente y la arena	Depende de la disponibilidad de arena y clavos de hierro
Otros (carbon activado, piedra grava)	Buena capacidad de adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos	Costoso y requiere un cambio periódico	Comercialmente disponible en el mercado

*Nota.* Se eligió el filtro de material de PVC, el cual incluye un cartucho estándar que retiene el 99% de partículas mayores a 50 micras. Además, para asegurar un buen filtrado, se utilizó algodón y se consideró el caudal de salida de la válvula del reactor, para que tenga un buen tiempo de contacto a la hora de pasar por el filtro. Costo: Aproximado para el filtro entre S/ 45 a 65 y para el algodón entre S/ 5 a 8.

**Figura 14**

*Sistema de filtrado*



*Nota:* La duración del sistema de filtro, tiene un tiempo de vida de hasta 6 meses. Con respecto al algodón, se debe hacer un cambio semanal.

- **Para el sistema de conexiones**

Para este aspecto se consideraron las conexiones como: tuberías, válvulas y codos, se eligió trabajar con material de PVC debido a que es una opción más económica, es resistente a la corrosión química, asegurando que las tuberías y conexiones no se deterioren rápidamente, además es fácil de cortar, unir y manipular, sin embargo, no es tan resistente como el acero inoxidable el cual es más costoso. Estas conexiones parten desde la salida del reactor hacia su almacenamiento y de la misma manera para la purga de los sedimentos.

Costo: aproximado de tubería entre S/ 5 a 15; codos entre S/ 2,50 a 3; y para las válvulas entre S/ 8 a 12.

### **Figura 15**

*Sistema de Conexiones*



*Nota:* Para hacer las uniones de las tuberías con las válvulas, codos, etc., se hizo el uso de una tarraja de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, y cinta teflón para mayor eficacia.

- **Para el sistema de purga, almacenamiento y soporte de todo el sistema:**

Se utilizaron dos baldes; estos se denominaron como tanques de purga de sedimentos y tanque de almacenamiento de agua tratada, con capacidades de (18 L y 18 L), se agregó una llave de agua de PVC como salida al balde de almacenamiento.

Para el soporte de todo el sistema, se esquematizó en el software AutoCAD, (ver Anexo 15), se armó una estructura de material metálico, con tubos cuadrados de 1"x1"x1,36mm de espesor, además de la utilización de una  $\frac{1}{4}$  de una plancha de platina de 1" x  $\frac{1}{2}$ " x 1,78mm, para su instalación y armado se realizó en un taller de soldadura, con el fin de que soporte todo el peso de los anteriores sistemas.

Costo: Aproximado del tanque entre S/8 a 12, para el soporte o estructura de todo el sistema entre S/ 200 a 250.

### **Figura 16**

*Sistema de purga, almacenamiento y soporte*



*Nota:* Para dar un buen sellado a las conexiones, se utilizó cinta teflón y pegamento para PVC.

#### **b) Etapa 2: Consideraciones para el diseño del reactor discontinuo**

Büchi (2013), menciona “Para aplicaciones en grandes volúmenes o para el diseño de plantas piloto, se emplean reactores con capacidades que van desde 5 hasta 20 litros para volúmenes mayores, y de 30 a 250 litros para plantas piloto. La velocidad de agitación en estos equipos puede ajustarse en un rango que va desde 0 hasta 2400 revoluciones por minuto”. Por tanto, se utilizó un tanque reactor de 20 L, este cumple las necesidades básicas del poblador Huanuareño, respecto al consumo de agua potable por hogar.

Además, se consideró utilizar y fabricar un agitador tipo Rushton de 6 palas unidas por un disco, como se muestran sus especificaciones en la Tabla 10 y las proporciones geométricas (ver Figura 12).

#### **c) Etapa 3: Elección del volumen del reactor discontinuo**

- **Cálculo para el volumen del reactor batch**

Para el reactor que se construyó, se seleccionó un volumen de 20 litros, ya que este volumen satisface las necesidades de una familia compuesta por 2 a 3 integrantes en el distrito de Huanuara.

La altura del reactor se calculó utilizando la siguiente ecuación [9]:

$$H_C = \frac{4V_C}{\pi D_C^2}$$

$H_C$ , longitud del tanque, cm

$V_C$ , volumen del tanque, L

$D_C$ , diámetro del tanque, cm

El diámetro del tanque es de 27 cm, entonces

$$H_C = \frac{4 \times 20000 \text{ cm}^3}{\pi \times (27 \text{ cm})^2} = 34,9 \approx 35 \text{ cm} \quad [26]$$

- **Cálculo del volumen de seguridad**

Se decidió implementar un margen de seguridad, que es un factor de precaución basado en el nivel de llenado. Esto implica que el reactor debe operar a un volumen menor que su capacidad máxima, por ejemplo, al 90% de su capacidad total.

Para 10%  $V_{\text{seguridad}} = 20 \text{ L} \times 0,1 = 2 \text{ L}$

Entonces la altura de seguridad ( $H_S$ ) del reactor, usando la ecuación [9]:

$$H_S = \frac{4(2000 \text{ cm}^3)}{\pi(27 \text{ cm})^2} = 3,5 \approx 4 \text{ cm} \quad [27]$$

Esta altura de seguridad de 3,6 cm es el espacio en el cual se sumó de la altura del llenado del reactor, con el fin evitar cualquier posible derrame del líquido.

Entonces la suma total de la altura del tanque es:

$$H_C + H_S = 35 \text{ cm} + 4 \text{ cm} = 38 \text{ cm} \quad [28]$$

la altura de operación del cilindro es de 38 cm.

**Figura 17.** Dimensiones del reactor discontinuo



*Nota.* El tanque mostrado en la figura, originalmente diseñado para almacenamiento, ha sido adaptado y utilizado como reactor discontinuo para el tratamiento de agua. Con un volumen de 20 litros, y dimensiones de 38 cm de altura y 27 cm de diámetro, este tanque comercial fue seleccionado por su disponibilidad y adecuación para aplicaciones domésticas para el distrito de Huanuara.

#### **d) Etapa 4: Sistema de agitación**

Se realizó un serie de calculos para el diseño del agitador:

- **Cálculo para el diámetro del impulsor:**

$$\frac{Da}{Dt} = \frac{1}{3} \Rightarrow Da = \frac{Dt}{3}$$
$$Da = \frac{27 \text{ cm}}{3} = 9 \text{ cm} \quad [29]$$

El diámetro del impulsor debe ser de 9 cm.

- **Cálculo para la altura del impulsor:**

$$\frac{E}{Dt} = \frac{1}{3} \Rightarrow E = \frac{Dt}{3}$$
$$E = \frac{27 \text{ cm}}{3} = 9 \text{ cm} \quad [30]$$

El agitador debe estar ubicado a una distancia de 9 cm desde el fondo del reactor.

- **Cálculo para el ancho de las paletas impulsoras:**

$$\frac{W}{Da} = \frac{1}{5} \Rightarrow W = \frac{Da}{5}$$

$$W = \frac{9}{5} = 1,8 \approx 2 \text{ cm} \quad [31]$$

El ancho de las paletas impulsoras debe ser de 2 cm.

- **Cálculo de la Longitud de las paletas impulsoras:**

$$\frac{L}{Da} = \frac{1}{4} \Rightarrow L = \frac{Da}{4}$$

$$L = \frac{9 \text{ cm}}{4} = 2,25 \approx 2,3 \text{ cm} \quad [32]$$

La longitud de las paletas impulsoras debe ser de 2,3 cm.

- **Cálculo de la Longitud del disco que une las paletas**

$$\frac{Dd}{Da} = \frac{2}{3} \Rightarrow Dd = \frac{2Da}{3}$$

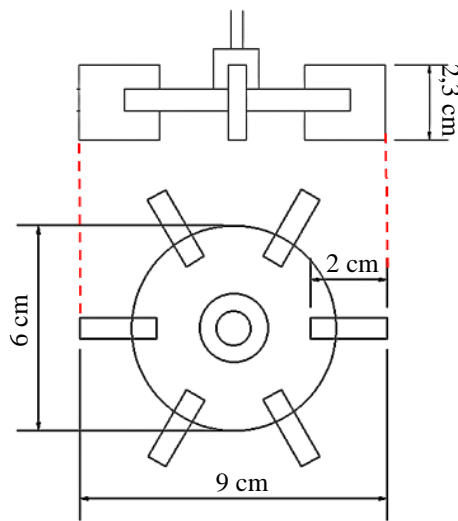
$$Dd = \frac{2(9 \text{ cm})}{3} = 6 \text{ cm} \quad [33]$$

La longitud del disco que une las paletas debe ser de 6 cm.

Por lo tanto, se presenta la figura del impulsor tipo turbina "Rushton", diseñado específicamente para el reactor conforme a las dimensiones calculadas.

## Figura 18

Medidas del agitador Rushton fabricado



- **Calculo para la Potencia requerida de motor**

### Calculo del número de Reynolds

Para determinar el número de Reynolds, se consideró la velocidad de agitación como parte del cálculo necesario (RPS 0,67), además la viscosidad y densidad del fluido, usando como base las propiedades del agua.

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu}$$

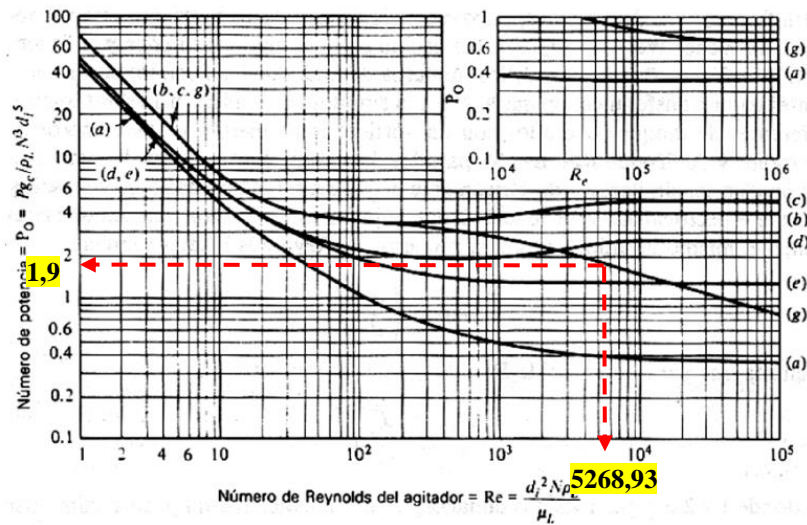
$$N_{Re} = \frac{0,09^2 \text{ m} \times 0,67 \text{ m/s} \times 1000 \text{ kg/m}^3}{0,00103 \text{ kg/ms}} = 5268,93 \quad [34]$$

Como se observa, el número de Reynolds obtenido es un flujo de régimen transitorio ( $100 < Re < 10,000$ ).

A continuación, procedemos a calcular el número de potencia ( $N_p$ ) en relación con el número de Reynolds ( $Re$ ), utilizando la Figura 21 como referencia.

**Figura 19**

Gráfica para hallar el número de potencia en función al número de Reynolds



Nota. Adaptado de *Operaciones de transferencia de masa* (p.172), por Treybal, 1997, McGraw Hill

Se calculó la potencia necesaria, despejamos P, de la ecuación [15]

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 Da^5}$$

$$P = N_p \rho N^3 Da^5$$

Entonces

$$P = 1,9 \times 1000 \text{kg/m}^3 \times (0,67 \text{s}^{-1})^3 \times (0,09 \text{m})^5$$

$$P = 0,0035 \text{ W} \quad [35]$$

La agitación de un líquido poco viscoso como el agua requiere una potencia mínima, aproximadamente 0,0035 W en un régimen transitorio. Para el reactor, se usa un motor de 5 W que puede alcanzar hasta 95 RPM, pero no se recomienda operarlo a máxima capacidad. Esto podría causar recalentamiento y romper los flóculos, disminuyendo la eficiencia de separación y adsorción.

### e) Etapa 5: Ensamble de los dispositivos del reactor

El reactor está diseñado con un orificio superior para cargar el agua contaminada con arsénico, y una válvula inferior para liberar el agua tratada al finalizar el proceso. La estructura del sistema incluye ruedas para facilitar su transporte. El sistema de agitación cuenta con un motor montado sobre una plancha de acero en la parte superior, y el

agitador está conectado al motor mediante un eje impulsor Rushton. El sistema también incluye tuberías, codos, y válvulas que conectan el reactor con el filtro, el tanque de purga, y el tanque de almacenamiento, asegurando la distribución adecuada del agua tratada, que se puede extraer mediante una llave ubicada en la salida del tanque de almacenamiento

#### f) Etapa 6: Distribución eléctrica

Para la distribución eléctrica del reactor discontinuo, se aseguró la eficiencia y la seguridad en el proceso, al ser un reactor que consume muy poco voltaje, se eligió un motor de engranaje de 24 V con una potencia de salida de 5 W y una velocidad máxima de operación de 95 RPM (suficiente para la agitación en el reactor). Por otro lado, se adquirió un controlador de velocidad, ya que la velocidad optima que se trabaja en el reactor discontinuo es de 40 rpm (respecto a análisis preliminares, ver Apéndice 11), y finalmente él usó un transformador de voltaje, y se soldaron las uniones para el armado del sistema eléctrico para la agitación.

#### Figura 20

*Armado del sistema eléctrico para la agitación*



*Nota.* En el Anexo 16, se muestra el sistema eléctrico montado para el funcionamiento de la agitación en el reactor discontinuo, se cubrió con caja el controlador de velocidad y al transformador de voltaje para más seguridad, además, se colocaron canaletas de luz para la distribución de cableado para su protección y orden con el fin de operar como cualquier artefacto eléctrico.

Costo: Aproximado de motor entre S/ 40 a 70; para el controlador de velocidad entre S/.15 a 19, para el transformador de voltaje entre S/ 35 a 50 y para el cableado y soldadura entre S/.10 a 15.

#### 4.2. Resultados de las pruebas en el reactor discontinuo

##### a) Determinación del orden de reacción, tiempo de reacción y capacidad de adsorción de los óxidos de hierro

Se realizó una prueba en el reactor discontinuo, para ver su funcionamiento y determinar el orden de reacción, tiempo de reacción y capacidad de adsorción. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 17**

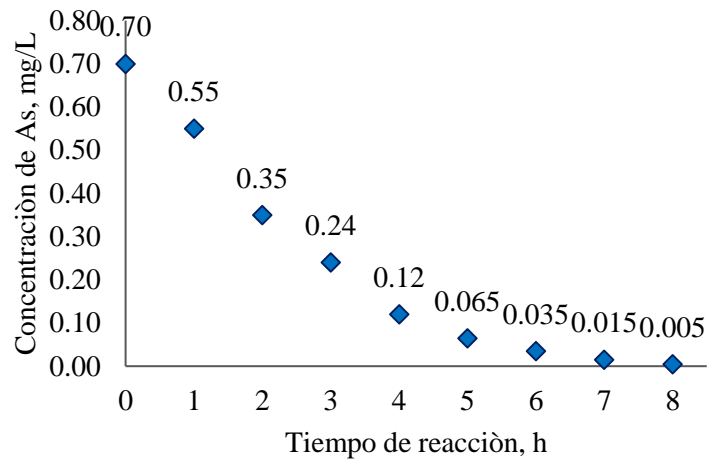
*Resultados de la concentración de arsénico, hierro residual, pH y parámetros fisicoquímicos del agua tratada*

Tiempo de reacción, h	As residual total, mg/L	Fe residual total, mg/L
0	0,70	0,018
1	0,55	0,029
2	0,35	0,032
3	0,24	0,046
4	0,12	0,057
5	0,065	0,066
6	0,035	0,084
7	0,015	0,125
8	0,005	0,133

*Nota.* La tabla presenta los resultados de la concentración de arsénico (As) y hierro residual (Fe) en el agua tratada, medida en diferentes tiempos de reacción dentro del reactor químico.

**Figura 21**

*Concentración de As vs tiempo de reacción*



*Nota.* Se observa en la Figura 23, la concentración de arsénico en el agua de Huanuara al transcurrir las 8 h de reacción, dio una concentración de 0,005 mgAs/L, el cual está por debajo de la norma oficial de 0,01mgAs/L.

▪ **Determinación del orden de reacción:**

De los datos obtenidos de la Tabla 17, respecto al tiempo de reacción y la concentración de arsénico, se determinó el orden de reacción, se consideró una reacción química general de descomposición,  $A \longrightarrow \text{Productos}$ , donde las concentraciones de arsénico fueron disminuyendo favorablemente a través del tiempo de reacción.

A partir del método gráfico:  $V = k[C_A]^n$  [36]

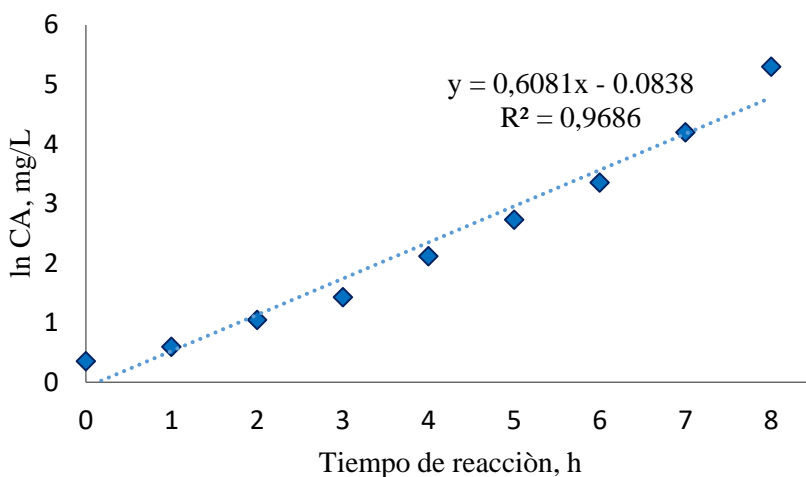
$$\text{para orden} = 1; \ln C_A = \ln C_{A0} - k t$$

y                      b                      m                      x

**Tabla 18***Determinación del orden de reacción*

x	y	ln y
Tiempo, h	C <sub>A</sub> , mg/L	- ln C <sub>A</sub>
0	0,70	0,3567
1	0,55	0,5978
2	0,35	1,0498
3	0,24	1,4271
4	0,12	2,1203
5	0,065	2,7334
6	0,035	3,3524
7	0,015	4,1997
8	0,005	5,2983

*Nota.* La tabla proporciona los valores experimentales de tiempo (en horas), concentración de arsénico C<sub>A</sub> (en mg/L), y el logaritmo natural de la concentración ln C<sub>A</sub>, estos datos evalúan el comportamiento cinético de la reacción. A medida que el tiempo de reacción aumenta, la concentración de arsénico disminuye, lo que indica que el adsorbente está eliminando eficientemente el arsénico del agua contaminada.

**Figura 22***Reacción de primero orden*

*Nota.* El gráfico presenta el lnC<sub>A</sub> versus el tiempo de reacción, la línea de tendencia muestra el ajuste por mínimos cuadrados teniendo un coeficiente de 0,9686.

▪ **Determinación del tiempo de reacción:**

De la ecuación de la recta de primer orden,  $\ln C_A = -kt + \ln C_{A0}$  queda:

$$y = -\underbrace{0,6081}_k x - 0,0838 \quad R^2 = 0,9686;$$

$$t = \frac{-\ln\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right)}{k} = \frac{-\ln\left(\frac{0,005}{0,70}\right)}{0,6081} = 8,13 \text{ h} \approx 08:7 \text{ h} \quad [37]$$

Entonces se obtiene el tiempo óptimo de reacción siendo de 8 horas con 7 min.

▪ **Determinación de la capacidad de adsorción de los óxidos de hierro**

**Tabla 19**

*Resultados de la adsorción de los FeO y el porcentaje de remoción*

Masa, g	60		
Volumen, L	20		
$C_{A0}$ , mg/L	0,70		
Tiempo, h	$C_A = C_f$	$q_0$	% $q_0$
0	0,70	0	0
1	0,55	0,050	21,429
2	0,35	0,117	50,000
3	0,24	0,153	65,714
4	0,12	0,193	82,857
5	0,065	0,212	90,714
6	0,035	0,222	95,000
7	0,015	0,228	97,857
8	0,005	0,232	99,286

*Nota.* Al inicio de la prueba, la concentración de arsénico fue de 0,70 mg/L, a medida que el tiempo transcurrió, la concentración disminuyó, después de 8 horas, la concentración se redujo a 0,005 mgAs/L. El porcentaje de remoción (% $q_0$ ) aumentó con el tiempo, alcanzando un 99,286% al final de la prueba, lo que indica que los óxidos de hierro son efectivos en la adsorción de arsénico.

De la Tabla 19, para el tiempo de reacción de 8 horas, la concentración final fue de 0,005 mgAs/L, entonces la capacidad de adsorción resultó:

$$q_0 = \frac{C_0 - C_f}{m} V$$

$$q_0 = \frac{0,70 \text{ mgAs/L} - 0,005 \text{ mgAs/L}}{60 \text{ g}} \times 20\text{L} = 0,232 \text{ mg/g} \quad [38]$$

Y el porcentaje de adsorción o remoción para el tiempo de 8 h fue:

$$\% q_0 = \left( \frac{C_0 - C_f}{C_0} \right) \times 100$$

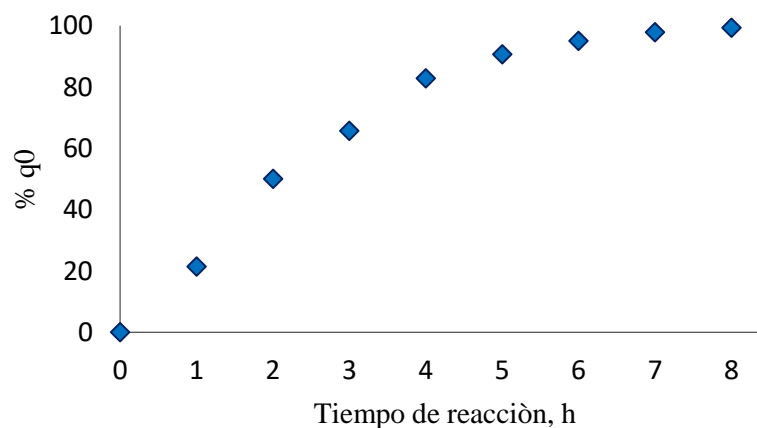
$$\% q_0 = \left( \frac{0,70 \text{ mg/L} - 0,005 \text{ mg/L}}{0,70 \text{ mg/L}} \right) \times 100 = 99,29\% \quad [39]$$

El valor de la capacidad de adsorción,  $q_0 = 0,232 \text{ mg/g}$ , indica que cada gramo de óxido de hierro adsorbe 0,232 mg de arsénico del agua, para un tiempo de 8 horas, con un porcentaje de adsorción o remoción del 99,29 %.

Por tanto, las demás pruebas que se muestran se grafican en la Figura 23.

### Figura 23

*Capacidad de adsorción vs tiempo de reacción*



*Nota.* El valor de la capacidad de adsorción para un tiempo de 6 horas, comienza a tener una tendencia lineal ya que para ese tiempo en adelante (8 horas), la concentración de As en el agua se encuentra dentro de la norma peruana, y por tanto la capacidad adsorción disminuye.

## **b) Resultados del diseño experimental de 11 pruebas en el Reactor discontinuo**

Se analizó los parámetros fisicoquímicos y las concentraciones de metales totales del agua tanto iniciales (antes del tratamiento) como finales (después del tratamiento), para el agua inicial, se obtuvo una concentración de arsénico de 0,53003 mg/L, y una concentración de hierro de 0,0213 mg/L, estos análisis fueron analizados por el laboratorio acreditado, SGS del Perú (ver ANEXO 14)

### **Matriz de superficie de respuesta compuesta por el diseño $2^2$ puntos factoriales + 4 puntos estrella + 3 puntos centrales, para la remoción de arsénico**

En la siguiente Tabla 19, se muestra el arreglo experimental del diseño factorial + 4 punto estrella, con un delineamiento de superficie de respuesta con tres puntos centrales y 11 experimentos, con las variables de nivel codificadas, las variables de nivel reales y las variables de respuesta obtenidas de arsénico residual total y hierro residual total (variables dependientes), además se midió el pH y el porcentaje de remoción de As en el agua. Se tomó la concentración inicial de 0,53003 mg/L de aguas de consumo del distrito de Huanuara (agua muestreada y analizada por SGS, ver Anexo 14).

### **Arreglo experimental y resultados experimentales para la remoción de arsénico total y hierro residual**

La Tabla 20 presenta el diseño experimental compuesto central, donde se incluyen las variables independientes en sus formas codificada y no codificada, junto con los resultados obtenidos.

**Tabla 20**

*Resultados de concentración de arsénico, hierro residual y pH en el agua de consumo humano, además del porcentaje de remoción de arsénico*

Nro.	Variables de nivel codificadas		Variables de nivel reales		Variables de Respuesta			% de remoción de As
	Masa de FeO, g	Tiempo de reacción, h	Masa de FeO, g	Tiempo de reacción, h	Arsénico residual total (mg/L)	Hierro residual total (mg/L)	pH	
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>		
1	0	+ $\alpha$	60	9,82843	0,00546	0,0151	8,26	98,97
2	0	- $\alpha$	60	4,17157	0,02027	0,0286	8,18	96,18
3	-1	1	40	9	0,01883	0,0191	8,37	96,45
4	+ $\alpha$	0	88,2843	7	0,01913	0,1327	8,30	96,39
5	1	1	80	9	0,00491	0,0885	8,24	99,07
6	-1	-1	40	5	0,02551	0,0138	8,19	95,19
7	1	-1	80	5	0,01610	0,1050	8,26	96,96
8	- $\alpha$	0	31,7157	7	0,02855	0,0239	8,35	94,62
9	0	0	60	7	0,02778	0,0830	8,30	94,76
10	0	0	60	7	0,02997	0,077	8,32	94,35
11	0	0	60	7	0,02583	0,0751	8,34	95,13

*Nota.* Los resultados del agua respecto al As y Fe de estas muestras, fueron enviados al laboratorio especializado para analizar por el método de ICP-Masa.

**Resultados experimentales de los parámetros fisicoquímicos de diseño las 11 pruebas experimentales**

**Tabla 21***Resultados de los parámetros fisicoquímicos del diseño*

Nro.	pH	mV	TDS, mg/L	Resistividad, Ω.cm	Ec, μS/cm	Salinidad, ppt	Temp, °C	DO, %	O <sub>2</sub> , %	DO, mg/L
1	8,26	-74,60	676	740	1348	0,57	13,4	95,7	20,0	8,86
2	8,18	-70,20	689	726	1378	0,61	15,3	97,5	20,1	8,99
3	8,37	-85,40	663	754	1320	0,59	15,7	88,5	18,3	8,07
4	8,30	-81,60	673	746	1342	0,57	14,1	85,8	17,9	7,94
5	8,24	-78,70	665	749	1339	0,56	15,0	87,8	18,3	7,96
6	8,19	-68,30	660	766	1314	0,55	13,2	79,5	17,0	7,43
7	8,26	-86,10	677	737	1349	0,56	15,2	85,0	18,3	7,87
8	8,35	-83,30	666	750	1318	0,60	16,9	96,6	20,0	8,48
9	8,30	-84,90	669	738	1354	0,58	14,2	86,1	18,7	7,91
10	8,32	-86,50	662	754	1322	0,66	14,4	91,3	18,9	7,85
11	8,34	-87,30	659	745	1342	0,62	15,6	90,1	18,4	7,92

*Nota:* Como se observa, se obtuvieron los valores de los parámetros fisicoquímicos del agua filtrada de las 11 pruebas experimentales después de la remoción. En términos generales, los parámetros evaluados cumplen con los límites establecidos por el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, según el DS N° 031-2010-SA del Ministerio de Salud, DIGESA.

#### **4.2.1 Análisis estadístico para la remoción de arsénico**

En la Tabla 22 se presenta el análisis de varianza (ANOVA), que revela cómo los factores experimentales afectan la remoción del arsénico total residual. Se detallan las fuentes de variación atribuidas a la regresión y a los errores residuales, junto con el valor del estadístico F, que es 23,26, indicando así la significancia del modelo.

Los resultados obtenidos se evaluaron con un modelo de regresión múltiple:

**Tabla 22***Análisis de varianza para la remoción de As*

	Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	Grados de Libertad (gl)	Suma de cuadrados medios (SCM)	Estadístico F
SSR	Debido a la regresión	0,0007224	5	0,000151591	23,2 6
SSE	Debido a los residuales de error	0,00003042	5	0,000006084	
SST	Total	0,00075282	10		

*Nota:* Tabla generada utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI

A continuación, se presentan los coeficientes del modelo, los efectos principales y las interacciones, así como el error estándar de cada factor y la significancia estadística para el diseño de superficie Factorial  $2^2$  + puntos estrella + puntos centrales.

**Tabla 23***Análisis de la regresión múltiple para la remoción de arsénico*

Parámetro	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
A: Masa de óxido de hierro, g	0,00072274	-0,00069232	5,25	<b>0,0033</b>
B: Tiempo de reacción, h	0,02725832	-0,02722790	5,56	<b>0,0026</b>
AA	-0,00000629	0,00003671	2,42	0,0599
AB	-0,00002819	0,00005861	0,92	0,4025
BB	-0,00199937	0,00202979	7,71	<b>0,0006</b>

*Nota:* Tabla generada utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI

La Tabla 23 muestra los factores principales Masa de óxido de hierro (A), Tiempo de reacción (B), y la interacción del factor cuadrático, Tiempo de reacción (BB), estos tres efectos tienen un valor-P, menor que 0,05, lo que indica que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%.

**Tabla 24**

*Resumen de ajuste estadístico para el Arsénico total residual*

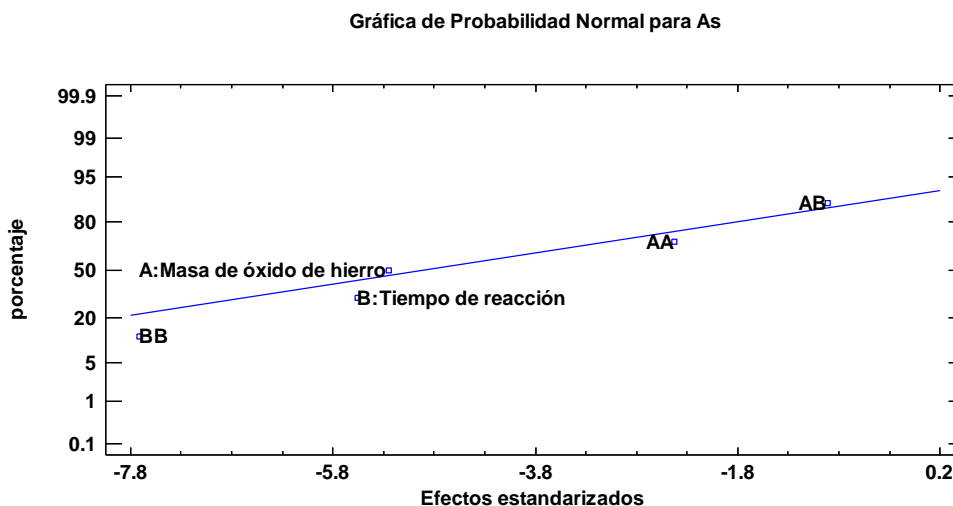
<b>Estadística de Regresión</b>	
Coefficiente de determinación, $R^2$ , %	95,9591
$R^2$ (Ajustada por gl), %	91,9182
Observaciones (Experimentos)	11

*Nota.* Tabla generada utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI

En la siguiente gráfica de probabilidad normal de los efectos para el As respecto a la remoción (Figura 26), se compone de dos zonas, la zona inferior al 50% donde los coeficientes son negativos (AA, BB y AB); los valores de los efectos, al aumentar sus niveles, habrá una disminución del porcentaje de remoción. A diferencia de la zona superior al 50% donde los coeficientes son positivos (A y B), esto quiere decir que al aumentar los niveles de los efectos aumentará el porcentaje de remoción.

**Figura 24**

*Gráfica de probabilidad normal para As*

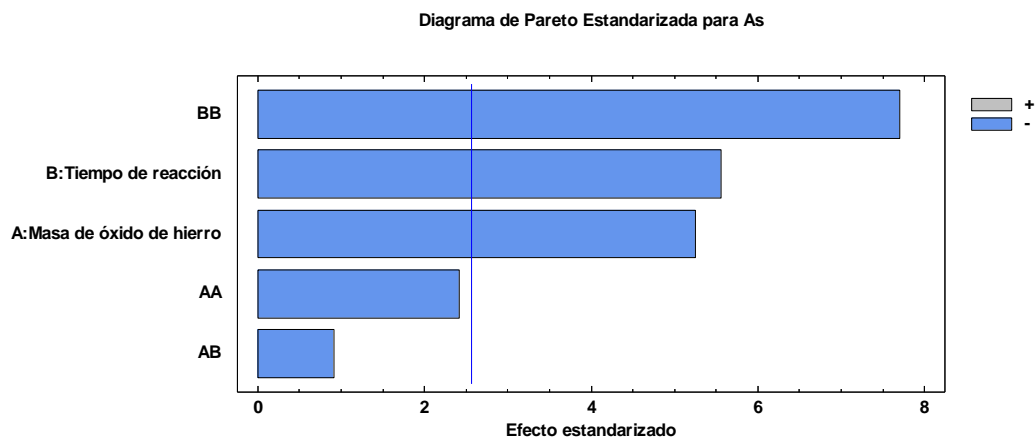


*Nota:* Grafica generada utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI

Los coeficientes que están considerablemente alejados de la línea serán significativos, mientras que aquellos que están cerca o sobre la línea representarán estimaciones de errores de efectos y, por lo tanto, no serán significativos.

**Figura 25**

*Diagrama de Pareto estandarizado para la concentración de arsénico*

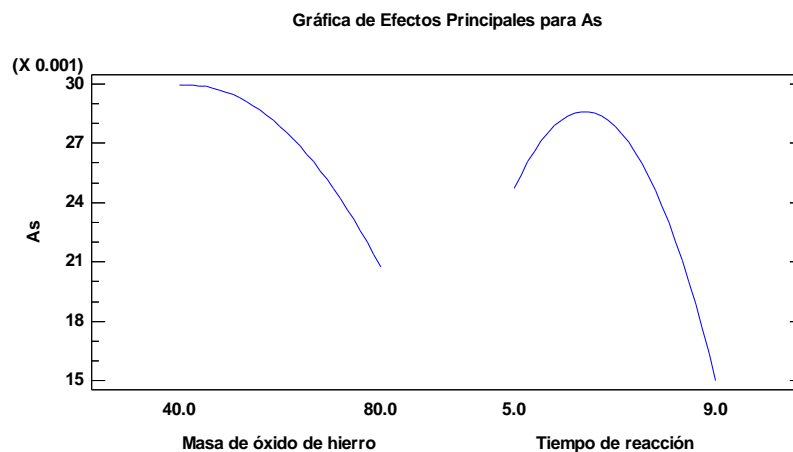


*Nota:* Diagrama generado utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI.

En el diagrama de Pareto Estandarizado para As, muestra los factores significativos y no significativos, adoptando el modelo cuadrático. Los factores importantes en orden de significancia son el efecto cuadrático del tiempo de reacción (BB), el efecto lineal del tiempo de reacción (B) y la masa de óxido de hierro (A).

**Figura 26**

*Gráfica de efectos principales para As*



*Nota:* Gráfica generada utilizando software Stargraphics Centurión, versión XVI.

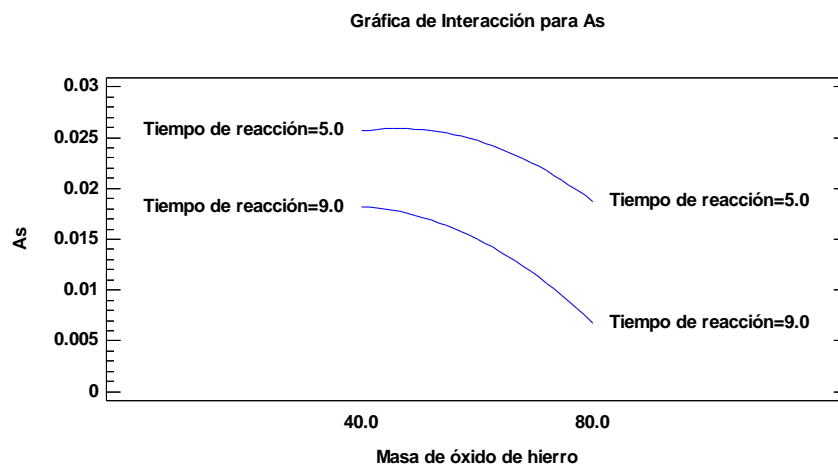
En la figura 26 de efectos principales para As, se constituye de dos tramos: en el primer tramo encontramos la variable masa de óxido de hierro vs la concentración de As, esta

indica que a mayor dosis o masa de óxido de hierro, la concentración de As en el agua disminuye favorablemente.

En el segundo tramo (Concentración de As vs Tiempo de reacción), a un menor tiempo de reacción (de 5 a 7 h), la remoción de concentración de As no es la óptima, pero a un mayor tiempo de reacción (entre 8 a 9 h), disminuye la concentración de As a niveles significativos.

### Figura 27

Gráfica de interacción para As



Nota: Gráfica generada utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI.

La Figura 27 establece que la interacción de la masa de óxido de hierro de 40 g, a un tiempo de reacción entre 5 y 9 h, genera una remoción de As aceptable, pero, a diferencia de la interacción a una mayor masa de óxido de hierro, favorece la remoción a concentraciones menores a 0,01 mg/L de As.

### Desarrollo de la ecuación del modelo de regresión para el arsénico

El diseño de superficie de respuesta factorial  $2^2 + 4$  punto estrella + 3 puntos centrales, se eligió con el fin de relacionar las variables x1: Arsénico total residual (mg/L) y las variables independientes y1: Masa de óxido de hierro, y2: Tiempo de reacción. A través de esta relación dio como resultado a una ecuación empírica, los valores de los coeficientes de la ecuación del modelo la encontramos en la Tabla 22, en resumen, tenemos:

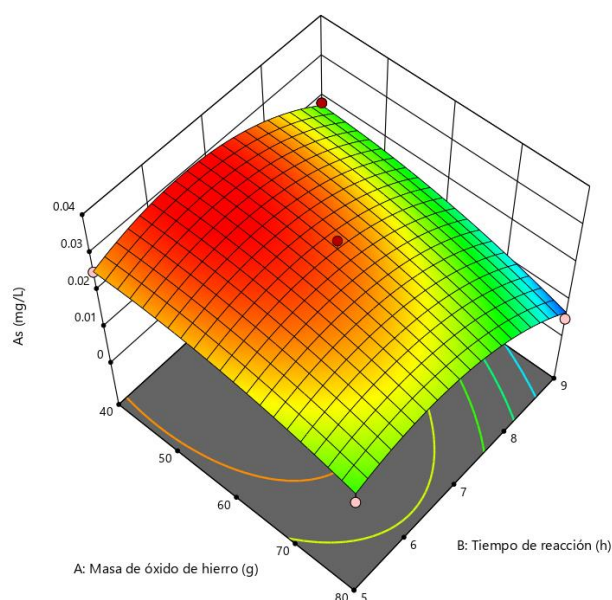
$$\begin{aligned}
y_1(\text{As}) = & -0,0738695 + 0,000722738 \times M_{\text{Fe}} \\
& + 0,0272583 \times t_{\text{resid.}} - 0,0000062875 \times M_{\text{Fe}}^2 \\
& - 0,0000281875 \times M_{\text{Fe}} \times t_{\text{resid.}} - 0,00199937 \times t_{\text{resid.}}^2.
\end{aligned}
\tag{40}$$

### Efecto combinado de las condiciones de operación sobre la remoción de arsénico

Se construyeron los gráficos de los efectos combinados de los dos efectos (masa de óxido de hierro y tiempo de reacción) sobre la remoción de arsénico, bajo la metodología de superficie de respuesta.

#### Figura 28

*Gráfica de superficie de respuesta estimada para el As*



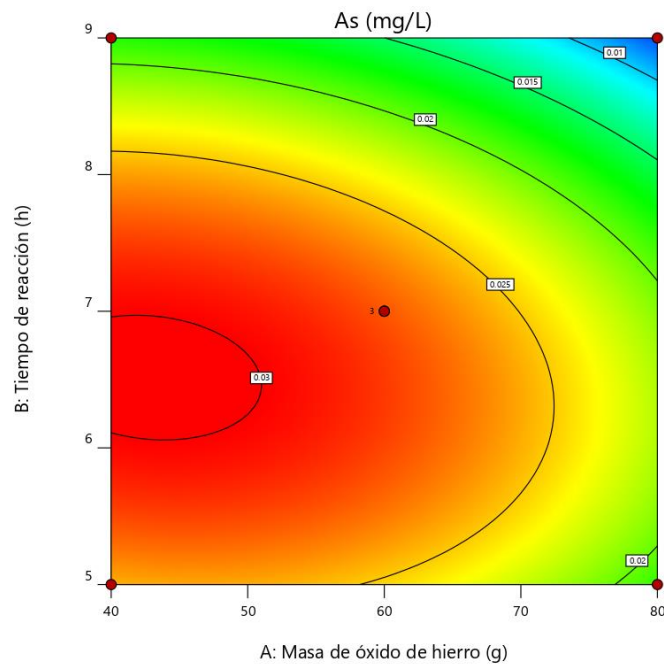
*Nota:* Gráfica generada utilizando el software Design Expert versión 12.

En esta gráfica tridimensional de superficie de respuesta, se puede observar que, a lo largo de todo el rango de la masa de óxido de hierro, se logra una remoción de arsénico, esto se identifica a través de los colores, en la zona rojiza (de 40 a 65 g) la remoción no es óptima, pero a una coloración verdosa, la remoción en el agua será mejor hasta llegar a una coloración azuleja, donde será el punto más óptimo de la remoción en el agua.

De igual manera, para el eje del tiempo de reacción, existe una zona celeste y azul, la cual indica que la remoción llegó a un punto óptimo (a mayor intensidad de color azul mejor remoción de As)

**Figura 29**

*Contorno de la superficie de respuesta estimada de la remoción de arsénico*



*Nota:* Gráfica generada utilizando el software Design Expert versión 12.

#### **4.2.2 Análisis estadístico para la variable de respuesta de Hierro total residual**

En la Tabla 25 se presenta el análisis de varianza, que muestra cómo los factores experimentales afectan la variable de respuesta del hierro total residual. Se describen las fuentes de variación derivadas de la regresión y de los errores residuales, además se indica que el valor del estadístico F es de 125,27, lo cual señala que el modelo es estadísticamente significativo.

Los resultados obtenidos se evaluaron con un modelo de regresión múltiple:

**Tabla 25***Análisis de Varianza para Concentración de Fe*

Fuente de variación		Suma de cuadrados (SC)	Grados de Libertad (g.l.)	Suma de cuadrados medios (SCM)	Estadístico F
SSR	Debido a la regresión	0,01714808	5	0,00332256	12,761
SSE	Debido a los residuales de error	0,00013261	5	0,000026522	
SST	Total	0,01728069	10		

*Nota:* Tabla generada utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI.

A continuación, se presentan los coeficientes del modelo, los efectos principales, las interacciones, el error estándar de cada factor y la significancia estadística para el diseño de superficie factorial..

**Tabla 26***Análisis de la regresión múltiple para el Hierro total residual*

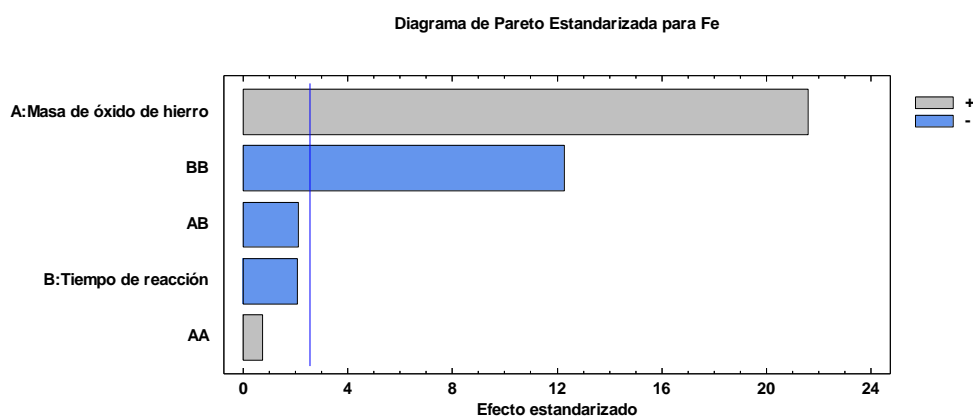
Parámetro	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
A: Masa de óxido de hierro, g	0,00243980	-0,00230719	21,59	0
B: Tiempo de reacción, h	0,09947643	-0,09934382	2,08	0,0921
AA	-0,00013625	0,00026886	0,73	0,4941
AB	0,00000399	0,00012861	2,12	0,0879
BB	-0,00665676	0,00678937	12,29	0,0001

*Nota:* Tabla generada utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI

La Tabla 26 muestra los factores principales Masa de óxido de hierro (A), la interacción cuadrática, Tiempo de reacción (BB), estos dos efectos tienen un valor-P, menor que 0,05, lo que indica que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%. También se visualiza en el diagrama de Pareto (Figura 30).

**Figura 30**

*Diagrama de Pareto estandarizada para la concentración de hierro total residual*



*Nota:* Diagrama generado utilizando el software Stargraphics Centuri3n, versi3n XVI

**Tabla 27**

*Resumen de ajuste estadístico para el hierro total residual*

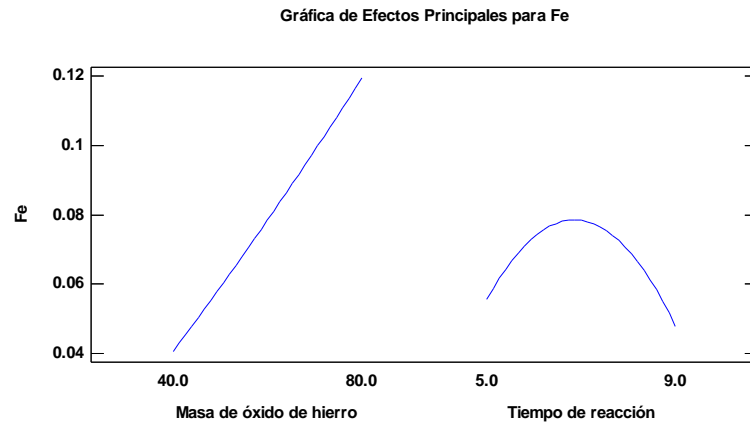
<b>Estadística de regresi3n</b>	
Coefficiente de determinaci3n, $R^2$ , %	99,23
$R^2$ (Ajustada por g.l), %	98,46
Observaciones (experimentos)	11

*Nota:* Tabla generada utilizando el software Stargraphics Centuri3n, versi3n XVI

El modelo presenta un coeficiente de determinaci3n  $R^2$  de 99,23 %, lo que sugiere que la variabilidad en la variable dependiente del hierro total residual se explica por las variables independientes (masa de 3xido de hierro y tiempo de reacci3n). El  $R^2$  ajustado es de 98,46 %.

### Figura 31

#### Gráfica de efectos principales para Fe



*Nota:* Gráfica generada utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI

En la figura 31 de efectos principales para Fe, se constituye de dos tramos: en el primer tramo, encontramos la variable masa de óxido de hierro versus la concentración de Fe, esta indica que, a mayor masa de óxido de hierro, la concentración de Fe en el agua aumenta de una manera no significativa.

En el segundo tramo (concentración de Fe vs tiempo de reacción), se observa que el tiempo de reacción (5 a 9 h), la concentración de Fe, no es significativa, ya que se encuentra dentro de la norma peruana (0,3 mgFe/L).

#### **Efecto combinado de las condiciones de operación sobre la Concentración de Fe**

Se construyeron los gráficos de los efectos combinados (masa de óxido de hierro y tiempo de reacción) sobre la concentración de hierro total residual, bajo la metodología de superficie de respuesta.

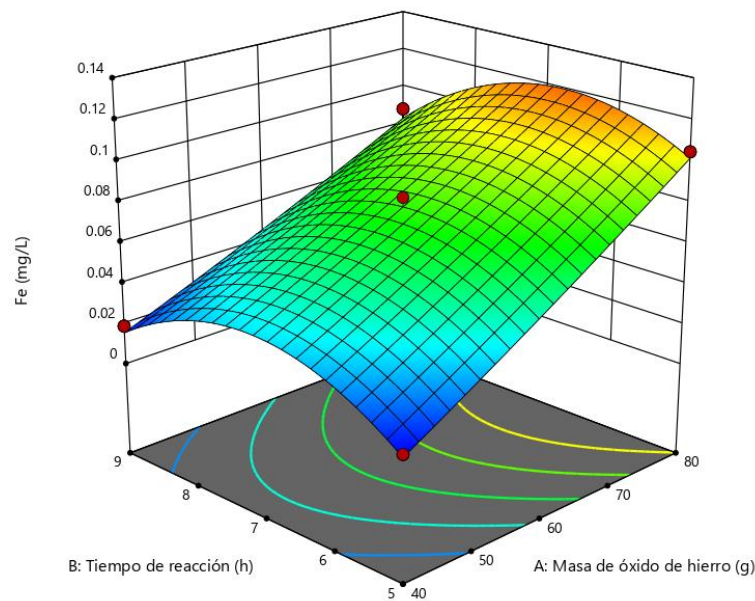
La superficie de respuesta muestra cómo cambian los niveles de Fe en función de las combinaciones de la masa de óxido de hierro y el tiempo de reacción. El color en la gráfica ayuda a visualizar los valores de Fe. Generalmente, los colores cálidos (rojo, naranja) indican concentraciones más altas, mientras que los colores fríos (azul, verde) indican concentraciones más bajas

Los puntos rojos en la superficie representan datos experimentales específicos, que son las condiciones bajo las cuales se realizaron las mediciones.

La tendencia que muestra la gráfica sugiere, que, para menores tiempos de reacción y menores masas de óxido de hierro, la concentración de Fe es baja.

### Figura 32

*Gráfica de superficie de respuesta estimada para el Fe*

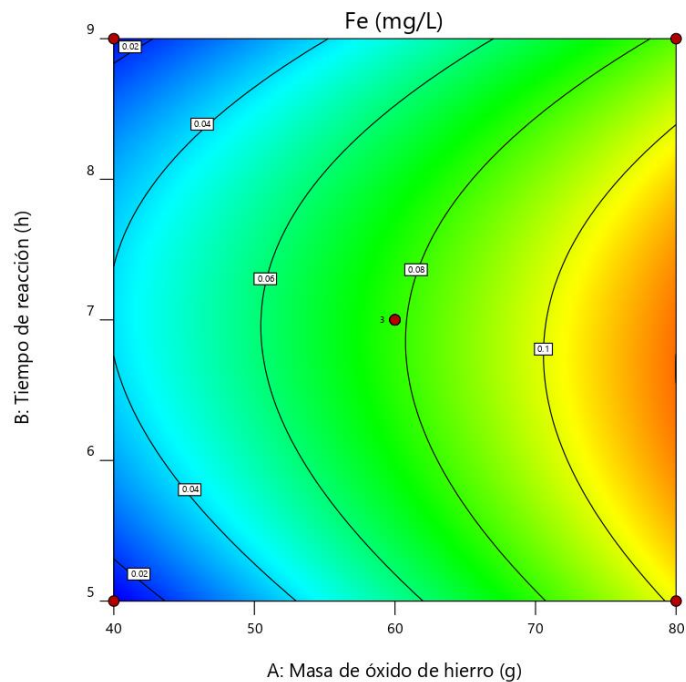


*Nota:* Gráfica generada utilizando el software Design Expert versión 12

Se observa un comportamiento basándose en los colores, para una masa de óxido de hierro de 40 a 55 g, denota una coloración azulada, la cual indica que la concentración de Fe es irrelevante a través del tiempo, pero para una masa de óxido de hierro de 55 a 80 g, la situación cambia a una coloración verdosa a rojiza, esto significa que la concentración de Fe aumenta en función del tiempo, pero como se observa la concentración de Fe se encuentra dentro de las normas peruanas de 0,3 mgFe/L.

**Figura 33**

*Contorno de la superficie de respuesta estimada de la concentración de Fe*



*Nota:* Gráfica generada utilizando el software Design Expert versión 12

### **c) Resultado de costos del sistema del diseño y operación del reactor discontinuo**

El diseño y operación del reactor químico discontinuo (batch) para la remoción de arsénico en agua potable incluye costos asociados a materiales, construcción, mantenimiento y operación del sistema. Estos costos son críticos para la viabilidad del proyecto, especialmente en comunidades rurales con limitaciones económicas. Los principales componentes incluyen el reactor, sistema de agitación, filtro, y el sistema de almacenamiento y purga.

**Tabla 28***Resumen de costos*

Sistema/Etapa	Componente	Costo Unitario (S/)	Cantidad	Costo Total (S/)
Óxidos de hierro	Virutillas (imán)	12 (imán)	1	12
	Reactor	Reactor (bidón)	1	20
Sistema de agitación	Motor eléctrico	50	1	50
	Agitador	100	1	100
	Controlador de velocidad	19	1	19
	Transformador de voltaje	35	1	35
	Filtro	50	1	50
Sistema de filtración	Mantenimiento de filtro (cartucho)	18	2 al año	36
	Mantenimiento del algodón	26 (1kg)	1 semanal	26
	Tanque de almacenamiento	8	1	8
Sistema de purga y almacenamiento	Tanque de purga	8	1	8
	Conexiones, (tuberías, codo, válvulas)	35	1 (codo y tubería) 2 (válvulas)	35
Otros costos de ensamblaje y operativos	Electricidad	0,005 kWh	1,55kWh/mes	0,044 céntimos (por 10 horas)
	Soporte o estructura del sistema	200	1	200
Mantenimiento general	Reemplazo de componentes	20	1 al año	25
Total, Aproximado				635

*Nota.* En el Perú, según Osinergmin, el kilovatio tiene un precio promedio de S/ 0,88. Entonces para los 5 W que consume el motor del agitador, convertimos la potencia en kilovatios (kW) resultado 0,005 kW, entonces el consumo de energía en kilo vatios-hora (kWh):

$$\text{Consumo} = 0,005 \text{ kW} \times 10 \text{ h} = 0,05 \text{ kWh}$$

Entonces se puede determinar el costo de la electricidad, como se mencionó según Osinergmin el costo promedio de la electricidad en el Perú es S/0,88 por kWh (88 céntimos por kWh)

$$\text{Costo} = 0,05 \text{ kWh} \times \text{S}/0,88 \text{ kWh} = \text{S}/0,044 \text{ kWh}$$

Por lo tanto, el costo de la energía para un agitador de 5 W utilizado por 10 horas continuas es aproximadamente S/ 0,044, lo cual tiene sentido; si se compara con el consumo de un ventilador con una potencia de 40W, lo que por hora puede consumir 0,05 kWh (kilovatio hora), se tendría que pagar S/ 0,0792 y por mes sería alrededor de S/ 6,6 soles. (Infobae, 2024)

### **4.3. Contrastación de hipótesis**

Según la hipótesis planteado anteriormente: “Es posible reducir la concentración de arsénico del agua de consumo de los pobladores del distrito de Huanuara-Tacna, a niveles menores de 0,01 mg/L y la concentración de hierro residual inferior a 0,3 mg/L, empleando un reactor químico discontinuo (batch)”

Por tanto, los resultados experimentales confirmaron que se logró reducir la concentración de arsénico por debajo de 0,01 mg/L y la concentración de hierro residual por debajo de 0,3 mg/L, cumpliendo con el Reglamento de Calidad de Agua para el Consumo Humano DS N° 031-2010-SA. Además, se verificó que variables como la cantidad de óxido de hierro y el tiempo de reacción son cruciales para maximizar la eficiencia de remoción.

La comparación entre los resultados esperados y observados mostró una alta correlación con el modelo estadístico, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) del 95% para el arsénico y del 99% para el hierro. Asimismo, las mediciones finales del pH respaldaron la robustez del diseño experimental y la fiabilidad del reactor batch en la remoción de arsénico.

### **4.4. Discusión de resultados**

#### **4.4.1. Validación del modelo experimental**

La validación del modelo experimental en ambas pruebas, tanto en jarra como en el reactor batch, demuestra una remoción efectiva de arsénico mediante el uso de óxidos de hierro, con un alto coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que refleja la precisión del modelo en la predicción de los resultados. En particular, el proceso es altamente eficiente en ambos sistemas, con valores de  $R^2$  de 96,181% para las pruebas en jarra y 95,9571% para el reactor batch, lo que indica que los datos experimentales se ajustan al modelo propuesto.

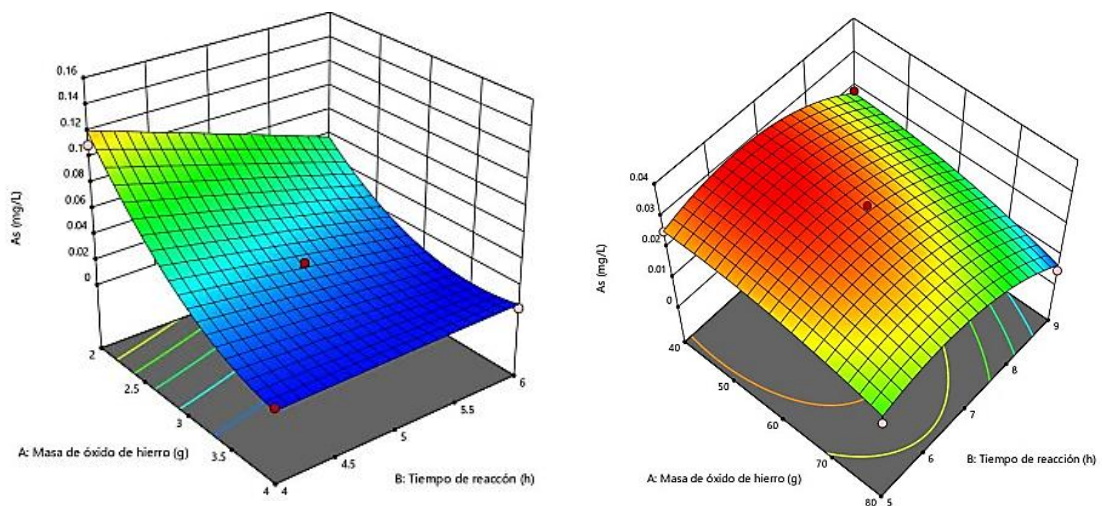
En las pruebas en jarra, se utilizaron volúmenes pequeños (1 litro), con masas de óxido de hierro entre 4 y 6 gramos y tiempos de reacción de 4 a 6 horas. Los resultados mostraron una reducción de la concentración inicial de arsénico de 0,75 mgAs/L a valores de 0,002 mgAs/L, que se encuentran por debajo del límite permitido para agua potable (0,01 mg/L). Además, la concentración de hierro residual (mgFe/L) también se mantuvo en niveles aceptables (0,090 mgFe/L).

En las pruebas en el reactor batch, que se realizaron a una escala mayor de 20 litros, se emplearon cantidades mayores de óxido de hierro, entre 40 y 80 gramos, con tiempos de reacción más prolongados, de 7 a 9 horas. Aquí, la concentración inicial de arsénico fue de 0,53003 mgAs/L, y se logró reducirla a 0,00491 mgAs/L, lo que también cumple con los estándares normativos para agua potable. Asimismo, los niveles de hierro residual (0,0885 mgFe/L) se mantuvieron dentro de los parámetros permitidos.

La comparación de estos dos sistemas, confirman que, tanto en sistemas de pequeña como de gran escala, el óxido de hierro es un material altamente efectivo para la remoción de arsénico del agua. No obstante, es notable que en el reactor batch utiliza mayores cantidades de FeO y tiempos de reacción más largos, debido a la escalabilidad.

### Figura 34

*Comparación de las concentraciones de arsénico final en ambos sistemas*



Pruebas en jarra

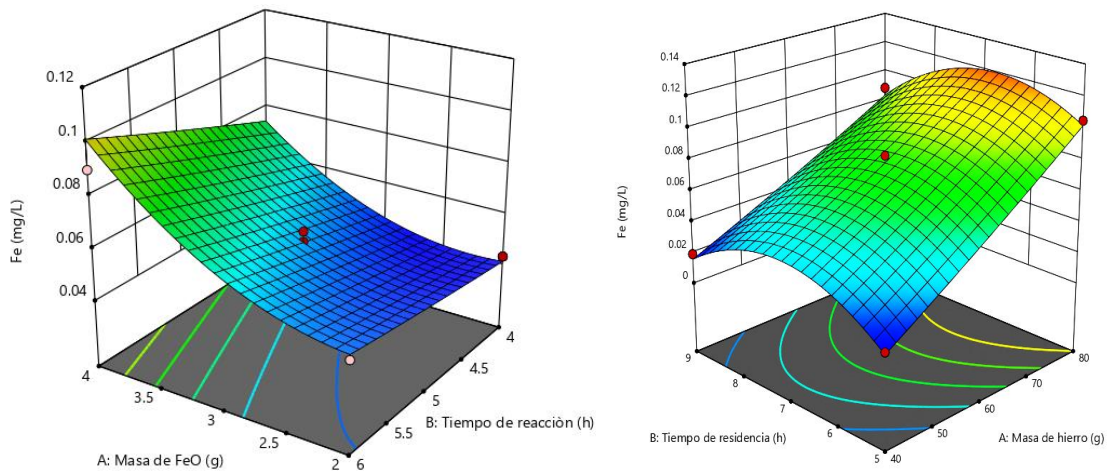
Pruebas en el reactor batch

Además, los gráficos de superficie proporcionan una visualización clara del impacto de la masa de óxido de hierro y el tiempo de reacción sobre la remoción de arsénico. En ambos casos, se observa que, a mayor masa de óxido de hierro y tiempo de reacción, la

concentración de arsénico disminuye considerablemente, aunque se llega a un punto en el que el incremento adicional de estas variables no resulta en una mejora significativa para el caso del reactor batch.

**Figura 35**

*Comparación de la concentración de hierro residual en ambos sistemas*



Pruebas en jarra

Pruebas en el reactor batch

Otro punto a discutir es la Figura 35, Las pruebas en jarra y en el reactor batch muestran tendencias similares en cuanto a la concentración final de hierro en el agua, logrando concentraciones cercanas de 0,090 mgFe/L en jarra y 0,0885 mgFe/L en batch, lo que indica la escalabilidad del proceso, por tanto, en ambos sistemas las concentraciones de hierro residual se encuentran dentro de la normativa establecida por la OMS de 0,3 mg/L.

#### 4.4.2. Validación del sistema de agitación

El sistema de agitación que involucra el impulsador turbina tipo Rushton se seleccionó debido a que su diseño es más adecuado para las condiciones del reactor a escala real. Mientras que, si se compara el equipo de test de jarras, los cuales emplean impulsadores de tipo palas, estos se evalúan en condiciones más simples y de menor volumen, el agitador Rushton ofrece ventajas significativas cuando se busca una mezcla homogénea en volúmenes mayores. Este tipo de agitador genera corrientes radiales y tangenciales, lo que mejora la dispersión de sólidos, como los óxidos de hierro que se utilizan para adsorber el arsénico. Además, facilita una mejor transferencia de masa en líquidos de

baja a media viscosidad, como en el caso del agua contaminada tratada en el reactor. De acuerdo con Levenspiel (1999), los agitadores Rushton son eficaces para mantener sólidos en suspensión y maximizar la interacción entre el adsorbente y el contaminante en procesos.

El motor seleccionado para el agitador se elige por su capacidad para mantener una velocidad constante y controlada, adecuada para el tamaño y las características del reactor. Se determinó que una velocidad de agitación de 40 rpm era óptima para la mezcla, según los resultados de las pruebas preliminares, y el motor proporcionaba el torque necesario para manejar las condiciones de carga de sólidos y líquidos en el reactor sin fluctuaciones. Además, este motor garantiza un control preciso sobre la velocidad de agitación, lo que es crucial para asegurar que las condiciones del reactor se mantengan dentro de los parámetros óptimos para la remoción de arsénico.

#### **4.4.3. Aplicación de la tecnología encontrada**

Esta sección examina cómo la tecnología desarrollada puede aplicarse en contextos prácticos para la remoción de arsénico en agua potable.

En cuanto a la escalabilidad del proceso, es posible adaptar el reactor batch de 20 litros a volúmenes mayores. Esto implicaría ajustar los tiempos de reacción y la dosificación de los óxidos de hierro para mantener la eficiencia observada en laboratorio.

Asimismo, esta tecnología, junto con los óxidos de hierro, podría integrarse en sistemas de tratamiento de agua potable donde se presenten altas concentraciones de arsénico. El diseño del reactor batch podría considerarse como una etapa adicional después de la filtración o incluso como un tratamiento independiente dentro de una planta de tratamiento de agua potable.

#### **4.4.4. Contraste con trabajos de investigación**

Uno de los parámetros de operación óptimos para la prueba de jarras, fueron hallados, comparando la variable de respuesta, arsénico total, bajo el principal parámetro el cual fue la procedencia de óxidos de hierro a utilizar ya que estos se constituyeron de talleres de soldadura.

De los datos obtenidos del diseño experimental bajo el uso del reactor químico batch se puede afirmar que los factores de la masa de óxidos de hierro y el tiempo de reacción influyen en la remoción de arsénico, se encontró que, a mayor cantidad de masa de óxido de hierro y tiempo de reacción, mayor será la remoción, lo que afirma según, Larico Mamani (2019), el tiempo de reacción es importante para la adsorción del arsénico en los óxidos de hierro.

Otro de los factores importantes es el sistema donde se realizaron las pruebas para la remoción, para este caso si se compara el reactor batch con su sistema de filtros domiciliarios que utilizan un material adsorbente de hierro cerovalente (clavos,) que sostienen Villa Gonzales , Chavez Ruiz , Mamani Pacsi, & Huamani Azorza, (2018), respector al tiempo de tratamiento el uso de los filtros es muy prolongado ya que opera en largos periodos de hasta 12 semanas para obtener remociones que van desde los 0,005 a 0,0025 mgAs/L, sin embargo el periodo que trabajo el reactor batch es de hasta 9 hora de agitación, obteniendo concentraciones finales de arsénico que van por debajo de la normal peruana establecida de 0,01mgAs/L.

Otro de los aspectos importantes es el costo, Acevedo Alfador , (2017) presento una revisión y aplicación de varios métodos, los métodos incluyen técnicas como la filtración con membranas y el uso de intercambiadores iónicos, que, aunque efectivos, implican mayores costos iniciales y operativos, estos métodos requieren infraestructura más avanzada y personal técnico capacitado para su operación y mantenimiento. Por tanto, el diseño y construcción del reactor batch, ofrece una solución más económica y fácil de implementar, haciéndolo ideal para aplicaciones en áreas rurales o con recursos limitados, mientras que los métodos revisados por Acevedo son más adecuados para entornos con mayores recursos y capacidad técnica.

## CONCLUSIONES

- Se logró establecer las condiciones óptimas de operación que incluyen el tipo de óxido de hierro denominado taller, el tamaño de malla #40, la velocidad de agitación de 40 rpm, la masa de óxido de hierro entre 60 y 80 gramos y el tiempo de reacción de 9 horas, logrando remover la concentración de arsénico de 0,53003 mg/L a menos de 0,01 mg/L, cumpliendo con los límites permisibles de la normativa peruana y las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS). El estudio mostró que, al ajustar estos parámetros, la eficiencia del reactor alcanzó un 99,07% como máximo y 94,35% como mínimo en la remoción de arsénico, manteniendo además la concentración de hierro residual dentro de los límites permitidos de 0,3 mg/L. Esto garantiza la seguridad y calidad del agua tratada para consumo humano en el distrito de Huanuara, Tacna.
- El diseño del reactor químico discontinuo se llevó a cabo considerando las necesidades volumétricas de la demanda domiciliaria en el distrito de Huanuara, Tacna. El reactor, de 20 litros, fue construido utilizando un tanque de polietileno y equipado con un sistema de agitación de acero inoxidable (impulsador tipo turbina – Rushton), ambos seleccionados por su durabilidad y resistencia a la corrosión. El tamaño del reactor fue ajustado para manejar de manera eficiente los volúmenes de agua requeridos por las familias locales, garantizando un tratamiento efectivo del agua para consumo y manteniendo bajos costos de operación.

En conjunto, estos resultados muestran que el reactor químico discontinuo diseñado no solo es capaz de reducir eficazmente los niveles de arsénico en el agua de consumo, sino que también es práctico y adecuado para el uso domiciliario, cumpliendo con las expectativas y requerimientos de la comunidad en el distrito Huanuara-Tacna.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda construir el equipo propuesto con la ayuda de la municipalidad y autoridades en una mayor escala, que pueda manejar volúmenes altos de agua por hogar, lo que permitiría suministrar suficiente agua para varios usos a los residentes en el distrito de Huanuara.

Se sugiere la implementación de este prototipo no solo para el distrito de Huanuara, sino también aplicar este sistema a otras comunidades con problemas similares de contaminación por arsénico.

Se recomienda realizar estudios a largo plazo para evaluar la durabilidad y consistencia del rendimiento del reactor en la remoción de arsénico. Esto incluiría el monitoreo continuo de la eficiencia del reactor y la vida útil de los materiales adsorbentes utilizados.

Para la gestión de los materiales adsorbentes saturados (residuos) generados en el reactor discontinuo, se recomienda que sean manejados mediante un sistema de residuos peligrosos que deberá implementarse por la autoridad del distrito de Huanuara.

## REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS

- Ramirez Alpizar, A. (15 de mayo de 2015). *Tipo de Agitadores*. Mexico: [Instituto Politécnico Nacional]. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/348353587/Tipos-de-Agitadores>
- Abedin, M. A., Katsumi, T., Inui, T., & Kamon, M. (2011). Arsenic removal from contaminated groundwater by zero valent iron: A mechanistic and long-term performance study. *Japanese Geotechnical Society*, 369-377.
- Acevedo, O., & Ortiz, E. (2004). El papel de óxidos de hierro en el suelo. *Terra Latinoamerica*, 485-497.
- Acevedo Alfanzador, L. (2017). Remoción de arsénico en agua con ozonación y carbon activado [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana]. [Tesis de postgrado]. Repositorio Institucional Zaloamati, Mexico. Obtenido de <https://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/6923>
- Ale-Mauricio, D., Villa, G., & Gastañaga, M. (2018). Concentraciones de arsénico urinario en pobladores de dos distritos de la región Tacna, 2017. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 183-189.
- Alpizar Antillón, L. (2006). *Hidroponía*. Costa Rica: Tecnológica de Costa Rica.
- Blas Camones, F., Bravo, J., & Effio, M. (2022). *Agitación*. Lima: [Universidad Nacional de Ingeniería]. Obtenido de <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-de-ingenieria/laboratorio-de-operaciones-unitarias/informe-n0-1-agitacion/28856354>
- Bustillos Alvarez, J., & Obando Tapia, G. (2021). *Diseño e implementación de un agitador semiautomático de doble hélice para una marmita de mosto de mortiño de 1000 litros de capacidad, para la parroquia de Quinticusig, provincia de Cotopaxi [tesis de pregrado, Universidad Nacional de Politécnica Salesian]*. Repositorio Digital. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19939>

- Carranza Luliquis, M., & Rodríguez Díaz, O. (2020). *Remoción de arsénico de agua de pozo para el consumo humano del caserío Casa Blanca - Mórrope empleando hierro y ácido cítrico [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]*. Respositorio Institucional, Lambayeque. doi:20.500.12893/8769
- Demissie, S., Mekonen, S., & Teshome, B. (2024). Examen de los riegos para la salud cancerígenos y no cancerígenos relacionados con la exposición al arsénico en Etiopía: un estudio longitudinal. *Informes de Toxicología*, 100-103.
- Diéguez Ramírez, B. (2020). Diseño y construcción de un reactor agitado para la adsorción de contaminantes en aguas residuales mediante adsorbentes micronizados. (*Tesis de pregrado*). Univesidad Politécnica de Catalunya, España.
- Dondé Castro, M. (2005). *Transporte de momentum y calor, Teoria y Aplicaciones a la Ingenieria de Proceso*. México: Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán.
- Edwards, M. (1994). Chemistry of arsenic removal during coagulation and Fe-Mn oxidation . *J. Am. Water Works Assoc.*, 64-78.
- Engineer's, T. (2020). *Turbine Agitators*. Obtenido de T.E.A.M. ENGINEER'S Multi-Equipment & Multi-Services Pvt.: <https://teamengineersgroup.com/turbine-agitators/>
- Google. (s.f.). (31 de marzo de 2015). [*Mapa geogradico de la region Tacna - Distrito de Huanuara*] . Obtenido de <https://ar.pinterest.com/pin/515028907363726455/>
- Grande Cobián, J. D. (2019). Diseño y desarrollo de un reactor químico de hidroxapatita biológica para la remoción de arsénico del agua de consumo humano de las poblaciones rurales dispersas. (*Tesis de pregrado*). Universidad Nacional de San Martín Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, Argentina.
- Gutiérrez Cámero , P. (2019). Determinación de los parámetros de diseño y el porcentaje de sustitución del cloruro férrico por el almidón de yuca en el proceso de clarificación y remoción de arsénico de las aguas del río Uchusuma (Provincia, Tacna) y propuesta de diseño de un reactor. (*Tesis de pregrado*). Universidad Jorge Basadre Grohmann, Tacna.

- Hernández Tapia, J. (2007). Diseño, construcción y caracterización de reactor de electrocoagulación para la remoción de arsénico contenido en agua potables. (*Tesis de pregrado*). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Hernández-Rodríguez, M., Otero-Calvis, A., & Falcón-Hernández, J. (2017). Adsorción de NI(II) en carbón activado de conchas de coco modificado con soluciones de Ácido Nítrico. *Tecnología Química*, 93-98.
- INEI. (2022). *Boletín Especial N°27- Población Total según Departamento, Provincia y Distrito*. Lima: INEI.
- Infobae. (febrero de 6 de 2024). *Infobae Perú*. Obtenido de <https://www.infobae.com/peru/2024/01/17/cuantos-soles-gasta-tu-ventilador-al-dia-calcula-tu-consumo-y-ve-como-afecta-tu-recibo-de-luz/>
- Karungamy, D., Selemani, P., & Niau, N. (2023). Eliminación de Arsénico en un filtro de arena acoplado con hierro de valencia cero. *HidroInvestigación*, 229-233.
- Larico Mamani, P. (2019). Estudio de la remoción de arsénico del río Sama a nivel domiciliario utilizando lana de hierro completamente con aireación y propuesta de un diseño de un reactor batch. (*Tesis de pregrado*). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna.
- Lawson, J., Madrigal, J., & Erjavec, J. (1992). *Estrategias Experimentales para el mejoramiento de la calidad en la industria*. México: Grupo Editorial Iberoamericana.
- Levenspiel, O. (2004). *Ingeniería de las Reacciones Químicas*. España: Reverté, S.A.
- Madrid, U. E. (2020). *Funciones de varias variables, Cálculo de máximo y mínimo*. Universidad Europea de Madrid, Madrid.
- Mamani Lopez, E. (2007). Análisis fisicoquímico y biológico del agua para consumo humano en el distrito de Huanuara. *Ciencia y Desarrollo*, 67-70.
- Mamani López, E. (2014). *ESTUDIO DE REMOCION DE ARSENICO DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO DEL DISTRITO DE HUANUARA - TACNA EMPLEANDO Fe0 [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]*. Repositorio Institucional.

- Mccabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Mexico: McGraw-Hill.
- Ministerio de Salud. (2011). *Reglamento de la calidad del agua para consumo humano - DS N°031-2010-S.A.* Lima: [Decreto supremo].
- Navidi, W. (2006). *Estadística para Ingenieros y Científicos*. Mexico: McGraw-Hill.
- Núñez Estrella, J., & Udeos Zabala, T. (2015). *Diseño, Construcción y Operación de un Reactor Batch para Saponificar Acetato de Etilo [tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]*. Repositorio Digital. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/38218?locale-attribute=en>
- Polo, C., Choque, J., & Cuevas, N. (2017). *Adaptación de la tecnología raos aplicando el calentamiento solar en las aguas del río Sama - provincia de Tacna*. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohamnn - Facultad de ciencias.
- PVICA. (2017). *Situación de la calidad de agua para consumo humano en la región Tacna - 2017*. Tacna: Mesa de concertación para la lucha contra la pobreza.
- Saenz, M. (08 de Octubre de 2022). ¿Por qué la población de Cairani consume agua con 40 veces más arsénico de lo permitido? *RPP Noticias*, pág. (sitio web). Obtenido de <https://rpp.pe/peru/tacna/por-que-la-poblacion-de-cairani-consume-agua-con-40-veces-mas-arsenico-de-lo-permitido-noticia-1438134>
- Sánchez, L. (2016). Evaluación de la remoción desde medios acuosos por adsorción sobre arena recubiertas con óxidos de hierro naturales. (*tesis de pregrado*). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, España.
- Siddiqui, S., & Chaudhry, S. (2017). Iron oxide and its modified forms as an adsorbent for arsenic removal: A comprehensive recent advancement [Óxido de hierro y sus formas modificadas como adsorbente para la eliminación de arsénico: Un avance reciente e integral]. *Process Safety and Environmental Protection*, 592-626. doi:10.1016/j.psep.2017.08.009.
- Silva, L. (2013). Arsénico, el elemento inclasificable. *Educación Química*, 24(2), 495-500. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0187893X13725199>

- Singh, R., Parihar, S., & Pratap, V. (2015). Contaminacion por arsénico, consecuencias y técnicas de remediación. *Ecotoxicologia y seguridad ambiental*, 246-250.
- Ticona, M., Tejada, H., & Vargas, E. (2012). Contaminación del agua potable con arsénico y frecuencia del cáncer en la ciudad de Tacna 2010 - 2011. *Revista Medica Basadrina*, 4-6.
- Treybal, R. (1997). *Operaciones de transferencia de masa* (Vol. 2a edición ). Mexico: McGraw-Hill.
- Truque , A. (2020). *Armonización de los estandares de agua potable en las Americas*. Mexico: Organization of American States .
- Valiente , A., & Noriega, J. (1993). *Manual del Ingeniero Químico*. Mexico: Limusa.
- Vazquez, M. (2015). *Tipos de Agitadores*. Mexico: Bioingenieria, farmacia (Instituto tecnologico y de estudio Superior de Monterrey). Obtenido de <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-tecnologico-y-de-estudios-superiores-de-monterrey/bioingenieria-farmaceutica/tipos-de-agitadores/9879523>
- Villa Gonzales , G. F., Chavez Ruiz , M., Mamani Pacsi, C., & Huamani Azorza, J. (2018). Evaluación de remoción de arsénico en agua superficial utilizando filtros domesticos. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 652-656.
- Villa Gonzales , G., Huamani Pacsi, C., Chávez Ruiz, M., & Huamani Azorza, J. (2018). Evaluación de la remoción de arsénico en agua superficial utilinzando filtros domiciliarios. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*, 652-656.

## ANEXOS

### ANEXO 1: Parámetros de calidad de agua

**Tabla 29**

*Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N°031-2010-SA.*

*Límites Máximos permisibles de parámetros de Calidad Organoléptica.*

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Olor	-----	Aceptable
2. Sabor	-----	Aceptable
3. Color	UCV escala Pt/Co	15
4. Turbiedad	UNT	5
5. pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
6. Conductividad (25°C)	µmho/cm	1500
7. Sólidos totales disueltos	mg L <sup>-1</sup>	1000
8. Cloruros	mg Cl <sup>-</sup> L <sup>-1</sup>	250
9. Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> L <sup>-1</sup>	250
10. Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	500
11. Amoníaco	mg N L <sup>-1</sup>	1,5
12. Hierro	mg Fe L <sup>-1</sup>	0,3
13. Manganeseo	mg Mn L <sup>-1</sup>	0,4
14. Aluminio	mg Al L <sup>-1</sup>	0,2
15. Cobre	mg Cu L <sup>-1</sup>	2
16. Zinc	mg Zn L <sup>-1</sup>	3
17. Sodio	mg Na L <sup>-1</sup>	200

UCV = Unidad de color verdadero

UNT = Unidad nefelométrica de turbiedad

*Nota.* (Ministerio de Salud, 2011)

**Tabla 30**

*Límites Máximos Permisibles de Parámetros Químicos Inorgánicos*

Parámetro Inorgánicos	Unidades de medida	Límite máximo permisible
1. Antimonio	mg Sb L <sup>-1</sup>	0,020
2. Arsénico	mg As L <sup>-1</sup>	0,010
3. Bario	mg Ba L <sup>-1</sup>	0,700
4. Boro	mg B L <sup>-1</sup>	1,500
5. Cadmio	mg Cd L <sup>-1</sup>	0,003
6. Cianuro	mg CN <sup>-</sup> L <sup>-1</sup>	0,070
7. Cloro	mg L <sup>-1</sup>	5
8. Clorito	mg L <sup>-1</sup>	0,7
9. Clorato	mg L <sup>-1</sup>	0,7
10. Cromo total	mg Cr L <sup>-1</sup>	0,05
11. Flúor	mg F <sup>-</sup> L <sup>-1</sup>	1,000
12. Mercurio	mg Hg L <sup>-1</sup>	0,001
13. Níquel	mg Ni L <sup>-1</sup>	0,020
14. Nitratos	mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> L <sup>-1</sup>	50,00
15. Nitritos	mg NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> L <sup>-1</sup>	3,00 exposición corta 0,20 exposición larga
16. Plomo	mg Pb L <sup>-1</sup>	0,010
17. Selenio	mg Se L <sup>-1</sup>	0,010
18. Molibdeno	mg Mo L <sup>-1</sup>	0,07

*Nota.* (Ministerio de Salud, 2011)

## ANEXO 2: Estandarización de soluciones

### 2.1 Estandarización del hidróxido de sodio AL 0,1N (0,1M) (ácido – base)

La concentración de la solución problema en una titulación ácido base se calcula, por lo tanto, con

$$V_A \times C_A = V_B \times C_B$$

donde:

$V_A$  = volumen del ácido

$C_A$  = concentración del ácido

$V_B$  = volumen de la base

$C_B$  = concentración de la base

Composición:

Componentes	Cantidad
Hidróxido de sodio al 98%	2,04 g
Agua destilada	500 mL

Modo de la elaboración:

1. Preparar una solución de hidróxido de sodio al 0,1 N,
2. Pesar 2,04g de NaOH y diluirlo en 500 ml de agua destilada en una fiola, aforar y agitar

NaOH 98 % (Pureza del reactivo) para un volumen de 500 mL (0,1 M)

$$M = \frac{\% eq}{L_{sol}} = \frac{w}{L_{sol}}$$
$$0,1 \frac{39,997}{0,5 L} = 0,1 \times 39,997 \times 0,5 L$$
$$w_{NaOH} = 1,9 g$$

Como 98% NaOH

$$1,9 \text{ g NaOH} \times \frac{100 \text{ g NaOH}_{98\%}}{98 \text{ g NaOH}_{100\%}} = 2,04 \text{ g NaOH}$$

3. Pesar 0,2 g biftalato de potasio o Hidrogenoftalato de potasio  $\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_4$  (por duplicado)
4. Diluirlo el biftalato en un matraz de 50 mL (agregar agua destilada por las paredes para que no quede biftalato no disuelto)
5. Agregar 3 a 4 gotas de fenolftaleína
6. Titular con NaOH al 0,1 N (en la bureta)
7. Tomará un color morado tenue, anotar el gasto de NaOH y calcular

Normalidad del NaOH: *Se pesaron:* 0,2106 g y 0,2080 g (por duplicado) de biftalato de potasio

$$\text{NaOH} = \frac{w_{\text{biftalato}} \times F(1000)}{PM_{\text{Biftalato}} \times \text{mL de NaOH gastados en la titulación}}$$

$$\text{NaOH}_1 = \frac{0,2106 \text{ g} \times 1000}{204,2 \text{ g/mol} \times 11,7 \text{ ml}}$$

$$\text{NaOH}_1 = 0,8814 F_c$$

$$\text{NaOH}_2 = \frac{0,208 \text{ g} \times 1000}{204,2 \text{ g/mol} \times 11,6 \text{ ml}}$$

$$\text{NaOH}_2 = 0,8780 F_c$$

Promediamos:

$$\text{NaOH}_{1-2} = \frac{0,8814 + 0,8780}{2}$$

$$\text{NaOH}_{\text{promedio}} = 0,8797 f_c$$

## 2.2 Estandarización del ácido clorhídrico al 0,1N (0,1M)

Composición:

Componentes	Cantidad
Ácido Clorhídrico fumante al 37 %, d = 1,19	4 mL
Agua destilada	500 mL

### Modo de la elaboración:

1. Tomar 4 mL de HCl, colocar una fiola de 500 ml una previa cama de agua destilada por seguridad para luego agregar los 4 mL de HCl; enrazar y agitar
2. Tomar 10 ml de la solución anterior preparada y colocar en un matraz
3. Agregar 5 gotas de Fenolftaleína al matraz
4. Para la titulación, preparar una bureta de 50 mL, preparar una solución de NaOH al 0,1N.
5. Llenar la bureta con solución de NaOH al 0,1N para la titulación: (debe haber un gasto de 11 mL) (muestra una coloración de color morado tenue)

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

$$V_1 = \text{muestra del HCl}$$

$$C_2 = \text{concentraci3n del NaOH}(F_c) \text{ de la anterior parte}$$

$$V_2 = \text{ml gastados de la titulaci3n con NaOH}$$

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

$$C_1 \times 10 \text{ mL} = 0,08797 \times 11 \text{ mL}$$

$$C_1 = \frac{0,08797 \times 11 \text{ mL}}{10 \text{ mL}} = 0,09676$$

Entonces el factor de correcci3n del HCl al 0,1 N es:

$$f_c = \frac{0,09676}{0,1} = 0,9676$$

### ANEXO 3: Determinaci3n de la alcalinidad del agua de Huanuara

$$\text{HCl} = 0,1 \text{ M}$$

$$\text{Vol} = 50 \text{ mL}$$

$$F_c = 0,9676$$

$$\text{pH} = 8,08$$

$$\text{gasto 1} = 1 \text{ mL}$$

$$\text{Cond} = 1533 \mu\text{S/cm}$$

$$\text{gasto 2} = 1 \text{ mL}$$

$$\text{TDS} = 763 \text{ ppm}$$

$$\text{gasto 3} = 1,1 \text{ mL}$$

$$\text{Temp} = 23,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{\text{mgCaCO}_3}{\text{L}} = \frac{V_{\text{acido}} \times N \times 50000}{V_{\text{muestra}}}$$

$$= \frac{1 \text{ mL} \times 0,1 \text{ M} \times 50000}{50 \text{ mL}} = 100 \frac{\text{mgCaCO}_3}{\text{L}}$$

$$= \frac{1,1 \text{ mL} \times 0,1 \text{ M} \times 50000}{50 \text{ mL}} = 110 \frac{\text{mgCaCO}_3}{\text{L}}$$

## ANEXO 4: Realización de la curva de calibración para determinación de hierro por espectrofotómetro UV-VIS

Se determinó la curva patrón de hierro en el equipo de Espectrofotómetro UV- VIS, a partir de una solución patrón de Hierro denominado “Titrisol” Eisen-Standardlösung” de la marca Merck ( $\text{FeCl}_3$  en 15% HCl-1000 mg Fe)

### Figura 36

*Solución patrón de Hierro- Titrisol- Eisen-Standardlösung*



*Nota.* Esta solución contiene tricloruro de hierro ( $\text{FeCl}_3$ ) disuelto en un medio acuoso de ácido clorhídrico (HCl) a una concentración del 15%

### Cálculos para tener una serie de concentraciones:

A partir de la concentración de la solución patrón de Fe que se disolvió en 1L = 1000 mg Fe/L. Se tomó 5 ml de la solución patrón y se disolvió en una fiola de 50 ml, se enrazo con agua destilada, para tener una concentración de 100 mg Fe/L (solución madre).

$$1000 \text{ mgFe/L} \rightarrow 100 \text{ mgFe/L}$$

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

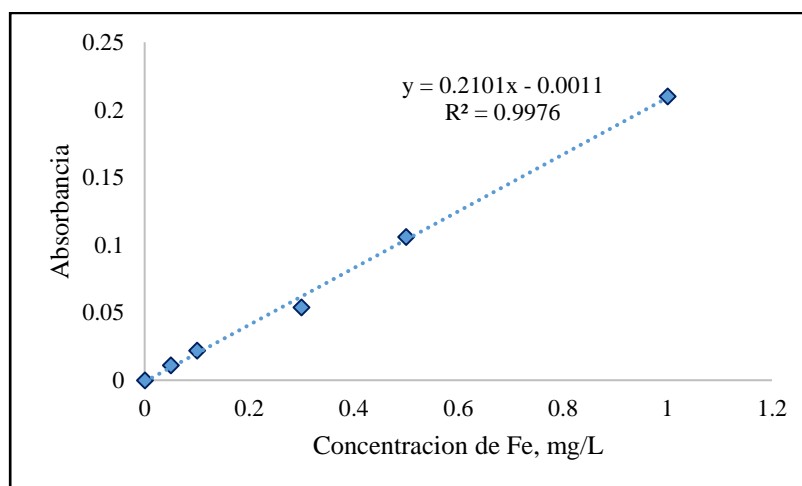
$$V_1 = \frac{100 \text{ mgFe/L} \times 50 \text{ ml}}{1000 \text{ mgFe/L}} = 5 \text{ ml}$$

Entonces de obtuvo la curva patrón de hierro, respecto a la absorbancia

**Tabla 31***Concentración de hierro vs absorbancia*

[C1]=100mg/L			
Alícuota Sol. Patrón Fe	Volumen de dilución	Espectrofotómetro	Absorbancia
[V1]	[V2]	[C2]	[C2] Lectura
mL	mL	As, mg/L	As, mg/L
0	0	0	0
0,25	500	0,05	0,011
0,25	250	0,1	0,022
0,3	100	0,3	0,054
0,5	100	0,5	0,106
1	100	1	0,210

*Nota.* la preparación de la solución patrón fue utilizando una solución conocida (patrón) de hierro de la marca Merck.

**Figura 37***Curva de calibración para determinación de hierro*

*Nota.* A partir de esta curva podemos determinar la concentración de Hierro total de cualquier muestra de agua a analizar, recalando que la concentración de Fe debe cumplir con la Norma Técnica Peruana (0,3 mg Fe/L).

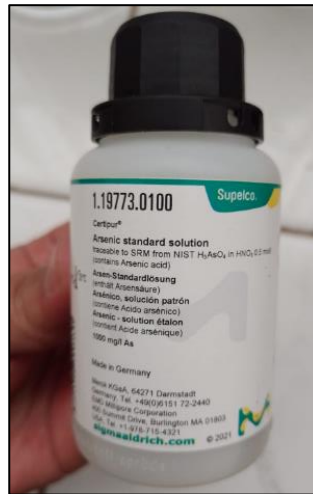
## **ANEXO 5: Realización de la curva de calibración para determinación de Arsénico a partir de una solución patrón**

Se determinó la curva patrón de Arsénico en el Kit Arsenator, a partir de una solución patrón de Arsénico denominado:

**“Solución Estándar de Arsénico – Traceable to SRM from NIST  $H_3AsO_4$  in  $HNO_2$  0,5 mol/l (contains Arsenic acid) de la Marca – Merck Supelco”**

### **Figura 38**

*Solución Estándar de Arsénico Merck Supelco*



*Nota.* Se utilizó solución estándar de arsénico Merck Supelco ( $H_3AsO_4$  en  $HNO_2$  0,5 mol/l) como referencia para análisis.

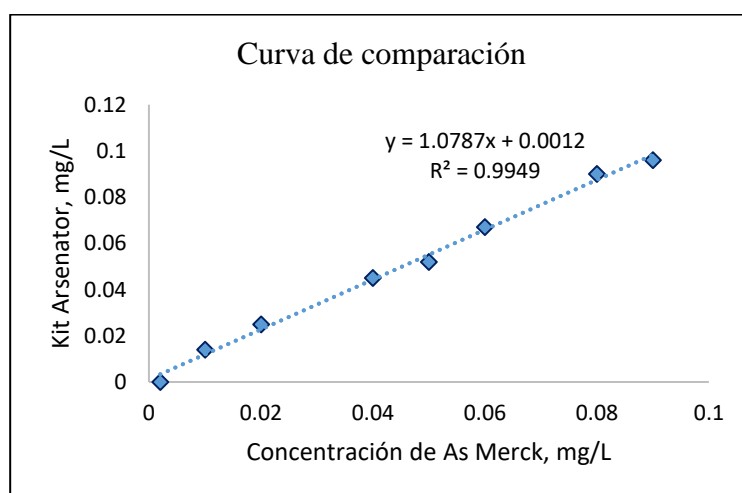
Cálculos para tener una serie de concentraciones: A partir de la ecuación de diluciones

$C_1V_1 = C_2V_2$ , se tiene: (concentración inicial es de 1mg/L)

**Tabla 32***Comparación de resultados de la solución Merck vs kit Arsenator*

[C1]=1mg/L				
Alícuota Sol. Patrón As	Volumen de dilución	Sol. Merck H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	Kit Arsenator	
[V1]	[V2]	[C2]	[C2] lectura	Error
mL	mL	As, mg/L	As, mg/L	Absoluto
0	50	0	0	0
0,1	50	0,002	0	0,002
0,5	50	0,01	0,014	0,004
1	50	0,02	0,025	0,005
2	50	0,04	0,045	0,005
2,5	50	0,05	0,052	0,002
3	50	0,06	0,067	0,007
4	50	0,08	0,09	0,01
4,5	50	0,09	0,096	0,006
5	50	0,1	0,11	0,01
Promedio:				0,0051

*Nota.* los resultados obtenidos corroboran un margen de error promedio de 0,0051, lo cual indica una alta precisión en las mediciones.

**Figura 39***Curva de comparación*

*Nota.* La grafica demuestra la comparacion de la eficiencia del kit de arsenico Palintest con respecto a la utilización de la solucion Merck de As, obteniendo un coeficiente,  $R^2$  de 0,9949 lo que es bastante preciso.

## ANEXO 6: Reactivo de hierro FerroVer para muestra de 10mL– Marca HACH

Figura 40

Reactivo de hierro FerroVer



*Nota.* Reactivo Hach FerroVer para la determinación del Hierro, en el rango de 0,02 - 3,00 mg/l Fe.

## ANEXO 7: Utilización del Espectrofotómetro UV-VIS (Marca PEAK INSTRUMENTS – Serie T-9200s)

Figura 41

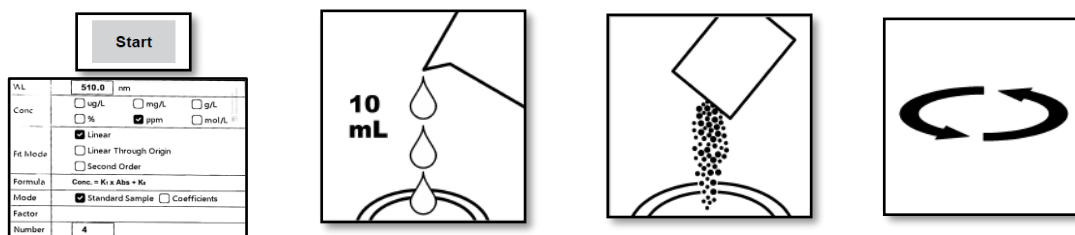
Espectrofotómetro UV-VIS



*Nota.* Mide fotometría, en tres modos, absorbancia, transmitancia y energía, realiza pruebas de cuantitativas, mediciones de cinéticas y escaneo de longitud de onda.

**Tabla 33**

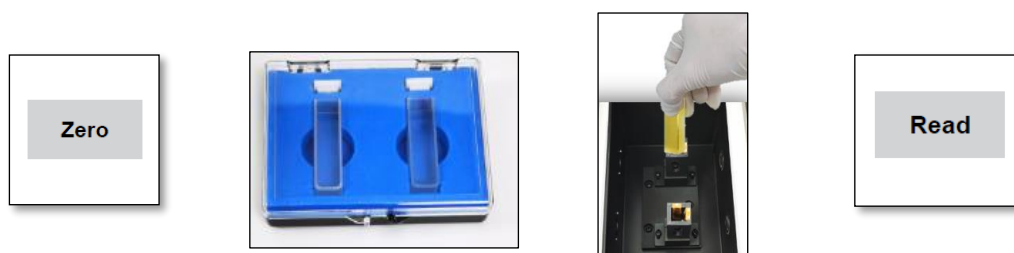
*Procedimiento para la programación y lectura*



- |   |   |  |  |
|---|---|--|--|
| <p>1. En cuantificación se programa la creación de la curva, (los 6 puntos) (incluye el blanco), además longitud de onda, concentración, etc.</p> | <p>2. En un vaso de precipitado se prepara 10 ml de la muestra.</p> | <p>3. Se agrega el contenido un sachet en polvo de reactivo de hierro FerroVer al vaso de precipitado.</p> | <p>4. Se agita el vaso con la muestra para mezclar, el polvo no disuelto no afectara la precisión.</p> |
|---|---|--|--|



- |   |   |   |  |
|---|---|---|--|
| <p>5. Se considera un tiempo de 3-5min a mas, para que ocurra la reacción, se mostrara un color naranja si hay hierro presente.</p> | <p>6. Aparte, se prepara el blanco, de igual manera con 10ml de muestra (sin el sachet), en una celda del espectrofotómetro</p> | <p>7. Se limpia la celda con la muestra en blanco</p> | <p>8. Se inserta la celda en blanco en el equipo del espectrofotómetro</p> |
|---|---|---|--|



- |  |  |  |   |
|--|--|--|---|
| <p>9. Se presiona cero en la pantalla del espectrofotómetro (para tarar)</p> | <p>10. Se agrega la muestra preparada (ver figura anterior) a la celda y se limpia</p> | <p>11. Insertamos las muestras en la porta celda del espectrofotómetro</p> | <p>12. Se presiona leer, los resultados se muestran en ppm, mg/L (depende de la configuración que se le dé)</p> |
|--|--|--|---|

*Nota.* Se debe tener precaución en la manipulación del equipo, respecto al tiempo (20 min) establecido del encendido del espectrofotómetro. .

## ANEXO 8: Utilización de kit de Arsénico de la marca PALINTEST (WATER ANALYSIS TECHNOLOGIES)

Figura 42

Kit de determinación de Arsénico Palintest



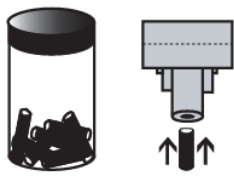
*Nota.* Se muestra la foto del el kit de arsenico de la marca, Palintest, utiliza un sistema de filtro de 3 etapas, contiene una pantalla digital, que simplifica y mejora la lectura, adema tiene una sensibilidad de medición de hasta 2 mgAs/L

### Equipo de operación:



## Técnica:

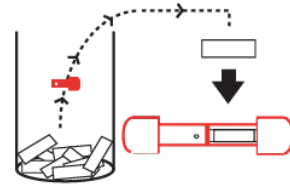
### Etapa 1: Armado de trampa



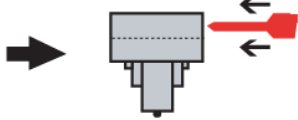
Coloque un filtro de eliminación de sulfuro de hidrógeno e insértelo en el extremo inferior de la trampa



Abra un portaobjetos de filtro rojo



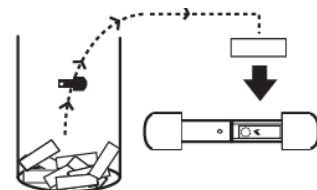
Usando la pinza y guantes coloque un filtro (etiqueta negra) en el portafiltro negro y asegurar



insértelo en el extremo superior de la trampa



Abra un portaobjetos de filtro negro

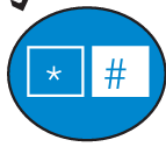


Tome el papel de filtro del de la etiqueta negra y con el uso de la pinza y guantes, insertarlo en su posición.

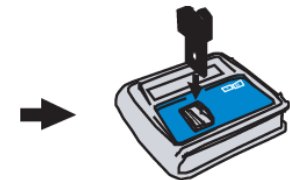
### Etapa 2: Calibración del Arsenator



Coloque la pila, aparece la indicación "Insert Slide"



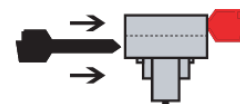
Presione la tecla con \*



Inserte el portafiltro negro (con el filtro puesto)

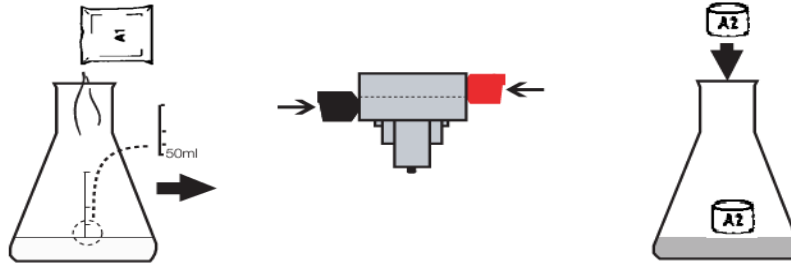


Cuando aparezca "Remove Slide", retírela. Inicia a marcar tiempo



Coloque el portafiltro negro en la trampa.

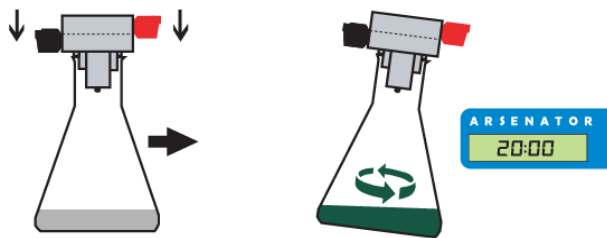
### Etapa 3: Preparación



Tome 50 ml de muestra de agua, en un matraz, y agregue un sobre A1

Asegúrese de que los portafiltras estén ajustados

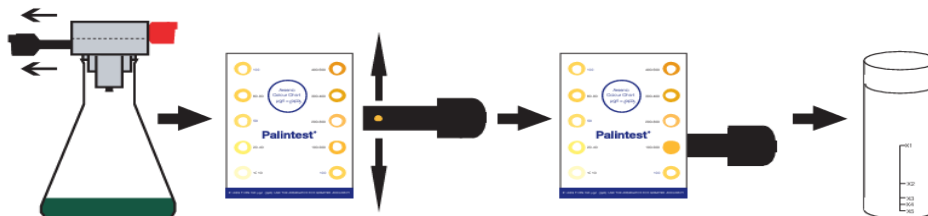
Agregue una tableta o pastilla de borohidruro de sodio



Inmediatamente coloque la trampa

Agitar el matraz para iniciar la reacción. Luego, deje reposar el matraz durante 20 minutos (con referencia al cronómetro del Arsenator).

### Etapa 4: Medición de arsénico



Retire el filtro negro de la trampa

Visualice y compare, el color correspondiente. Haga coincidir con la tabla de colores para obtener el resultado en  $\mu\text{g/l}$  (ppb).

Si el resultado de la prueba es superior a  $500 \mu\text{g/l}$  (ppb), utilice el envase de dilución con agua desionizada. Luego regrese a la etapa 1 y vuelva a realizar la prueba.

## **ANEXO 9: Test de Jarras Digital Marca DAIHAN Científic**

**Figura 43**

*Test de Jarras Digital Marca DAIHAN*



*Nota.* Modelo JT-M6C, implica agitadores de 6 paletas, y opera de 20-300rpm

## **ANEXO 10: Utilización del kit medidor portátil – Multiparametro de Environmental Express PCD380**

**Figura 44**

*kit medidor portátil multiparametro*



*Nota.* Kit medidor portátil inteligente de pH, ORP, conductividad, TDS, resistividad, salinidad y OD de 3 canales resistente al agua.

## ANEXO 11: Estudios preliminares

Nota: Las condiciones de operación iniciales que se tomaron fueron tomadas de trabajos de investigación.

### A. Determinación del material óptimo de óxido de hierro

Condición de operación: tiempo de agitación (3horas), volumen (500 mL) y rpm (30), los resultados fueron:

**Tabla 34**

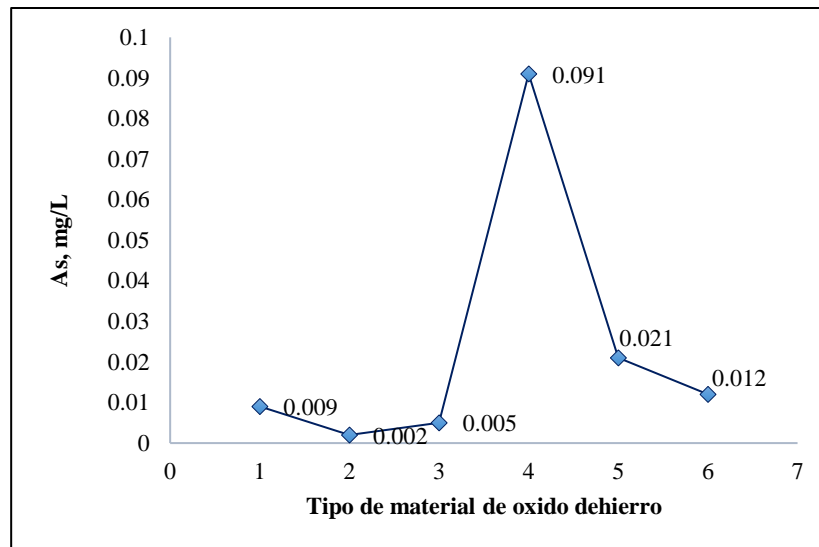
*Determinación del material óptimo de óxido de hierro*

Nro. Jarra	Tipo de material de óxido de hierro	Masa de óxido de hierro, g	Nro. Malla	As, mg/L	pH	Ec, uS/cm	TDS, mg/L	Temp, °C
1	Taller	1,2561	50	0,009	8,13	1244	622	23.4
2	Tornero	1,2599	50	0,002	6,52	1236	619	23.8
3	Dulce	1,2541	50	0,005	7,95	1244	624	23.6
4	Chatarra sin lavar	1,2538	50	0,091	8,48	1240	622	23.3
5	Chatarra lavada	1,2510	50	0,021	7,98	1248	624	23.7
6	Fe galvanizado	1,2529	50	0,012	8,26	1247	622	24

*Nota.* El material seleccionada fue el oxido de hierro proveniente de un talleres de soldadura, por eso lleva nombre de “Taller”.

**Figura 45**

*Comportamiento de los tipos de óxidos de hierro respecto a la remoción de As*



*Nota.* El mejor material de óxido de hierro remueve arsénico del agua, según los análisis, son el tipo: taller, tornero, dulce y galvanizado, pero por sus características el material tornero, dulce y galvanizado, al no ser virutas fáciles de recolectar es que se descartan al igual que los menos efectivos como el tipo chatarra lavada y la chatarra sin lavar. Por tanto, el óptimo material de óxido de hierro, es Taller ya que es mucho más fácil de recolectar y de abundancia, además que es buen socio del agua para la remoción de As, cumpliendo la Norma Técnica Peruana (0,010 mg As/L) lo cual es favorable.

**B. Determinación del número de malla optima variando la masa de óxido de hierro**

Condición de operación: tiempo de agitación (5horas), volumen (500 mL) y rpm (30)

**Tabla 35**

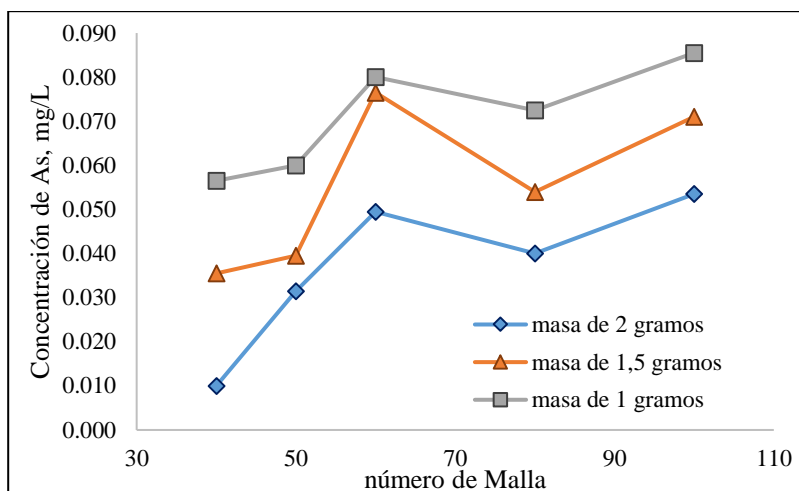
*Determinación del número de malla optima variando la masa de óxido de hierro*

<b>Nro. de Malla</b>	<b>Masa de FeO. g</b>	<b>As, mg/L</b>	<b>pH</b>	<b>Temp °C</b>	<b>TDS, ppm</b>	<b>Ec, uS/cm3</b>	<b>Salinidad, ppt</b>
40	1	0,057	8,340	25,8	633	1274	0,71
50	1	0,060	8,250	26,0	637	1251	0,70
60	1	0,080	8,34	25,8	633	1274	0,71
80	1	0,073	8,26	25,1	637	1274	0,70
100	1	0,086	8,250	26,0	637	1251	0,70
40	1,5	0,036	8,300	25,8	630	1269	0,71
50	1,5	0,040	8,430	26,1	634	1262	0,70
60	1,5	0,077	8,30	25,8	630	1269	0,71
80	1,5	0,054	8,27	25,1	634	1268	0,70
100	1,5	0,071	8,430	26,1	634	1262	0,70
40	2	0,010	8,350	25,7	626	1272	0,71
50	2	0,032	8,250	25,6	634	1250	0,70
60	2	0,045	8,35	25,7	626	1272	0,71
80	2	0,040	8,29	25,1	622	1245	0,69
100	2	0,054	8,250	25,6	634	1250	0,70

*Nota.* Además de los resultados de número de malla optima, también se muestran los resultados de los parámetros físicoquímicos del agua tratada.

**Tabla 36**

*Comportamiento de la remoción de As respecto al número de malla y masa*



*Nota.* En la grafica se muestra el comportamiento a distintas masa de óxido de hierro, respecto al número de malla que se utilizó, por ejemplo, para una dosis o masa de 2 gramos de óxido de hierro, las mejor remocion fue optando el número de malla 40 obteniendo un resultado menor a 0,01 mg/L.

### C. Determinación del tiempo de reacción optimo

Condición de operación: tiempo de agitación (de 3 a 8 horas), volumen (500 mL) y rpm (40)

**Tabla 37**

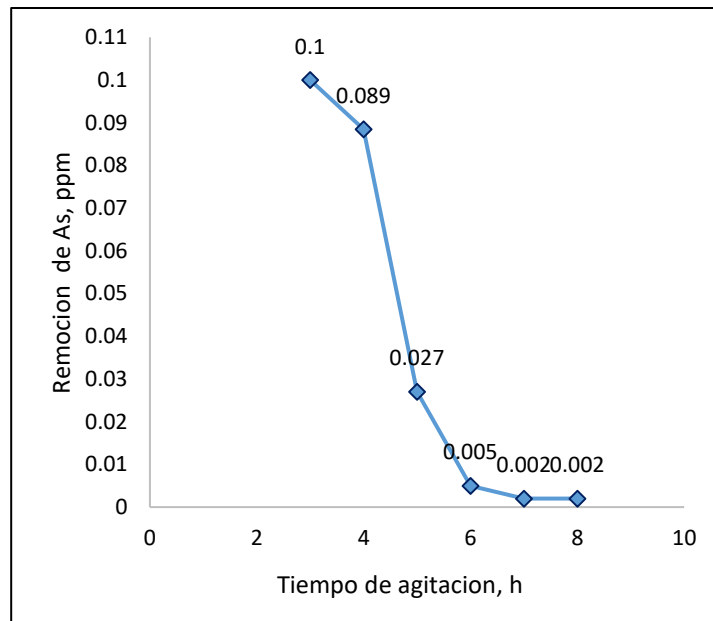
*Determinación del tiempo de reacción optimo*

Nro. Jarra	Tiempo, h	As, mg/L	pH	mV	TDS	Ec, uS/cm	Salinidad, %	Temp, °C	Resistividad, Ω.m
1	3	0,100	8,39	-74,4	643	1284	0,71	25,5	778
2	4	0,089	8,19	-68,9	640	1281	0,70	25,3	780
3	5	0,027	8,28	-76,3	635	1271	0,69	24,8	787
4	6	0,005	8,14	-48,9	618	1250	0,69	25,0	800
5	7	0,002	8,15	-67,0	630	1260	0,69	24,9	793
6	8	0,002	8,18	-68,0	635	1268	0,70	25,0	788

*Nota.* La mejor remoción fue aplicando un tiempo de reaccion de hasta 6 h, obteniendo un resutado de 0,005 mgAs/L

**Figura 46**

*Comportamiento de la remoción de arsénico respecto al número de malla*



*Nota.* La figura muestra que a mayor tiempo de reacción, mayor será la remoción de arsénico del agua de Huanuara. Se observa que, a partir de las 5 horas, hay una remoción óptima según los establecido por la norma peruana. (0,01mgAs/L)

#### **D. Determinación de la velocidad de agitación óptima para remover arsénico**

Se trabajó con 4 velocidades de agitación: 20, 40, 60 y 80 rpm

Condición de operación: tiempo de agitación (3horas), volumen (500 mL) y Masa de óxido de hierro de 1,5 g.

**Tabla 38***Determinación de la velocidad de agitación óptima para remover arsénico*

Nro. Jarra	RPM	As, mg/L	pH	mV	TD S	Ec, uS/cm	Salinidad, %	Temp, °C	Resistividad	Fe, mg/L
1	20	0,097	8,25	-75,2	637	1274	0,73	27,4	785	0,083
2	20	0,100	8,22	-72,5	634	1268	0,72	27,3	789	0,081
3	40	0,033	8,10	-65,5	634	1278	0,73	27,4	789	0,097
4	40	0,036	8,21	-72,3	639	1275	0,75	27,3	782	0,102
5	60	0,053	8,25	-75,2	637	1274	0,73	24,4	785	0,076
6	60	0,058	8,22	-72,5	634	1268	0,72	27,3	789	0,085
7	80	0,077	8,37	-80,9	633	1266	0,72	27,0	790	0,102
8	80	0,072	8,11	-78,9	637	1274	0,72	27,2	785	0,112

*Nota.* Se observa que la agitación óptima encontrada es de 40 rpm, fue la que tuvo una mejor remoción de As, frente a las otras velocidades.

#### **E. Determinación de la remoción de As con óxido de hierro reutilizado (adsorbido de As)**

Condiciones de operación:

Se trabajó a 40 RPM por un rango de tiempo de 5 y 7 horas

Volumen de 500 mL.

Concentración inicial de As, en el agua 0,75 mg/L

pH inicial del agua destilada fue 7,5 y del agua de Huanuara de 8,1

La granulometría del óxido de hierro es el número malla N° 40

Masa de óxido de hierro: 1,5 g

**Tabla 39***Determinación de la remoción de As con óxido de hierro reutilizado*

Jarra	Prueba	Tiempo de reacción, h	As, mg/L	Fe, mg/L	pH	TDS	Ec,uS/cm	Salinidad, %	Temp. °C
1	A.D + FeO reutilizado	5	0,002	0,117	7,78	11,83	23,70	0,01	25,4
2	A.H + FeO reutilizado	5	0,047	0,149	8,12	638	1270	0,72	25,2
3	A.D + FeO reutilizado	7	0,002	0,120	7,87	13,92	28,00	0,02	25,7
4	A.H + FeO reutilizado	7	0,002	0,078	8,22	634	1268	0,72	25,4

*A.D.: Agua de Huanuara // A.H. : agua destilada*

*Nota.* El óxido de hierro reutilizado sigue siendo un buen adsorbente del arsénico, tanto en un medio artificial (agua destilada), como en agua concentrada de arsénico, demostrando que, con 7 horas de agitación, cumple con la normativa peruana (0,01 mgAs/L).

#### **F. Determinación del arreglo experimental y resultados para la remoción de arsénico total, hierro residual y pH residual**

En la Tabla 40 se presenta el diseño experimental compuesto central, donde se incluyen las variables independientes en sus formas codificada y no codificada, junto con los resultados correspondientes.

**Tabla 40***Determinación del arreglo experimental y resultados*

		Concentración inicial del agua, mgAs/L				0,75			
Nro. Prueba	Variables de nivel codificadas		Variables de nivel reales		Variables de Respuesta		pH	% de remoción de As	
	Masa de FeO, g	Tiempo de reacción, h	Masa de FeO, g	Tiempo de reacción, h	Arsénico Residual Total (mg/L)	Hierro Residual Total (mg/L)			
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>			
1	-1	+1	2	6	0,042	0,049	8,11	94,08	
2	+1	-1	4	4	0,005	0,067	8,24	99,06	
3	0	+ $\alpha$	3	6,41421	0,013	0,077	8,18	98,27	
4	+1	+1	4	6	0,002	0,090	8,31	99,73	
5	+ $\alpha$	0	4,41421	5	0,007	0,118	8,26	99,68	
6	-1	-1	2	4	0,110	0,043	8,09	85,26	
7	0	+ $\alpha$	3	3,58579	0,048	0,045	8,19	93,60	
8	+ $\alpha$	0	1,58579	5	0,147	0,046	8,08	80,40	
9	0	0	3	5	0,028	0,060	8,24	96,27	
10	0	0	3	5	0,025	0,051	8,23	96,67	
11	0	0	3	5	0,019	0,056	8,17	97,47	

*Nota.* Se observa el resultado de las concentraciones de arsénico de un total de 11 muestras que fueron tratadas y analizadas, algunas pruebas superaron el valor establecido de 0,01 mgAs/L, pero esto se debe a que como es un análisis estadístico el objetivo es explorar y optimizar las respuestas de este sistema, mediante la evaluación de los efectos y posibles interacciones de los dos factores (masa de óxidos de hierro y tiempo de reacción) respecto a sus combinaciones factoriales de niveles bajos y altos de los factores. Respecto a la concentración final de hierro, ningún valor sobrepasa la normativa

(0,3mgFe/L), de la misma manera para el pH (6,5 a 8,5). Estas pruebas alcanzaron remociones del 80% al 99% para concentraciones de remoción arsénico.

**Análisis estadístico para la remoción de arsénico.**

En la Tabla 41 se muestra el análisis de varianza (ANOVA), el cual ilustra cómo los factores experimentales influyen en la remoción del arsénico total residual. Se especifican las fuentes de variación atribuidas a la regresión y a los errores residuales, además del valor del estadístico F, que es de 56.30, indicando que el modelo tiene significancia estadística

**Tabla 41**

*Análisis de varianza (ANOVA)*

Fuente de variación		Suma de cuadrados (SC)	Grados de Libertad (gl)	Suma de cuadrados medios (SCM)	Estadístico F
SSR	Debido a la regresión	0,02086793	5	0,009489953	56,30
SSE	Debido a los residuales de error	0,00084280	5	0,000168559	
SST	Total	0,021710727	10		

*Nota:* Tabla generada utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI

A continuación, se muestran los coeficientes del modelo, los efectos principales y las interacciones, junto con el error estándar de cada factor y la significancia estadística correspondiente, para el diseño de superficie factorial  $2^2$  + punto estrella.

**Tabla 42***Coefficientes del modelo*

<b>Parámetro</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Error típico</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Probabilidad</b>
A: Masa de óxido de hierro, g	-0,26212411	0,26296691	9,340235543	0,0002
B: Tiempo de reacción, h	-0,06131158	0,062154382	3,281767816	0,0219
AA	0,023000055	-0,022157258	4,209513036	0,0084
AB	0,01625	-0,015407203	2,503996805	0,0543
BB	-0,00025006	0,00109286	0	0,9653

*Nota:* Tabla generada utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI

### **Resumen de ajuste estadístico para el Arsénico total residual**

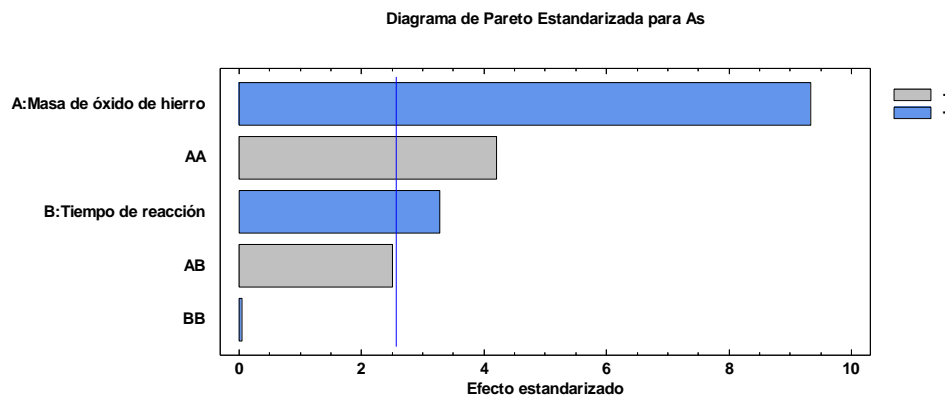
**Tabla 43***Resumen de ajuste estadístico para el Arsénico total residual*

<b>Estadística de regresión</b>	
Coefficiente de determinación, R <sup>2</sup> , %	96,1181
R <sup>2</sup> (Ajustada por g.l), %	93,5301
Observaciones (experimentos)	11

*Nota:* Tabla generada utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI

## Figura 47

### Diagrama de Pareto estandarizada para As

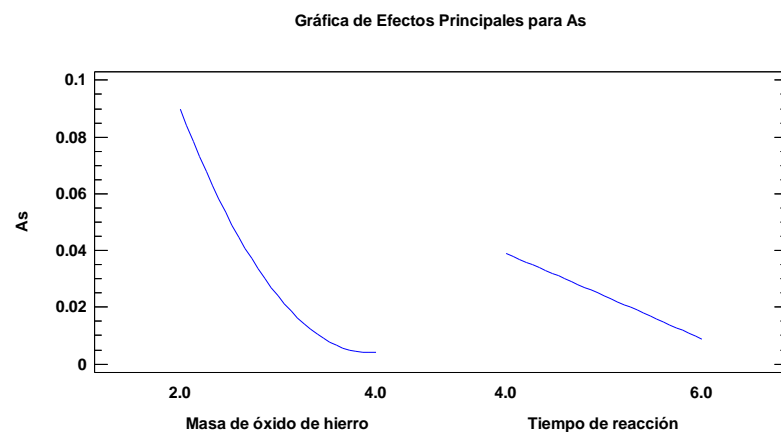


*Nota:* Diagrama generado utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI

El diagrama de Pareto (Figura 45) indica que los dos factores principales, la masa de óxido de hierro (A) y el tiempo de reacción (B), junto con el factor cuadrático (AA), representado por barras horizontales que superan la línea horizontal azul, son estadísticamente significativos. El color azul de la barra indica que, a mayores valores del factor, la concentración final de arsénico será menor, mientras que el color gris de la barra indica que, a mayores valores del factor, la concentración final de arsénico será mayor.

## Figura 48

### Efecto principales para As



*Nota:* Diagrama generado utilizando el software Stargraphics Centurión, versión XVI

El comportamiento de los efector principales mostrados en la figura 46, complementa lo antes mencionado, claramente el aumento de la masa de óxido de hierro (A) reduce la concentración de arsénico fomentando a la adsorción, lo mismo pasa para el caso del tiempo de reacción (B) se muestra que a mayor tiempo de favorecer la reducción de la concentración final de arsénico.

### **Desarrollo de la ecuación del modelo de regresión para el arsénico**

El diseño de superficie de respuesta factorial  $2^2+4$  punto estrella + 3 puntos centrales, se eligió con el fin de relacionar las variables  $x_1$ : Arsénico total residual (mg/L) y las variables independientes  $x_1$ : Masa de óxido de hierro,  $x_2$ : Tiempo de reacción. A través de esta relación dio como resultado a una ecuación empírica, los valores de los coeficientes de la ecuación del modelo la entramos en la Tabla 41, en resumen, tenemos

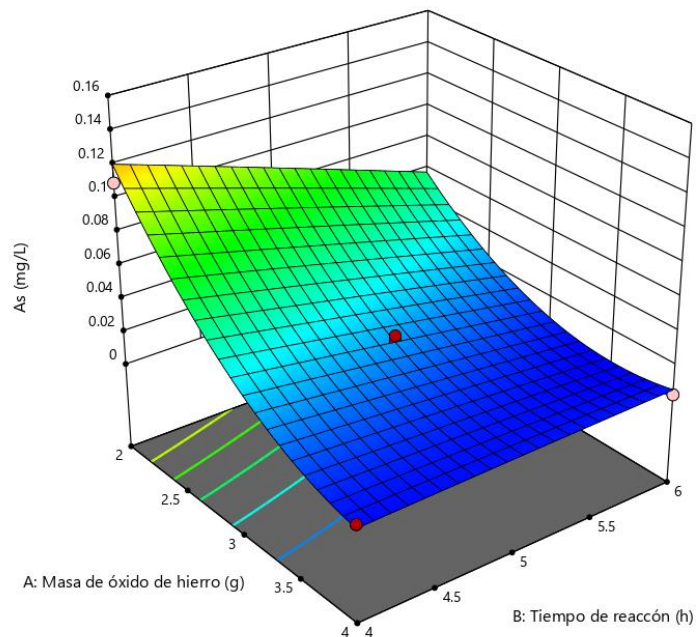
$$y_1(\text{As}) = 0,672431 - 0,262124 \times M_{\text{Fe}} - 0,0613116 \times t_{\text{resid.}} \\ + 0,0230001 \times M_{\text{Fe}}^2 + 0,01625 \times M_{\text{Fe}} \times t_{\text{resid.}} - 0,000250062 \times t_{\text{resid.}}^2$$

### **Efecto combinado de las condiciones de operación sobre la remoción de arsénico**

La gráfica de superficie de respuesta tridimensional, muestra cómo varía la concentración de arsénico en función de dos factores, la masa de óxido de hierro y el tiempo de reacción.

**Figura 49**

*Superficie de respuesta tridimensional para As*



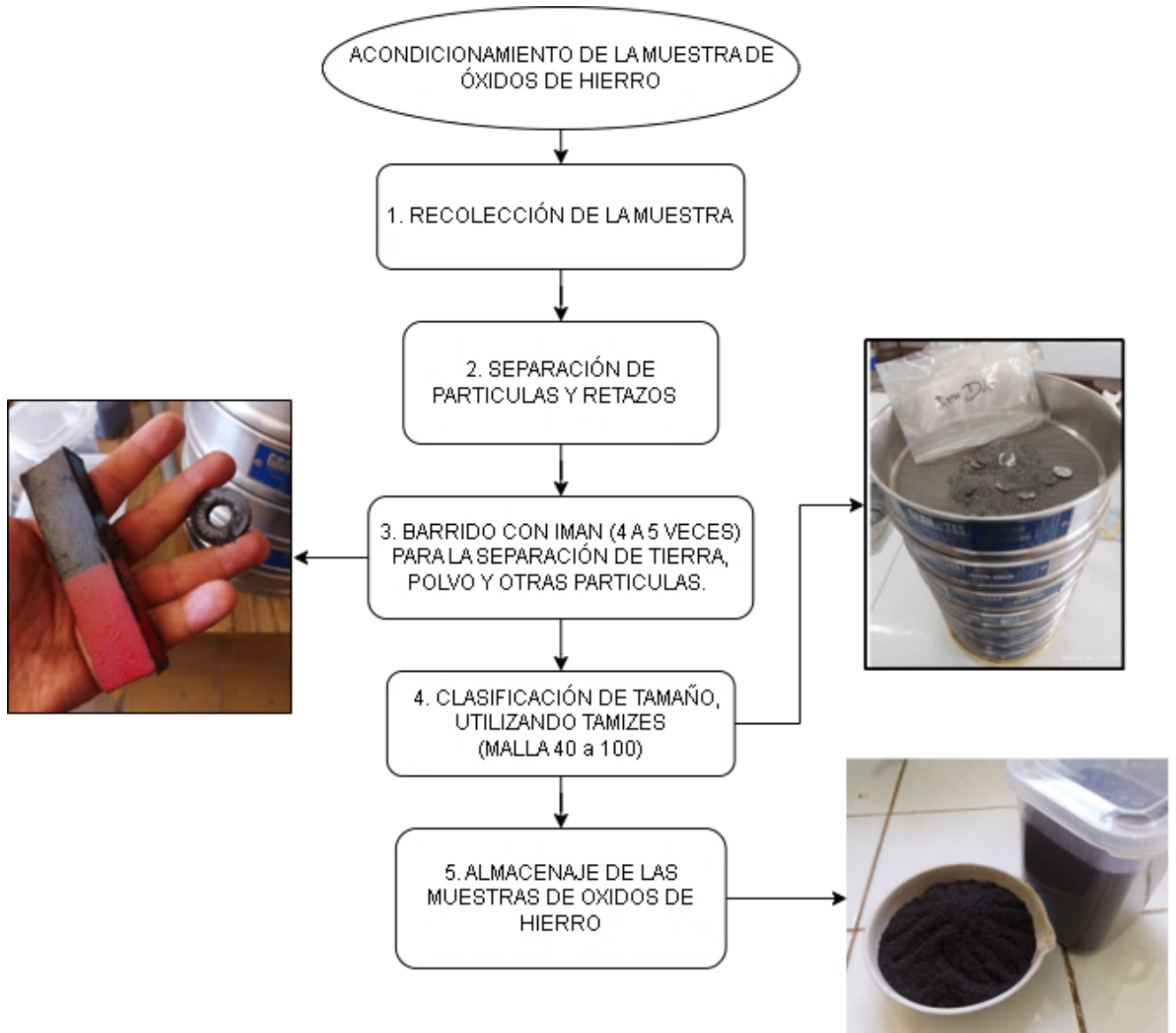
*Nota:* Gráfica generada utilizando el software Design Expert versión 12

Se observa la superficie coloreada, en gradientes que indican los niveles de la respuesta (concentración de arsénico). Los colores van desde azul (bajas concentraciones) pasando por verde, hasta un color amarillo (altas concentraciones). Los puntos rojos sobre la superficie, representan combinaciones específicas de los factores probados durante el experimento. Respecto al efecto de la masa de óxido de hierro, al aumentar la masa, la concentración de arsénico tiende a disminuir, el lado izquierdo de 2 a 2,5gramos (baja masa de óxido de hierro), muestra mayor concentración de arsénico, especialmente cerca de los valores bajos del tiempo de reacción (4 a 5horas) mientras que el lado derecho de 3,5 a 4gramos (alta masa de óxido de hierro), muestra una concentración de remoción de arsénico mucho menor.

## ANEXO 12. Acondicionamiento de la muestra de óxido de hierro

**Figura 50**

*Acondicionamiento de la muestra de óxido de hierro*



*Nota:* Para realizar el acondicionamiento de la muestra, se utilizó implementos de seguridad como guantes, respirador y lentes, ya que genera polvo.

**Tabla 44***Serie de mallas ASTM y equivalente de Tyler*

A.S.T.M – E.11 – 61						
Designación de la malla		Abertura de la malla		Diámetro nominal de alambre		Designación (equivalente a Tyler)
Estándar	Alternativa	mm	Pulg. (equiv. aprox.)	mm	Pulg. (equiv. aprox.)	
595micras	No.30	0,595	0,0234	0,390	0,0154	28 malla
420micras	No.40	0,420	0,0165	0,290	0,0114	35 malla
297micras	No.50	0,297	0,0117	0,215	0,0085	48 malla
250micras	No.60	0,250	0,0098	0,180	0,0071	60 malla
177micras	No.80	0,177	0,0020	0,131	0,0052	82 malla
149micras	No.100	0,149	0,0059	0,119	0,0043	100 malla
74 micras	No.200	0,074	0,0029	0,053	0,0021	200 malla

*Nota.* Adaptado de *Manual del Ingeniero Químico* (p.21-46), por Perry R.H – Chilton

C.H., 1989, McGraw Hill

## ANEXO 14: Resultado de la SGS (ICP-MS)



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



### **INFORME DE ENSAYO MA2412224 Rev. 0**

#### **UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.**

AV. MIRAFLORES NRO. SN CERCADO (CIUDAD UNIVERSITARIA)TACNA - TACNA - TACNA

ENV / LB-354898-002

Fecha de Recepción SGS : 19-04-2024  
Fecha de Ejecución : Del 19-04-2024 al 25-04-2024  
Muestreo Realizado Por : CLIENTE

Estación de Muestreo
BAT140-5
BAT140-7
BAT140-9
BAT160-5

Emitido por SGS del Perú S.A.C.

Impreso el 25/04/2024

**Carmen R. Guerrero Cantorin**  
C.Q.P.1198  
Coordinador de Calidad

"Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 1 de 12

SGS del Perú S.A.C. | Av. Elmer Faucett 3348 Callao 1 Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe  
Ernesto Gunther 275 Parque Industrial Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com  
Jr. Arnaldo Marquez Ba. San Antonio Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO  
MA2412224 Rev. 0**

Estación de Muestreo
BAT160-7
BAT160-9
BAT180-5
BAT180-7
BAT180-9
BATPC-1
BATPC-2
BATPC-3
BATPC-4
BATPC-5
HUAIN-0

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 2 de 12

SGS del Perú S.A.C. | Av. Elmer Faucett 3348 Callao 1 Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe  
Ernesto Gunther 275 Parque Industrial Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com  
Jr. Arnaldo Márquez Ba. San Antonio Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO  
MA2412224 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BAT140-5	BAT140-7
FECHA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
HORA DE MUESTREO					11:00:00	11:20:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE RIO	AGUA DE RIO
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
<b>Metales Totales</b>						
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.00013	<0.00013	<0.00013
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.02521 ± 0.00010	0.02855 ± 0.00010
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0370 ± 0.0089	0.0327 ± 0.0078
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	4.693 ± 0.94	5.065 ± 1.013
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00046 ± 0.00010	0.00023 ± 0.000050
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	93.387 ± 23.35	94.999 ± 23.75
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0578 ± 0.0098	0.0600 ± 0.010
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00055 ± 0.000070	0.00061 ± 0.000080
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.01017 ± 0.0021	0.00510 ± 0.0011
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.5903 ± 0.12	0.6135 ± 0.13
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0136 ± 0.0029	0.0239 ± 0.0050
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.2618 ± 0.055	0.2688 ± 0.056
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	29.645 ± 6.22	31.099 ± 6.53
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.16949 ± 0.036	0.17933 ± 0.038
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00293 ± 0.00062	0.00280 ± 0.00059
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Níquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0075 ± 0.0016	0.0071 ± 0.0015
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	21.25 ± 0.56	22.20 ± 0.58
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0658 ± 0.014	0.0681 ± 0.014
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	55.48 * ± 14.42	54.23 * ± 14.10
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	25.93 ± 6.74	25.35 ± 6.59
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	138.410 ± 29.066	144.316 ± 30.31
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0039 ± 0.00010	0.0045 ± 0.00010
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.002854 ± 0.00060	0.002802 ± 0.00059
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.1628 ± 0.034	0.0814 ± 0.017
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BAT140-9	BAT160-5
FECHA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
HORA DE MUESTREO					11:40:00	12:00:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE RIO	AGUA DE RIO
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
<b>Metales Totales</b>						
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	<0.00013	<0.00013
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.01883 ± 0.00010	0.02027 ± 0.00010
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0325 ± 0.0078	0.0419 ± 0.010
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	5.427 ± 1.085	5.186 ± 1.037
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO  
MA2412224 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BAT140-9	BAT160-5
FECHA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
HORA DE MUESTREO					11:40:00	12:00:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE RIO	AGUA DE RIO
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
<b>Metales Totales</b>						
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	95.172 ± 23.79	95.913 ± 23.98
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0613 ± 0.010	0.0586 ± 0.010
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00063 ± 0.000080	0.00060 ± 0.000080
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00477 ± 0.0010	0.01233 ± 0.0026
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.6243 ± 0.13	0.5992 ± 0.13
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0191 ± 0.0040	0.0286 ± 0.0060
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.2710 ± 0.057	0.2682 ± 0.056
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	31.243 ± 6.56	30.642 ± 6.43
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.18658 ± 0.039	0.11818 ± 0.025
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00283 ± 0.00059	0.00304 ± 0.00064
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0071 ± 0.0015	0.0059 ± 0.0012
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	22.00 ± 0.57	22.14 ± 0.58
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0696 ± 0.015	0.0678 ± 0.014
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	54.30 * ± 14.12	55.28 * ± 14.37
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	25.38 ± 6.80	25.84 ± 6.72
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	145.904 ± 30.84	143.852 ± 30.21
Taio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0042 ± 0.00010	0.0052 ± 0.00010
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.002518 ± 0.00053	0.002887 ± 0.00061
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0666 ± 0.014	0.2094 ± 0.044
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BAT160-7	BAT160-9
FECHA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
HORA DE MUESTREO					12:20:00	12:40:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE RIO	AGUA DE RIO
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
<b>Metales Totales</b>						
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	<0.00013	<0.00013
Arsenico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.01632 ± 0.00010	0.00546 ± 0.00010
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0324 ± 0.0078	0.0288 ± 0.0069
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	5.357 ± 1.071	4.999 ± 1.000
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	93.125 ± 23.28	96.291 ± 24.073
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0590 ± 0.010	0.0550 ± 0.0094
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00065 ± 0.000080	0.00068 ± 0.000090
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00561 ± 0.0012	0.00536 ± 0.0011
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.6034 ± 0.13	0.5589 ± 0.12

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 4 de 12



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO  
MA2412224 Rev. 0**

IDENTIFICACION DE MUESTRA					BAT160-7	BAT160-9
FECHA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
HORA DE MUESTREO					12:20:00	12:40:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE RIO	AGUA DE RIO
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
<b>Métodos Totales</b>						
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0424 ± 0.0089	0.0151 ± 0.0032
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.2697 ± 0.057	0.2495 ± 0.052
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	32.024 ± 6.72	28.361 ± 5.96
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.12485 ± 0.026	0.11891 ± 0.025
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00275 ± 0.00058	0.00267 ± 0.00056
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0054 ± 0.0011	0.0056 ± 0.0012
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	21.86 ± 0.57	20.02 ± 0.53
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0674 ± 0.014	0.0626 ± 0.013
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	53.60 * ± 13.94	54.30 * ± 14.12
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	25.05 ± 6.51	25.38 ± 6.60
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	138.734 ± 29.13	148.912 ± 31.27
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0046 ± 0.00010	0.0046 ± 0.00010
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.002688 ± 0.00056	0.002474 ± 0.00052
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0648 ± 0.014	0.0416 ± 0.0087
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACION DE MUESTRA					BAT180-5	BAT180-7
FECHA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
HORA DE MUESTREO					13:00:00	13:20:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE RIO	AGUA DE RIO
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
<b>Métodos Totales</b>						
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	<0.00013	<0.00013
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.01610 ± 0.00010	0.01913 ± 0.00010
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0378 ± 0.0091	0.0401 ± 0.0096
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	5.153 ± 1.031	5.072 ± 1.014
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00040 ± 0.000080	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	95.990 ± 24.00	98.604 ± 24.65
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0601 ± 0.010	0.0606 ± 0.010
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00063 ± 0.000080	0.00063 ± 0.000080
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00659 ± 0.0014	0.00653 ± 0.0012
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.6072 ± 0.13	0.5609 ± 0.12
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.1050 ± 0.022	0.1327 ± 0.028
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.2676 ± 0.056	0.2493 ± 0.052
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 5 de 12



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO  
MA2412224 Rev. 0**

IDENTIFICACION DE MUESTRA					BAT180-5	BAT180-7
FECHA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
HORA DE MUESTREO					13:00:00	13:20:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE RIO	AGUA DE RIO
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
<b>Metales Totales</b>						
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	31.160 ± 6.54	31.456 ± 6.61
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.07474 ± 0.016	0.08400 ± 0.018
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00259 ± 0.00054	0.00260 ± 0.00055
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0055 ± 0.0012	0.0050 ± 0.0011
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	22.25 ± 0.58	20.54 ± 0.54
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0691 ± 0.015	0.0644 ± 0.014
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	56.10 * ± 14.59	55.42 * ± 14.41
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	26.22 ± 6.82	25.90 ± 6.73
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	147.989 ± 31.078	148.617 ± 31.21
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
torio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0046 ± 0.00010	0.0050 ± 0.00010
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.003127 ± 0.00066	0.002574 ± 0.00054
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.1281 ± 0.027	0.1548 ± 0.033
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACION DE MUESTRA					BAT180-9	BATPC-1
FECHA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
HORA DE MUESTREO					13:40:00	14:00:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE RIO	AGUA DE RIO
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
<b>Metales Totales</b>						
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	<0.00013	<0.00013
Arsenico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.00491 ± 0.00010	0.02778 ± 0.00010
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0331 ± 0.0079	0.0342 ± 0.0082
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	5.318 ± 1.064	5.230 ± 1.046
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	95.450 ± 23.86	93.713 ± 23.43
Cenizo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0606 ± 0.010	0.0586 ± 0.010
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00062 ± 0.000080	0.00052 ± 0.000070
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00314 ± 0.00066	0.00390 ± 0.00082
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	6.026 ± 0.13	5.911 ± 0.12
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0885 ± 0.019	0.0830 ± 0.017
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.2713 ± 0.057	0.2653 ± 0.056
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	30.747 ± 6.46	30.284 ± 6.36
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.09259 ± 0.019	0.08660 ± 0.018
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00332 ± 0.00070	0.00291 ± 0.00061
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0048 ± 0.0010	0.0041 ± 0.00090
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 6 de 12



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO  
MA2412224 Rev. 0**

IDENTIFICACION DE MUESTRA					BAT180-9	BATPC-1
FECHA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
HORA DE MUESTREO					13:40:00	14:00:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE RIO	AGUA DE RIO
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
<b>Elementos Totales</b>						
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	22.23 ± 0.58	21.76 ± 0.57
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0690 ± 0.015	0.0668 ± 0.014
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	51.79 * ± 13.47	53.23 * ± 13.84
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	24.21 ± 6.29	24.88 ± 6.47
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	145.524 ± 30.56	144.429 ± 30.33
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0050 ± 0.00010	0.0047 ± 0.00010
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.002491 ± 0.00052	0.002883 ± 0.00060
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0540 ± 0.011	0.0730 ± 0.015
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACION DE MUESTRA					BATPC-2	BATPC-3
FECHA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
HORA DE MUESTREO					14:20:00	14:40:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE RIO	AGUA DE RIO
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
<b>Elementos Totales</b>						
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	<0.00013	<0.00013
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.02997 ± 0.00010	0.02583 ± 0.00010
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0311 ± 0.0075	0.0305 ± 0.0073
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	5.232 ± 1.046	5.400 ± 1.080
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	91.315 ± 22.83	92.710 ± 23.18
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0569 ± 0.0097	0.0581 ± 0.0099
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00055 ± 0.000070	0.00053 ± 0.000070
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00434 ± 0.00091	0.00442 ± 0.00093
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.5892 ± 0.12	0.5918 ± 0.12
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0770 ± 0.016	0.0751 ± 0.016
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.2561 ± 0.054	0.2652 ± 0.056
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	29.337 ± 6.16	29.944 ± 6.29
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.08359 ± 0.018	0.07757 ± 0.016
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00269 ± 0.00056	0.00295 ± 0.00062
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0042 ± 0.00090	0.0048 ± 0.0010
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	20.97 ± 0.55	21.38 ± 0.56
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0660 ± 0.014	0.0671 ± 0.014
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	0.0021 ± 0.00040
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	52.14 * ± 13.56	52.19 * ± 13.57
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	24.37 ± 6.34	24.40 ± 6.34
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	137.939 ± 28.97	142.031 ± 29.83
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 7 de 12

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348  
Ernesto Gunther 275  
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1  
Parque Industrial  
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe  
Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com  
Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO  
MA2412224 Rev. 0**

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BATPC-2	BATPC-3
FECHA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
HORA DE MUESTREO					14:20:00	14:40:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE RIO	AGUA DE RIO
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
<b>Metales Totales</b>						
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0044 ± 0.00010	0.0038 ± 0.00010
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.002746 ± 0.00058	0.002954 ± 0.00062
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0584 ± 0.012	0.0505 ± 0.011
Zirconio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA					BATPC-4	BATPC-5
FECHA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
HORA DE MUESTREO					15:00:00	15:20:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE RIO	AGUA DE RIO
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
<b>Metales Totales</b>						
Aluminio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Antimonio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00013	<0.00013	<0.00013
Arsénico Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.02225 ± 0.00010	0.01310 ± 0.00010
Bario Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0265 ± 0.0004	0.0311 ± 0.00075
Berilio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003
Boro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.002	0.006	5.366 ± 1.073	5.351 ± 1.070
Cadmio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003	<0.00003
Calcio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.003	0.009	85.190 ± 21.30	95.448 ± 23.86
Cerio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0544 ± 0.0092	0.0595 ± 0.010
Cobalto Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00054 ± 0.000070	0.00055 ± 0.000070
Cobre Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.00368 ± 0.00077	0.00547 ± 0.0012
Cromo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Estaño Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.5455 ± 0.11	0.6008 ± 0.13
Fósforo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047	<0.047
Galio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0729 ± 0.015	0.0866 ± 0.018
Lantano Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015	<0.00015
Litio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.2455 ± 0.052	0.2725 ± 0.057
Lutecio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	27.906 ± 5.86	28.803 ± 6.049
Manganeso Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.07331 ± 0.015	0.08555 ± 0.018
Mercurio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00295 ± 0.00062	0.00315 ± 0.00066
Niobio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0043 ± 0.00090	0.0044 ± 0.00090
Plata Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	<0.000010	<0.000010
Plomo Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Potasio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	19.77 ± 0.53	21.85 ± 0.57
Rubidio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0614 ± 0.013	0.0682 ± 0.014
Selenio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013	<0.0013
Silice Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.09	0.27	48.31 ± 12.56	52.50 ± 13.65
Silicio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.04	0.13	22.58 ± 5.87	24.54 ± 6.38
Sodio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.006	0.019	144.105 ± 30.26	135.903 ± 28.54
Talio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003	<0.003
Thorio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0029 ± 0.00010	0.0044 ± 0.00010
Uranio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.000003	0.000010	0.002643 ± 0.00056	0.002970 ± 0.00062
Vanadio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW EPA200 8 AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0471 ± 0.0099	0.0591 ± 0.012

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 8 de 12

SGS del Perú S.A.C.

Av. Elmer Faucett 3348  
Ernesto Gunther 275  
Jr. Arnaldo Márquez

Callao 1  
Parque Industrial  
Ba. San Antonio

Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe  
Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com  
Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO  
MA2412224 Rev. 0**

IDENTIFICACION DE MUESTRA					BATPC-4	BATPC-5
FECHA DE MUESTREO					18/04/2024	18/04/2024
HORA DE MUESTREO					15:00:00	15:20:00
CATEGORIA					AGUA NATURAL	AGUA NATURAL
SUB CATEGORIA					AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUPERFICIAL
					AGUA DE RIO	AGUA DE RIO
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre	Resultado ± Incertidumbre
<b>Metales Totales</b>						
Zirconio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045	<0.00045

IDENTIFICACION DE MUESTRA					HUAIN-0
FECHA DE MUESTREO					13/05/2024
HORA DE MUESTREO					15:00:00
CATEGORIA					AGUA PARA USO
SUB CATEGORIA					Y CONSUMO HUMANO
					AGUA DE BEBIDA
Parámetro	Referencia	Unidad	LD	LC	Resultado ± Incertidumbre
<b>Metales Totales</b>					
Aluminio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.001	0.003	0.023 ± 0.020
Antimonio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00004	0.00013	<0.00013
Arsénico Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.53003 ± 0.011
Bario Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0484 ± 0.012
Berilio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006
Bismuto Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00001	0.00003	<0.00003
Boro Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.002	0.006	5.107 ± 1.021
Cadmio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00035 ± 0.000070
Calcio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.003	0.009	93.135 ± 23.28
Cerio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00008	0.00024	<0.00024
Cesio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.0562 ± 0.0096
Cobalto Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00001	0.00003	0.00025 ± 0.000030
Cobre Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00003	0.00009	0.01020 ± 0.0021
Cromo Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003
Estafío Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010
Estroncio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.6319 ± 0.13
Fósforo Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.015	0.047	<0.047
Galio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00004	0.00012	<0.00012
Germanio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006
Hafnio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00005	0.00015	<0.00015
Hierro Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0004	0.0013	0.0213 ± 0.015
Lantano Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015
Litio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0001	0.0003	0.2586 ± 0.054
Lutecio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006
Magnesio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.001	0.003	29.545 ± 6.20
Manganeso Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.17712 ± 0.037
Mercurio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00003	0.00009	<0.00009
Molibdeno Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00002	0.00006	0.00060 ± 0.00013
Niobio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0005	0.0015	<0.0015
Niquel Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0039 ± 0.00080
Plata Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00003	0.00010	<0.00010
Plomo Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0024 ± 0.00060
Potasio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.04	0.13	20.33 ± 0.54
Rubidio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0003	0.0009	0.0650 ± 0.014
Selenio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013
Silice Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.09	0.27	60.65 * ± 15.77
Silicio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.04	0.13	28.35 ± 7.37
Sodio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.006	0.019	136.109 ± 28.58
Talio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006
Tantalio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0007	0.0021	<0.0021
Teluro Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.001	0.003	<0.003
Thorio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00006	0.00019	<0.00019
Titanio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	0.0056 ± 0.00010
Uranio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00003	0.00010	0.003296 ± 0.00069
Vanadio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003
Wolframio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0002	0.0006	<0.0006
Yterbio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00002	0.00006	<0.00006
Zinc Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.0008	0.0026	0.0514 ± 0.011
Zirconio Total	EW_EPA200_8_AQ	mg/L	0.00015	0.00045	<0.00045

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 9 de 12

SGS del Perú S.A.C. | Av. Elmer Faucett 3348 | Callao 1 | Callao | t (511) 517 1900 | www.sgs.pe  
 Ernesto Gunther 275 | Parque Industrial | Arequipa | t (054) 213 506 | e Pe.servicios@sgs.com  
 Jr. Arnaldo Márquez | Ba. San Antonio | Cajamarca | t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO  
MA2412224 Rev. 0**

**CONTROL DE CALIDAD**

LC: Límite de cuantificación  
 MB: Blanco del proceso.  
 LCS %Recovery: Porcentaje de recuperación del patrón de proceso.  
 MS %Recovery: Porcentaje de recuperación de la muestra adicionada.  
 MSD %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados de la muestra adicionada.  
 Dup %RPD: Diferencia Porcentual Relativa entre los duplicados del proceso.

Parámetro	Unidad	LC	MB	DUP %RPD	LCS %Recovery	MS %Recovery	MSD %RPD
Aluminio Total	mg/L	0.003	<0.003	0%	97 - 100%	98%	0%
Antimonio Total	mg/L	0.00013	<0.00013	0%	97 - 104%	104%	0%
Arsénico Total	mg/L	0.00010	<0.00010	0 - 1%	103 - 106%	102%	0%
Bario Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0 - 8%	100 - 101%	97%	0%
Berilio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	102%	98%	8%
Bismuto Total	mg/L	0.00003	<0.00003	0%	96 - 100%	97%	0%
Boro Total	mg/L	0.006	<0.006	0 - 7%	95 - 102%	103%	0%
Cadmio Total	mg/L	0.00003	<0.00003	0 - 6%	98%	97%	0%
Calcio Total	mg/L	0.009	<0.009	0 - 8%	93 - 98%	105%	0%
Cerio Total	mg/L	0.00024	<0.00024	0 - 7%	95%	101%	3%
Cesio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0 - 8%	98 - 99%	100%	3%
Cobalto Total	mg/L	0.00003	<0.00003	0 - 7%	99%	96%	0%
Cobre Total	mg/L	0.00009	<0.00009	0 - 7%	97 - 100%	100%	0%
Cromo Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0%	96 - 102%	96%	1%
Estaño Total	mg/L	0.00010	<0.00010	0%	97 - 105%	97%	0%
Estroncio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0 - 7%	95 - 98%	93%	0%
Fósforo Total	mg/L	0.047	<0.047	0%	97 - 102%	97%	3%
Galio Total	mg/L	0.00012	<0.00012	0 - 2%	97 - 100%	94%	6%
Germanio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0%	99 - 105%	102%	0%
Hafnio Total	mg/L	0.00015	<0.00015	0%	96 - 97%	91%	3%
Hierro Total	mg/L	0.0013	<0.0013	0 - 6%	98 - 99%	96%	1%
Lántano Total	mg/L	0.0015	<0.0015	0%	96%	95%	0%
Litio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0 - 7%	98 - 102%	108%	1%
Lutecio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	99%	105%	1%
Magnesio Total	mg/L	0.003	<0.003	0 - 8%	100%	93%	0%
Manganeso Total	mg/L	0.00010	<0.00010	0 - 8%	99 - 105%	96%	0%
Mercurio Total	mg/L	0.00009	<0.00009	0%	101 - 102%	101%	1%
Molibdeno Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0 - 8%	97 - 98%	100%	1%
Niobio Total	mg/L	0.0015	<0.0015	0%	97 - 100%	95%	0%
Níquel Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0 - 8%	97 - 102%	102%	3%
Plata Total	mg/L	0.000010	<0.000010	0%	100 - 101%	100%	0%
Plomo Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0 - 3%	100%	99%	0%
Potasio Total	mg/L	0.13	<0.13	0 - 7%	101%	97%	0%
Rubidio Total	mg/L	0.0009	<0.0009	0 - 7%	99 - 103%	98%	0%
Selenio Total	mg/L	0.0013	<0.0013	0 - 4%	102 - 109%	94%	0%
Silíce Total	mg/L	0.27	<0.27	0 - 6%	97 - 100%	96%	0%
Silicio Total	mg/L	0.13	<0.13	0 - 6%	97 - 100%	96%	0%
Sodio Total	mg/L	0.019	<0.019	0 - 8%	96 - 97%	93%	0%
Talio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	102%	102%	0%
Tantalio Total	mg/L	0.0021	<0.0021	0%	98 - 100%	98%	0%
Teluro Total	mg/L	0.003	<0.003	0%	100 - 102%	102%	0%
Thorio Total	mg/L	0.00019	<0.00019	0%	95 - 97%	94%	0%
Titanio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0 - 8%	97 - 109%	105%	0%
Uranio Total	mg/L	0.000010	<0.000010	0 - 7%	98 - 101%	107%	10%
Vanadio Total	mg/L	0.0003	<0.0003	0%	93 - 94%	98%	0%
Wolframio Total	mg/L	0.0006	<0.0006	0%	97 - 101%	103%	0%
Yterbio Total	mg/L	0.00006	<0.00006	0%	93 - 94%	91%	0%
Zinc Total	mg/L	0.0026	<0.0026	0 - 8%	101 - 102%	101%	0%
Zirconio Total	mg/L	0.00045	<0.00045	0%	98 - 100%	94%	0%

Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 10 de 12

SGS del Perú S.A.C. Av. Elmer Faucett 3348 Callao 1 Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe  
 Ernesto Gunther 275 Parque Industrial Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com  
 Jr. Arnaldo Márquez Ba. San Antonio Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS



**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR  
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN  
INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 002**



**INFORME DE ENSAYO  
MA2412224 Rev. 0**

**REFERENCIAS DE MÉTODOS DE ENSAYO**

Referencia	Sede	Parámetro	Método de Ensayo
EW_EPA200_8_AQ	Arequipa	Metales Totales	EPA- Method 200.8 Rev. 5.4, 1994 (VALIDADO - Modificado), 2016. Determination of trace elements in water and wastes by Inductively Coupled Plasma-Mass spectrometry

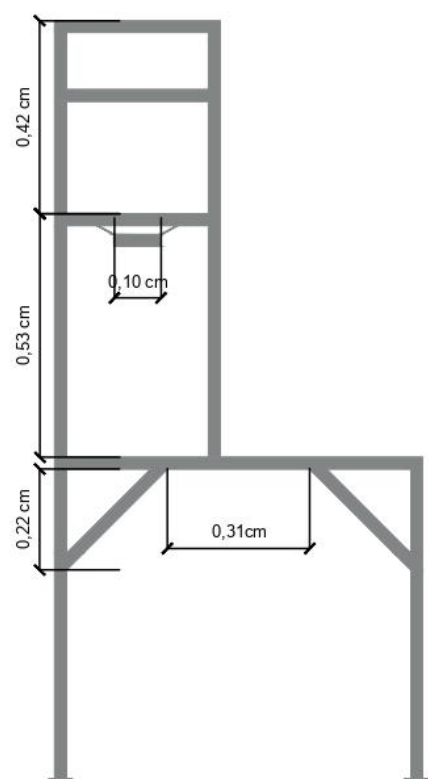
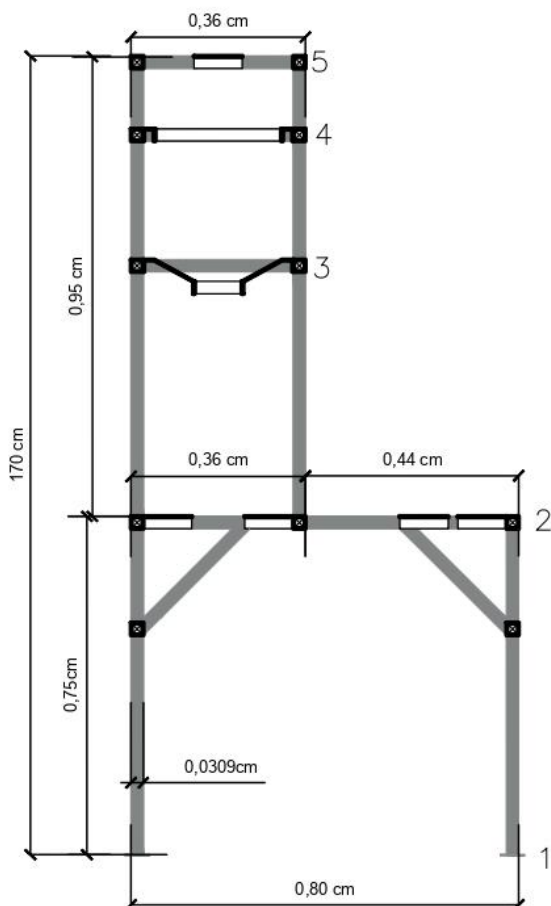
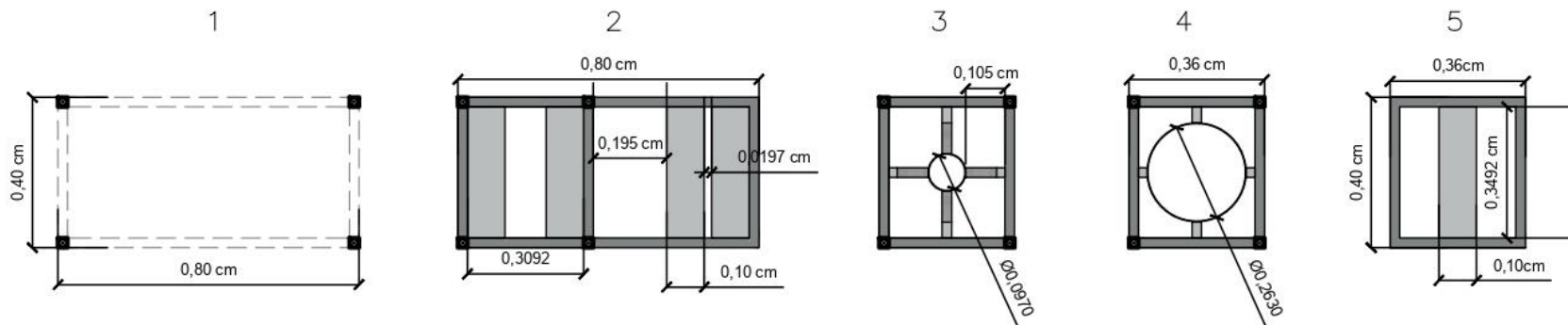
Este documento es válido solo en entorno electrónico, de imprimirse pierde validez.

Página 11 de 12

SGS del Perú S.A.C. | Av. Elmer Faucett 3348 Callao 1 Callao t (511) 517 1900 www.sgs.pe  
Ernesto Gunther 275 Parque Industrial Arequipa t (054) 213 506 e Pe.servicios@sgs.com  
Jr. Arnaldo Márquez Ba. San Antonio Cajamarca t (076) 366 092

Miembro del Grupo SGS

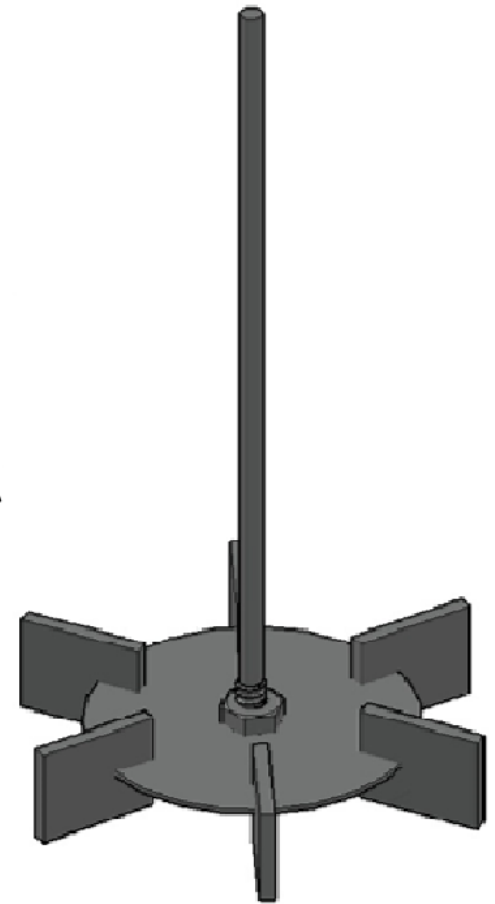
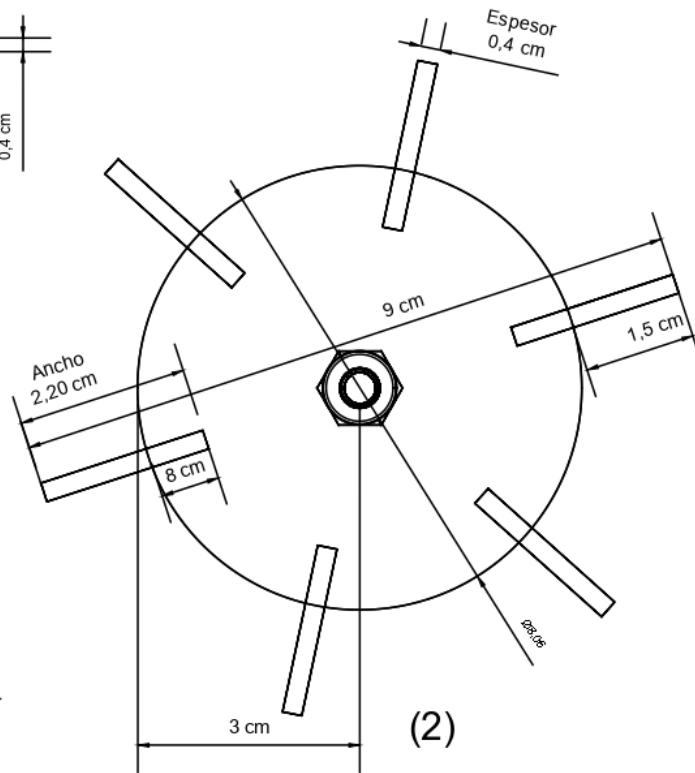
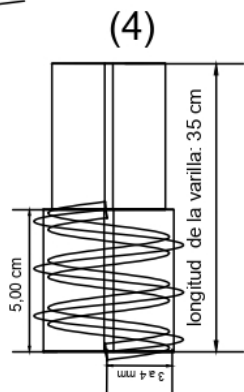
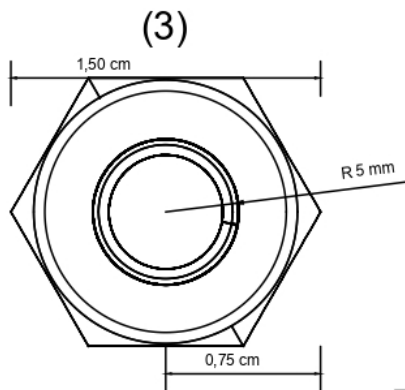
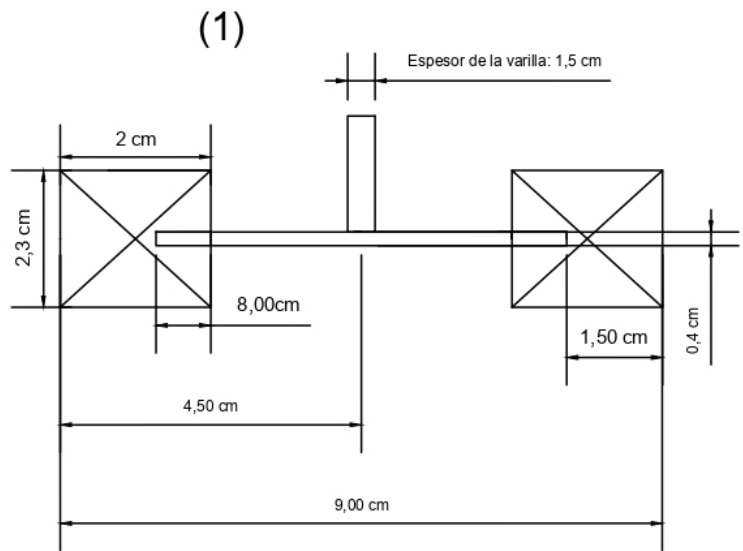
**ANEXO 15: Diagramas del Sistema del diseño del reactor discontinuo**



**Leyenda**

Nivel 1: Suelo  
 Nivel 2: Soporte de los baldes de almacenamiento y purga  
 Nivel 3: Soporte del reactor  
 Nivel 4: Sujetador del reactor  
 Nivel 5: Soporte del motor

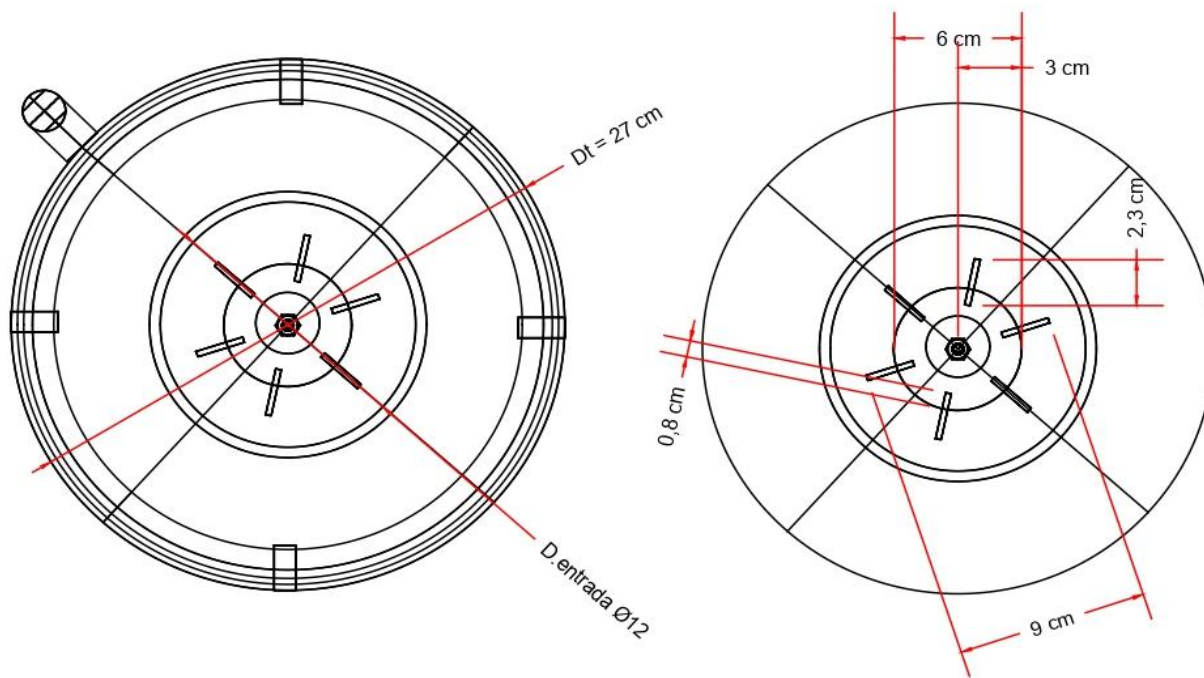
PROPIETARIO: CARLOS COSTA GIL	PLANO: VISTA SUPERIOR Y ELEVACIÓN DE ESTRUCTURA	Nº LAMINA: <b>A-01</b>
PROYECTO: TESIS	FECHA: 18/01/2024	
	DIBUJADO: CARLOS COSTA GIL	
	ESCALA: SIN ESCALA	



Leyenda

- (1) vista frontal del agitador
- (2) vista superior del agitador
- (3) vista superior de la turca
- (4) vista frontal de la varilla
- (5) vista tridimensional del agitador Rushton

PROPIETARIO: CARLOS COSTA GIL	PLANO: DISEÑO DEL AGITADOR RUSHTON	FECHA: 25/01/2024	NR LAMINA: A-02
PROYECTO: TESIS	DIBUJADO: CARLOS COSTA	ESCALA: SIN ESCALA	



PROPIETARIO: CARLOS COSTA GIL	PLANO: REACTOR QUÍMICO DISCONTINUO "BATCH"	
	FECHA: 15/03/2024	Nº LÁMINA: A-03
PROYECTO: TESIS	DIBUJADO: CARLOS COSTA	
	ESCALA: sin escala	



***VISTA TRIDIMENSIONAL  
DE LA ESTRUCTURA Y SOPORTE DEL REACTOR QUÍMICO BATCH, PARA LA  
REDUCCIÓN DEL CONTENIDO DE ARSÉNICO A NIVEL PERMISIBLE EN EL  
AGUA DE CONSUMO DEL DISTRITO DE HUANUARA - TACNA***

PROYECTO:	CARLOS COSTA GIL		PLANO:	ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL
	DIBUJADO:	TESIS	FECHA:	15/02/2024
ESCALA:			SIN ESCALA	Nº LAMINA:

## ANEXO 16: FOTOGRAFIAS DE LA PRESENTE TESIS

**Figura 51**

*Reconocimiento del lugar de muestreo de los óxidos de hierro*



*Nota.* Reconocimiento del lugar donde se recolecto las muestras de virutas de óxido de hierro.

**Figura 52**

*Fabricación de la estructura metálica*



*Nota.* Fabricación de la estructura metálica, que soportará el reactor discontinuo, almacenamiento y purga.

**Figura 53**

*Captación de la muestra de agua de manantial de Huanuara*



*Nota.* Fotografía tomada en el distrito de Huanuara, realizando la captación de agua de consumo a tratar.

**Figura 54**

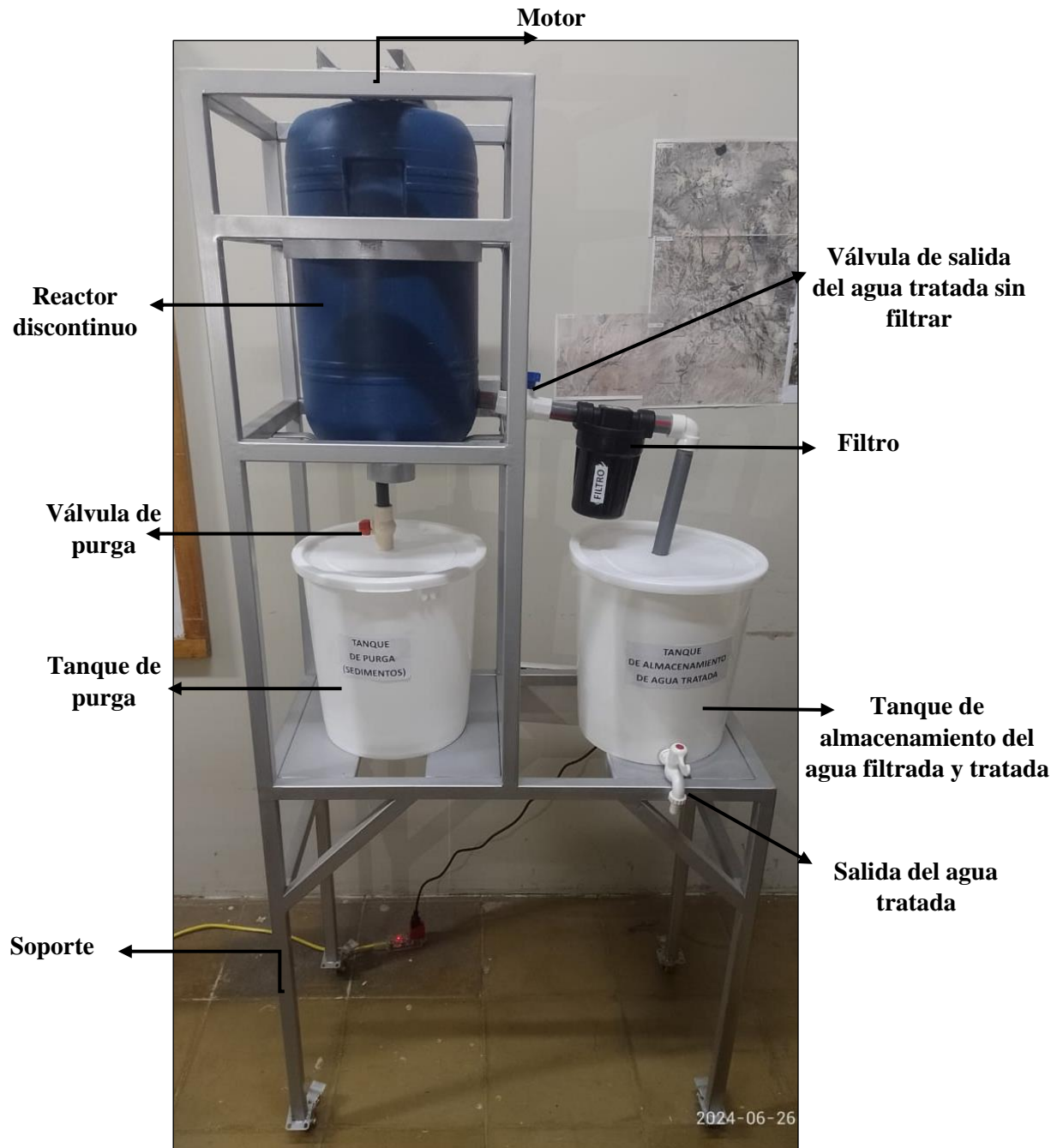
*Medición de parámetros fisicoquímicos in situ*



*Nota.* Fotografía tomada en el distrito de Huanuara, realizando las medición de los parámetros fisicoquímicos del agua a tratar,

**Figura 55**

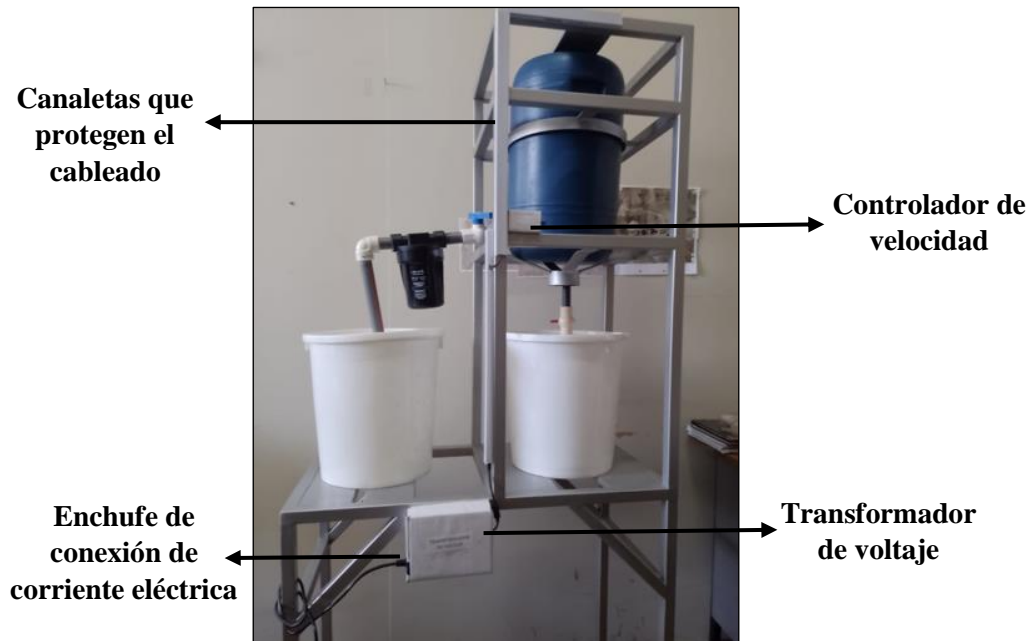
*Sistema del Reactor discontinuo para la remoción de As*



*Nota.* Fotografía del sistema para la reducción de As en el agua de consumo

**Figura 56**

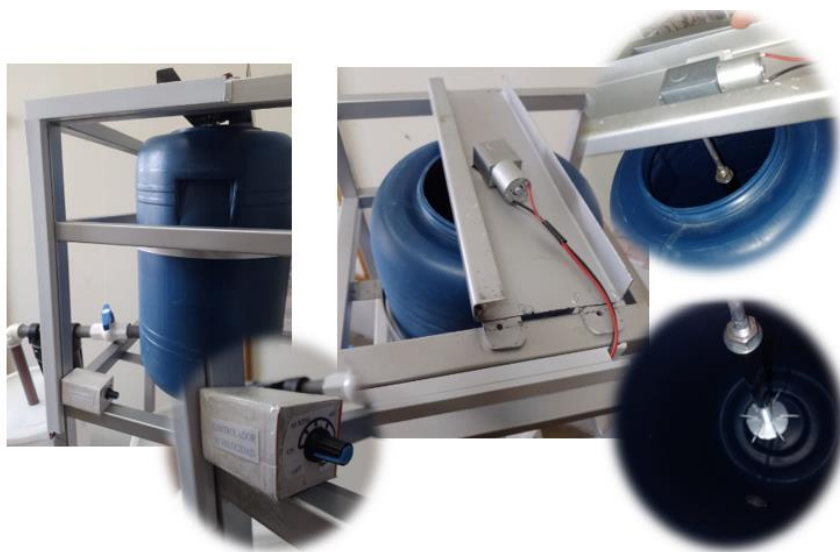
*Vista trasera del sistema del reactor discontinuo*



*Nota.* Se instalaron canaletas de plástico para mejorar la seguridad del cableado del sistema de agitación.

**Figura 57**

*Vista del controlador, motor, agitador*



*Nota.* El regulador de velocidad fue colocado dentro de una caja protectora para evitar su exposición al agua.