

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y
Biotechnológicas
Escuela Profesional de Farmacia y Bioquímica



**Cuantificación espectrofotométrica con Dietilditiocarbamato de plata
(DDTC-Ag) de Arsénico inorgánico (As^{+3}) en el río Yura y descripción de
su posible impacto ecológico, Arequipa 2025**

Tesis presentada por los Bachilleres:

Ccala Quispe, Ingrid Milagros

ORCID: 0009-0004-9169-7639

Ito Quisocala, Victor Hugo

ORCID: 0009-0002-9740-6973

para optar el Título Profesional de Químico Farmacéutico

Asesor:

Dr. Candia Puma, Mayron Antonio

ORCID: 0000-0002-6328-3840

Arequipa - Perú

2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

FARMACIA Y BIOQUIMICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 23 de Octubre del 2025

Dictamen: 014286-C-EPFyB-2025

Visto el borrador del expediente 014286, presentado por:

2018221302 - CCALA QUISPE INGRID MILAGROS

2020891821 - ITO QUISOCALA VICTOR HUGO

Titulado:

**CUANTIFICACIÓN ESPECTROFOTOMÉTRICA CON DIETILDITIOCARBAMATO DE PLATA (DDTC-
AG) DE ARSÉNICO INORGÁNICO (AS+3) EN EL RÍO YURA Y DESCRIPCIÓN DE SU POSIBLE
IMPACTO ECOLÓGICO, AREQUIPA 2025**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

QUÍMICO FARMACÉUTICO

**29213630 - CARDENAS GARCIA JAIME DANTE
DICTAMINADOR**



**00476696 - BERNABE ORTIZ JULIO CESAR
DICTAMINADOR**



**42671615 - CARPIO CARPIO JOSE MIGUEL
DICTAMINADOR**



Cuantificación espectrofotométrica con Dietilditiocarbamato de plata (DDTC-Ag) de Arsénico inorgánico (As+3) en el río Yura y descripción de su posible impacto ecológico, Arequipa 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%

INDICE DE SIMILITUD

19%

FUENTES DE INTERNET

10%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
2	Submitted to Universidad del Valle de Guatemala Trabajo del estudiante	1%
3	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	1%
5	repositorio.oefa.gob.pe Fuente de Internet	1%
6	core.ac.uk Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1%
8	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.uni.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	1library.co Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

*A Dios por haberme dado la salud para poder cumplir uno de mis más grandes sueños.
A mis padres, Miguel y Nely, por su apoyo incondicional y tomar el papel de buenos padres,
sin sus consejos y alientos nada de esto hubiera sido posible, en especial a mi madre que fue
mi más grande soporte emocional.*

*A mis hermanas, Liz y Mariel, por su cariño y palabras de aliento, que nada se logra de un
día a otro, que todo requiere de mucho esfuerzo y dedicación.
A mi pequeña Cassie, que me acompañó cada etapa de este proceso, siempre fiel a mi lado.
A la Dra. Karine y Dra. Candy, por su invaluable orientación, apoyo y paciencia durante mi
internado.*

Ingrid Ccala Quispe

*A Dios por darme la vida y la fuerza que me acompañó en mis momentos más difíciles.
A mis padres, Rita y Daniel que me apoyaron y darme la fuerza para alcanzar mis metas.
A mis hermanas, Jenny y Nelly, por escucharme en momentos delicados y enseñarme la
realidad de la vida.
A mis amigos, Sandro, Imanol, José, Jerdie y Renato, por hacerme parte de su grupo en la
universidad y ser mis cómplices de aventuras, por sus consejos y por todas las risas.
A Dani, Ariel, Cami, Lau y Mica, por el conocimiento, el apoyo, las risas y la compañía que
me brindaron en mi intercambio en Argentina.
A Victor, que me brindo su amistad desde el primer momento, por las charlas profundas que
nos metíamos y por ser una grandiosa persona.
A todas mis mascotas que fueron ese momento de paz que necesite muchas veces.*

Victor Hugo Ito Quisocala

AGRADECIMIENTOS

A Dios por habernos permitido llegar hasta esta etapa de nuestra vida profesional, por brindarnos la fortaleza, sabiduría y paciencia para cumplir con este trabajo.

Sobre todo, por habernos otorgado a los mejores padres, quienes creyeron y apoyaron incondicionalmente en este largo camino, este logro es el fruto de todo el esfuerzo y sacrificio de su parte.

A la Universidad Católica de Santa María, por brindarnos las enseñanzas y formarnos como buenos profesionales.

Gracias por habernos proporcionado los recursos y las herramientas necesarias para alcanzar nuestros sueños.

Un agradecimiento muy especial a nuestro asesor de tesis, al Dr. Mayron Candia Puma, por todo su apoyo, orientación, paciencia, conocimiento y compromiso con el papel de asesor, fueron esenciales para realizar este trabajo.

Gracias por confiar y creer en nosotros, sobre todo por habernos guiado hasta esta etapa de nuestra vida profesional.



EPÍGRAFE.

“No hay medicina que cure lo que no cura la felicidad”

Gabriel García Márquez

RESUMEN

En los últimos años, la calidad del agua en las cuencas hidrográficas de la región de Arequipa ha sido objetivo de creciente preocupación científica y social, debido a la presencia de metales pesados. Dentro de este contexto, el arsénico (As) emerge como un contaminante de especial relevancia por sus implicaciones para la salud pública y el medio ambiente. Si bien los estudios específicos sobre el río Yura son limitados, la información regional y los análisis de cuencas aledañas como el río Chili y el río Vítor, que presentan, concentraciones de arsénico hasta 3 veces superiores a los estándares nacionales (0.010 mg/L), justifican una investigación focalizada en esta importante fuente hidrográfica. Este estudio se enfocó en evaluar las concentraciones de arsénico (As^{+3}) del río Yura en Arequipa. Se estableció un plan de muestreo en puntos estratégicos: Aguas arriba, un punto cercano a la zona industrial y aguas abajo. Las muestras fueron recolectadas mensualmente durante el periodo, febrero – abril 2025, coincidiendo con las temporadas de lluvias. Las muestras fueron conservadas con ácido nítrico y analizadas mediante el método espectrofotométrico con Dietilditiocarbamato de Plata (DDTC-Ag). La validación analítica incluyó la elaboración de un gráfico de calibración con concentraciones entre 0.005mg/L a 0.040mg/L de arsénico (As^{+3}) empleando replicas y criterios de aceptación establecidos para la linealidad, límite de detección (LoD), límite de cuantificación (LoQ), precisión y exactitud. Se obtuvieron 18 muestras ambientales. Los resultados mostraron que las concentraciones más elevadas se registraron en los puntos cercanos a la zona industrial y aguas abajo durante la época de lluvias. La investigación demuestra que al comparar los resultados con los estándares de calidad ambiental para agua superficial en el Perú (D.S. N°:004-2017 MINAM) se encontró que varias muestras superaron el valor máximo permitido de arsénico (0.010 mg/L). Lo que representa un riesgo potencial para la salud humana y el ecosistema.

Palabras claves: *Arsénico, dietilditiocarbamato de plata, agua.*

ABSTRACT

In recent years, water quality in the Arequipa region's watersheds has become a growing scientific and social concern due to the presence of heavy metals. Within this context, arsenic (As) has emerged as a particularly relevant contaminant due to its implications for public health and the environment. While specific studies on the Yura River are limited, regional information and analyses of neighboring basins such as the Chili and Vitor rivers, which exhibit arsenic concentrations up to three times higher than the national standard (0.010 mg/L), justify focused research on this important water source. This study focused on evaluating arsenic (As+3) concentrations in the Yura River in Arequipa. A sampling plan was established at strategic points: upstream, near the industrial zone, and downstream. Samples were collected monthly from February to April 2025, coinciding with the rainy season. The samples were preserved with nitric acid and analyzed using the silver diethyldithiocarbamate (DDTC-Ag) spectrophotometric method. Analytical validation included the creation of a calibration curve with arsenic (As+3) concentrations ranging from 0.005 mg/L to 0.040 mg/L, employing replicates and established acceptance criteria for linearity, limit of detection (LoD), and limit of quantification (LoQ). Eighteen environmental samples were obtained. The results showed that the highest concentrations were recorded at points near the industrial zone and downstream during the rainy season. The research demonstrates that when comparing the results with the environmental quality standards for surface water in Peru (Supreme Decree No. 004-2017 MINAM), several samples exceeded the maximum permissible arsenic level (0.010 mg/L). This represents a potential risk to human health and the ecosystem.

Keywords: Arsenic, silver diethyldithiocarbamate, water.

ÍNDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
EPÍGRAFE	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN.....	1
HIPÓTESIS	3
OBJETIVOS	4
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVO ESPECÍFICO.....	4
CAPÍTULO I.....	5
1. MARCO TEÓRICO.....	6
1.1. AGUA	6
1.2. ARSÉNICO COMO CONTAMINANTE	9
1.2.1. Propiedades físicas y químicas.....	9
1.2.1.1. Propiedades físicas.....	9
1.2.1.2. Propiedades químicas.....	9
1.2.2. Estructura del arsénico	10
1.2.3. Presencia natural del arsénico	11
1.2.4. Fuentes antropogénicas de arsénico	12
1.3. EFECTOS DEL ARSÉNICO EN LA SALUD Y AMBIENTE.....	12
1.3.1. Toxicidad en salud pública.....	12
1.3.2. Toxicidad en humanos	13
1.3.3. Impacto ambiental	15
1.4. NORMATIVA Y ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AGUA	20
1.4.1. Límites permisibles de arsénico en agua.....	21
1.5. RÍO YURA	25
1.5.1. Ubicación geográfica.....	26
1.5.2. Importancia socioeconómica y usos de agua	27
1.5.3. Problemáticas ambientales y contaminación.....	27

1.6. PRINCIPIOS ECOTOXICOLÓGICOS ACUÁTICOS: BIOACUMULACIÓN Y TOXICIDAD CRÓNICA DEL ARSÉNICO EN RÍOS.....	28
1.7. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA	29
1.7.1. Métodos.....	29
1.7.2. Ventajas y limitaciones	36
1.8. MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO CON DIETILDITIOCARBAMATO DE PLATA (DDTC-AG).....	37
1.8.1. Principio del método	37
1.8.2. Ventajas frente a otros métodos	37
CAPÍTULO II.....	39
2. MATERIALES Y MÉTODOS	40
2.1. LUGAR DE INVESTIGACIÓN	40
2.2. MATERIALES	40
2.2.1. Equipos.....	40
2.2.2. Materiales	40
2.2.3. Reactivos	41
2.3. MÉTODOS.....	41
2.3.1. Validación del método	41
2.3.2. Obtención de muestra.....	42
CAPÍTULO III	46
3. RESULTADOS	47
3.1. VALIDACIÓN DEL MÉTODO	47
3.1.1. Linealidad.....	47
3.1.2. Límite de detección (LoD) y Límite de cuantificación (LoQ).....	49
3.1.3. Precisión	50
3.1.4. Exactitud.....	52
3.2. ANÁLISIS DE MUESTRA	53
3.3. COMPARACIÓN CON LOS LÍMITES PERMISIBLES.....	55
4. DISCUSIONES	56
CAPITULO IV	59
CONCLUSIONES.....	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	63
ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM	25
Tabla 2. Tabla comparativa de los métodos de análisis de arsénico*.....	36
Tabla 3 Abs medida y corregida para la creación del grafico de calibración.	48
Tabla 4. Valores del Blanco.	49
Tabla 5. Abs medida de los niveles de concentración.....	51
Tabla 6. Abs corregida de los niveles de concentración.	51
Tabla 7. Estadísticas de precisión usando las lecturas corregidas.....	51
Tabla 8. Abs medido de los niveles de concentración.	52
Tabla 9. Abs corregida de los niveles de concentración.	52
Tabla 10. Estadísticas de la Exactitud usando las lecturas corregidas.	52
Tabla 11. Abs medidas y corregidas de las muestras en las distintas temporadas y ubicaciones.	53
Tabla 12. Concentraciones calculadas de As^{+3}	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de las principales especies inorgánicas del arsénico, elaboración propia.	10
Figura 2. Estructuras alotrópicas del arsénico, elaboración propia.	11
Figura 3 Ubicación geográfica del Rio Yura, Google Maps.	28
Figura 4. Reacción química de la parte final con la formación del complejo.	45
Figura 5. Gráfico de calibración de las concentraciones de As^{+3} , elaboración propia.	49
Figura 6. Comparación de las concentraciones de As^{+3} con los estándares de calidad ambiental (ECA).	55



LISTA DE ABREVIATURAS

DDTC = Dietilditiocarbamato de Plata.

As= Arsénico.

Ag = Plata.

As⁺³ = Arsénico trivalente.

EPA = Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos.

ECA = Estándares de Calidad Ambiental.

OMS = Organización Mundial de la Salud.

LoQ= Limite de cuantificación.

LoD= Limite de detección.

DAM = Drenaje ácido de minas.

MCL = Nivel máximo de contaminante.

MCLG = Meta de nivel máximo de contaminante.

MINAM = Ministerio nacional del ambiente.

CAT = Actividad de la catalasa.

SOD = Superóxido dismutasa.

AAS = Espectrofotometría de absorción atómica.

ICP-MS = Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente.

HPLC = Cromatografía líquida de alto rendimiento.

R² = Coeficiente de determinación.

%RSD = Porcentaje de desviación estándar.

ISO= Organización internacional de normalización.

D.S.= Decreto supremo.

LMP= Límite máximo permisible.



INTRODUCCIÓN

La contaminación por arsénico en cuerpos de agua representa un problema ambiental y de salud pública de gran magnitud, especialmente en regiones donde la geología local y las actividades humanas favorecen su liberación al ambiente acuático. El arsénico inorgánico, particularmente la forma trivalente (As^{+3}), es altamente tóxico, más móvil y biodisponible que la forma pentavalente (As^{5+}), lo que incrementa su capacidad de causar efectos adversos en organismos acuáticos y humanos a concentraciones relativamente bajas. (1)

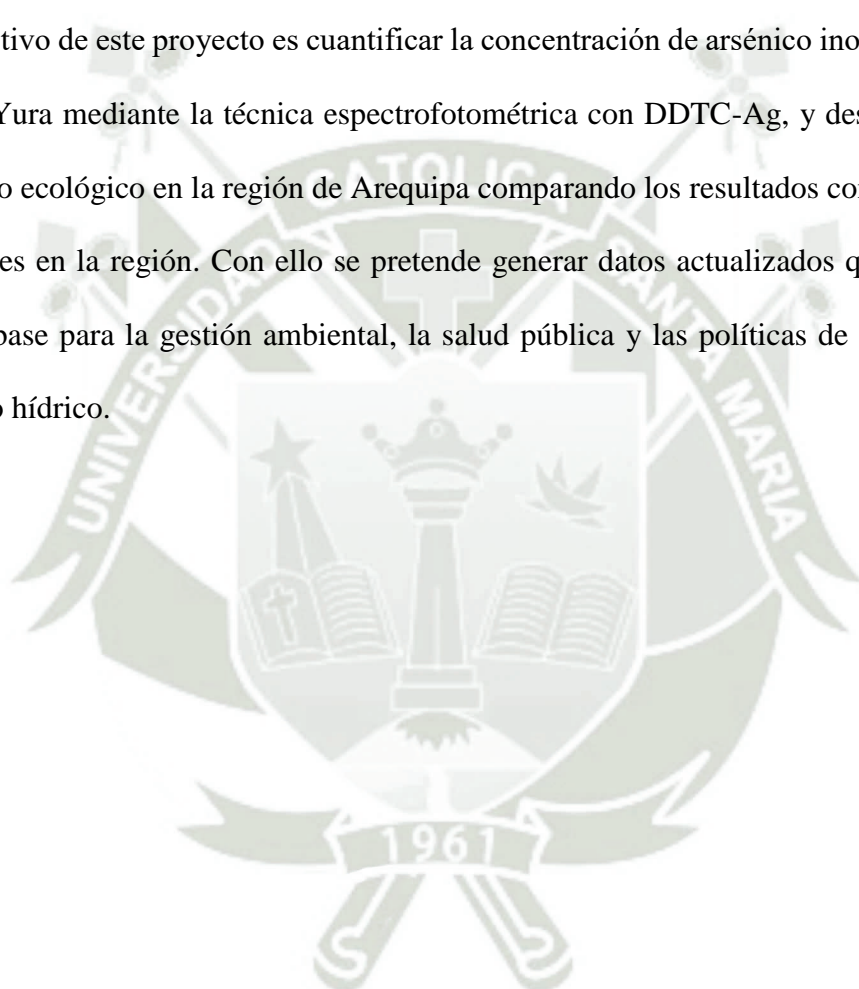
En Perú, varios estudios indican que los niveles de arsénico en fuentes de agua para consumo humano frecuentemente sobrepasan los límites máximos permisibles establecidos por la normativa nacional, asociados tanto a causas naturales como antropogénicas. (2) Uno de esos estudios, realizados en Arequipa (2015-2016), evaluó niveles de arsénico en fuentes de agua potable de diferentes distritos utilizando métodos voltamperométricos, se encontró que en localidades muy conocidas como Congata, Sachaca y Sabandía las concentraciones excedían los estándares establecidos para agua potable. (3)

El río Yura, ubicado en la región Arequipa, se ha convertido en foco de atención ambiental debido al potencial riesgo que representa para ecosistemas y comunidades locales. Si bien es cierto existen informes de monitoreo de agua superficial en Yura y zonas cercanas, no todos estos abordan específicamente la cuantificación del arsénico inorgánico y su posible impacto ecológico por la presencia cercana de la zona industrial. (4) Además, servicios públicos han alertado sobre el consumo de agua potable con altos niveles de arsénico en distritos principalmente como Tiabaya, superando en algunos casos hasta tres veces el límite permisible según normativa peruana. (5)

El método espectrofotométrico con Dietilditiocarbamato de plata (DDTC-Ag) es reconocido como una técnica válida para la determinación de arsénico inorgánico en agua. Según la

Organización Mundial de la Salud, este método ha sido usado históricamente, especialmente en versiones modificadas, para lograr una detección sensible y fiable, incluso a concentraciones bajas. (1) Por ejemplo, Tahir (6) reportó modificaciones al método espectrofotométrico clásico con DDTC-Ag para alcanzar límites de detección alrededor de 0.001 mg/L de arsénico.

El objetivo de este proyecto es cuantificar la concentración de arsénico inorgánico (As^{+3}) en el río Yura mediante la técnica espectrofotométrica con DDTC-Ag, y describir su posible impacto ecológico en la región de Arequipa comparando los resultados con investigaciones similares en la región. Con ello se pretende generar datos actualizados que pueden servir como base para la gestión ambiental, la salud pública y las políticas de conservación del recurso hídrico.



HIPÓTESIS

De acuerdo con la actividad industrial en Yura, esta puede generar emisiones y residuos que contienen arsénico, es probable que este metaloide se acumule en el entorno aledaño, afectando el aire, el suelo y los cuerpos de agua superficiales o subterráneos de la zona. Aunque las concentraciones podrían ser bajas, el arsénico puede ser detectado mediante el método espectrofotométrico con Dietilditiocarbamato de plata (DDTC-Ag), lo que permitirá evaluar su presencia en el agua del río Yura.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Cuantificar arsénico (As^{+3}) en el agua del río Yura mediante el método espectrofotométrico con Dietilditiocarbamato de plata, con el fin de evaluar su posible impacto ecológico.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- Validar el método espectrofotométrico para la cuantificación de arsénico en agua utilizando Dietilditiocarbamato de plata (DDTC-Ag).
- Comparar las concentraciones de arsénico en muestras de agua del río Yura en diferentes puntos y temporadas durante el año 2025.
- Comparar los resultados con investigaciones similares para poder describir los posibles impactos ambientales que podría generar una exposición prolongada a arsénico inorgánico (As^{+3}) en el río Yura.



CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO.

1.1. AGUA.

El agua es un recurso natural importante y esencial para la vida y el desarrollo de las sociedades. Su disponibilidad y calidad determinan no solo la salud de los ecosistemas, sino también la sostenibilidad de las actividades humanas como la agricultura, la industria y el consumo doméstico. En este sentido, el estudio del agua desde un enfoque integral que abarque tanto su composición fisicoquímica como los factores que afectan su calidad es fundamental para garantizar su uso racional y seguro. (7,8)

Desde un punto científico, el agua natural contiene diversos compuestos en solución, incluyendo sales, metales, metaloides y materia orgánica, cuya concentración puede variar según el origen geológico, la interacción con el suelo, la atmósfera y las actividades humanas. (9) Entre los parámetros más relevantes para la evaluación de la calidad del agua se encuentran el pH, la conductividad eléctrica, la turbidez, la presencia de nutrientes (nitratos, fosfatos), así como la concentración de metales pesados y contaminantes tóxicos como el arsénico, plomo y mercurio. (10)

Diversos estudios han evidenciado que la contaminación del agua, especialmente por elementos traza como el arsénico, presenta un riesgo significativo para la salud pública y la biodiversidad. (11) Estos elementos pueden ingresar al sistema acuático por procesos naturales (erosión, actividad volcánica, descomposición de minerales) o por fuente antrópicas como la minería, la agricultura intensiva o los vertimientos industriales. (12)

Para su detección y cuantificación, se hacen uso de métodos analíticos como la espectrofotometría, la espectrometría de absorción atómica y otras técnicas instrumentales que permiten identificar contaminantes a nivel de trazas. La selección de cada método depende de los factores como la sensibilidad requerida, el tipo de muestra y los recursos disponibles. (13,14)

El marco normativo internacional y nacional (como los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud y los estándares del Ministerio del Ambiente del Perú) establece límites máximos permisibles para cada tipo de contaminantes, con el fin de proteger la salud humana y el equilibrio ecológico. (15)

1.1.1. Calidad de agua.

La calidad del agua es un conjunto de características que determinan si un cuerpo de agua es adecuado para un propósito específico, como el consumo humano, la agricultura, la industria o la conservación de ecosistemas acuáticos. Esta calidad se evalúa mediante diversos parámetros, tanto físicos como químicos y biológicos. (16)

Los parámetros físicos incluyen la temperatura, el color, la turbidez y el olor, mientras que los químicos se refieren a la presencia de sustancias disueltas, como sales, metales pesados, nutrientes (nitratos, fosfatos) y productos tóxicos. Por su parte, los parámetros biológicos implican la concentración de microorganismos patógenos, como bacterias y virus. (17)

El agua de buena calidad debe estar libre de contaminantes peligrosos que pongan en riesgo a la población y tener niveles equilibrados de minerales esenciales para los seres vivos. Además, su capacidad para sustentar la vida acuática, el ciclo hidrológico y el uso humano sin representar un riesgo para la salud es fundamental. La contaminación del agua, debido a actividades

industriales, agrícolas y urbanas, puede deteriorar su calidad y poner en riesgo tanto a los ecosistemas como la salud pública. (18)

1.1.1.1. Consumo humano.

El agua destinada al consumo humano debe cumplir con estrictos estándares de calidad para así garantizar la salud de las personas. Esto incluye la ausencia de microorganismos patógenos, como bacterias, virus y parásitos, así como niveles seguros de sustancias químicas (por ejemplo, metales pesados, cloro, pesticidas). Además, debe tener una cantidad equilibrada de minerales (como calcio y magnesio) y un pH adecuado (entre 6.5 y 8.5). Los límites de turbidez deben ser muy bajos para garantizar su transparencia. (1)

1.1.1.2. Riego agrícola.

El agua para el riego debe ser de calidad suficiente para no dañar los cultivos ni el suelo. Se debe controlar la salinidad, puesto que el agua salina puede afectar la absorción de nutrientes por parte de las plantas. Además, los niveles de nutrientes como nitrógeno y fósforo deben estar dentro de un rango que favorezca el crecimiento sin causar eutrofización o contaminaciones del suelo. El agua también debe estar libre de contaminantes tóxicos para las plantas. (19)

1.1.1.3. Uso industrial.

Para fines industriales, los requisitos de calidad del agua dependen del tipo de proceso de producción. Algunos procesos pueden requerir agua con baja dureza (baja concentración de calcio y magnesio), mientras que otros pueden necesitar agua libre de contaminantes químicos que puedan

interferir en la fabricación de productos. Además, la temperatura del agua es un factor importante en ciertos procesos industriales. (20)

1.2. ARSÉNICO COMO CONTAMINANTE.

La contaminación del agua por arsénico se produce cuando este elemento tóxico, que puede tener origen natural o por actividades humanas como la minería o el uso de ciertos pesticidas, que se introduce en fuentes de agua. La exposición prolongada al arsénico, especialmente en su forma inorgánica, representa un riesgo para la salud humana, ya que puede desencadenar enfermedades graves, tales como cáncer de piel, problemas cardiovasculares y daños al sistema nervioso. Este problema afecta principalmente a regiones donde el agua subterránea presenta niveles elevados de arsénico. (21)

1.2.1. Propiedades físicas y químicas.

1.2.1.1. Propiedades físicas.

- Número atómico: 33
- Masa atómica: 74.92 g/mol
- Símbolo químico: As
- Apariencia: gris metálico
- Punto de fusión: sublimación a 613 °C
- Densidad: 5.72 g/cm³

1.2.1.2. Propiedades químicas.

- Estado de oxidación más comunes: As-3, As+3 y As+5.
- Comportamiento químico: Metaloides, presenta características tanto metálicas como no metálicas.
- Reactividad: Se oxida fácilmente en contacto con aire formando As₂O₃, reacciona con halógenos y ácidos concentrados.

- Toxicidad: Sus componentes, en especial en la forma trivalente (As^{+3}), son altamente tóxicos para humanos, animales y plantas.
- Sus formas más frecuentes en compuestos ambientales son:
 - Arseniuros (As^{3-}) se da en combinación con metales.
 - Arsenito (AsO_3^{3-}), As (III) es más tóxico, soluble en agua.
 - Arseniato (AsO_4^{3-}), As(V) es más estable en ambientes oxigenados.

En la Figura 1 se observa la representación esquemática de las principales especies inorgánicas del arsénico. El arseniato (AsO_4^{3-}) presenta una geometría tetraédrica, mientras que el arsenito (AsO_3^{3-}), de geometría trigonal piramidal y es considerado la forma más tóxica.

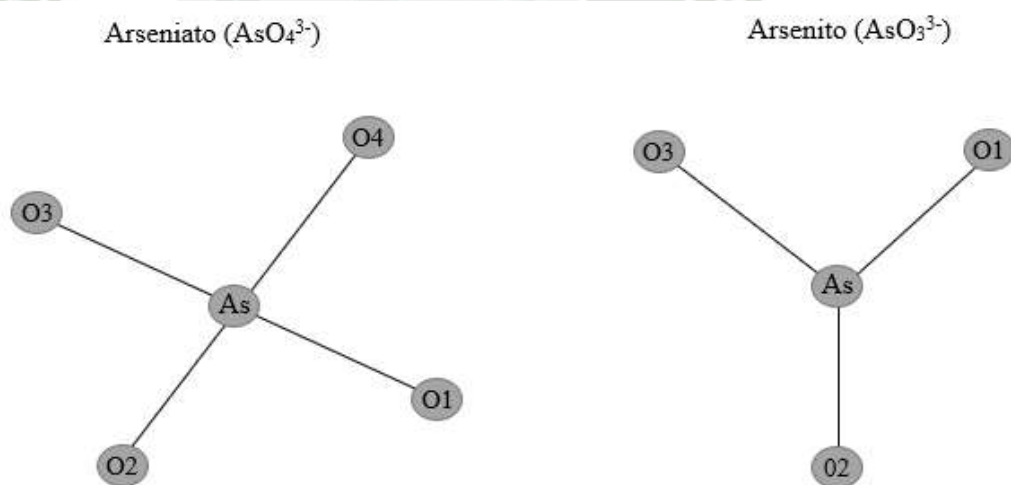


Figura 1. Representación esquemática de las principales especies inorgánicas del arsénico, elaboración propia.

1.2.2. Estructura del arsénico.

El arsénico (símbolo As, número atómico 33) es un elemento químico del grupo 15 (familia del nitrógeno) de la tabla periódica. Se presenta en diferentes formas alotrópicas (gris, amarillo, negro). Se clasifica como un metaloide, ya que

presenta propiedades intermedias entre los metales y los no metales; su configuración electrónica es: $[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^2 4p^3$

Esto indica que posee cinco electrones de valencia, lo que le permite formar compuestos en diferentes estados de oxidación.

En la Figura 2 se aprecia las estructuras alotrópicas del arsénico: arsénico gris (estructura cristalina), arsénico amarillo (molécula As_4) y arsénico negro (forma amorfa).

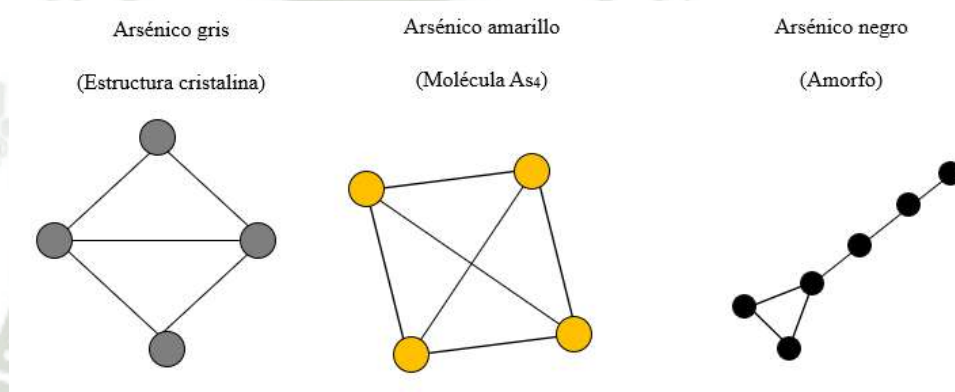


Figura 2. Estructuras alotrópicas del arsénico, elaboración propia.

1.2.3. Presencia natural del arsénico.

El arsénico es un metaloide ampliamente distribuido en la corteza terrestre, donde se encuentra con una abundancia promedio de 1.5 a 2 mg/kg. (22)

La liberación natural de arsénico hacia el ambiente ocurre a través de procesos geológicos y geoquímicos, como la erosión y meteorización de rocas que contienen minerales arsenicales, la actividad volcánica, la disolución de sulfuros metálicos y la lixiviación de formaciones hidrotermales. (23)

En regiones volcánicas, como la zona sur del Perú, la presencia natural de arsénico se ve favorecida por la composición de las rocas ígneas y por la actividad hidrotermal, lo que explica las concentraciones detectadas en diversos cuerpos de agua, incluso en ausencia de fuentes antrópicas. (24)

1.2.4. Fuentes antropogénicas de arsénico.

Además de su origen natural, el arsénico puede incorporarse al ambiente a través de diversas actividades humanas. Entre las principales se destacan:

- Actividad minera y metalúrgica: la extracción y beneficio de minerales sulfurados libera arsénico contenido en arsenopiritas y otros minerales asociados. Los drenajes ácidos de mina y los relaves mineros constituyen importantes fuentes de contaminación. (25)
- Industria cementera y otras industrias: el uso de minerales y materias primas que contienen trazas de arsénico, así como los procesos de combustión y calcinación, pueden liberar este elemento al aire, al suelo y al agua circundante. (26)
- Uso de plaguicidas y herbicidas arsenicales: aunque su uso ha disminuido en las últimas décadas, los pesticidas a base de compuestos de arsénico empleados históricamente en la agricultura han dejado residuos persistentes en el suelo que pueden ser arrastrados hacia cuerpos de agua. (27)
- Residuos industriales y domésticos: descargas inadecuadas de efluentes líquidos y disposición de residuos sólidos pueden incorporar compuestos arsenicales al ambiente. (28)

1.3. EFECTOS DEL ARSÉNICO EN LA SALUD Y AMBIENTE.

1.3.1. Toxicidad en salud pública.

El arsénico es uno de los elementos químicos naturalmente amplia y distribuido en la corteza terrestre, sin embargo, su presencia en el agua potable, suelos y alimentos lo convierte en un problema serio de salud pública cuando hay una exposición prolongada, principalmente en su forma inorgánica (As^{3+} , As^{5+}).

1.3.1.1. Importancia en la salud pública.

Se estima que más de 200 millones de personas están crónicamente expuestas a niveles de arsénico en agua potable superiores al estándar de seguridad de la OMS (0.01 mg/L).

La exposición temprana (prenatal/ infancia) tiene consecuencias de largo plazo, incluso antes que aparezcan síntomas clínicos evidentes. (29)

Hay efectos sociales y psicológicos asociados inicialmente como: discriminación, respecto a la calidad de vida, trastornos mentales en las comunidades afectadas. (30)

1.3.1.2. Formas de exposición.

La principal es la ingesta de agua contaminada, especialmente en aguas subterráneas con altas concentraciones naturales de arsénico.

También puede ocurrir por inhalación (polvo, vapores industriales) y sin dejar de lado el contacto dérmico. (31)

Los alimentos (especialmente en pescados, mariscos, arroz y vegetales cultivados en suelo con arsénico) son otra fuente importante de exposición crónica. (32)

1.3.2. Toxicidad en humanos.

La exposición humana al arsénico se da principalmente por la ingesta de agua contaminada, aunque también puede ingerirse junto con alimentos cultivados en suelos contaminados, inhalarse o absorberse por la piel sobre todo en ambientes industriales.

1.3.2.1. Mecanismo de toxicidad en la salud humana.

La interferencia con las rutas metabólicas energéticas se produce porque el arsénico As^{5+} puede sustituir al fosfato en el glicólisis, produciendo 1-

arseno-3-fosfoglicerato, el cual es inestable y se descompone sin generar ATP, lo que reduce la producción energética celular.

También puede inhibir enzimas dependientes de lipoato (piruvato deshidrogenasa), esto afectaría el ciclo de Krebs y la generación de la energía celular. (33)

El estrés oxidativo y daño al ADN se produce por la generación de especies reactivas del oxígeno (ROS) que estos pueden dañar lípidos, proteínas y ADN. (34)

La inhibición de enzimas de reparación del ADN y alteraciones epigenéticas (metilación del ADN, las modificaciones histónicas)

También se producen efectos genotóxicos y mutagénicos que favorecen el inicio de la carcinogénesis. (35)

Finalmente, las alteraciones celulares y señalización, se deben a la activación de vías de señalización alterada (por ejemplo, MAPK, NF-KB) que pueden inducir inflamación, proliferación celular o apoptosis inapropiada.

La disminución mitocondrial, alteración de permeabilidad mitocondrial y liberación de factores proapoptóticos.

Interacción con receptores hormonales o modulares endocrinos, lo que puede provocar disrupción endocrina. (34)

1.3.2.2. Efectos en la salud humana.

Según la OMS estar en contacto con arsénico (As^{+3}) puede producir irritación, ampollas o exantemas y un consumo accidental conlleva a náuseas, vómitos, diarreas, dolor abdominal, entumecimientos en las extremidades u hormigueo. (36)

Una exposición prolongada y reiterada puede producir hiperpigmentación, hiperqueratosis y aparición de queratosis palmo-plantar. Una asociación sólida con cáncer de piel, pulmón, vejiga, hígado, riñón y posiblemente próstata. (36)

Enfermedades cardiovasculares como la hipertensión o infarto miocardio.

Trastornos del desarrollo y efectos reproductivos, exposición prenatal y temprana asociada a baja cognición, mayor mortalidad infantil, malformación y nacimiento prematuro. (36)

Deterioro cognitivo en niños y adultos, daño neuromuscular, disminución de capacidad respiratoria y mayor mortalidad por tuberculosis bronquiectasia. (36)

1.3.3. Impacto ambiental.

El arsénico es un metaloide ubicuo en la corteza terrestre que se encuentra de forma natural en las rocas, suelo, aire y agua. Su presencia en el medio ambiente puede deberse tanto a procesos naturales como las actividades antropogénicas. La contaminación del agua con el arsénico es un problema ya mencionado como un problema en la salud pública mundial, ya que millones de personas están expuestas a concentraciones que superan los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). (36)

1.3.3.1. Fuentes de contaminación.

1.3.3.1.1. Fuentes naturales.

La principal fuente natural de contaminación por el arsénico en las aguas subterráneas es la disolución de minerales que lo contienen presentes en la corteza terrestre. Procesos como la erosión de rocas y sobre todo las emisiones volcánicas contribuyen a su distribución

en el medio ambiente. En muchas de las regiones, la geología local, caracterizadas por la presencia de rocas ígneas y sedimentarias, predisponen a la contaminación de las aguas subterráneas. (37)

1.3.3.1.2. Fuentes antropogénicas.

Las actividades humanas han incrementado significativamente la liberación del arsénico al medio ambiente. Se considera estas fuentes principales:

La actividad minera, es una de las principales fuentes antropogénicas de contaminación de agua por arsénico a nivel mundial. Este metaloide, a menudo se encuentra asociado con depósitos minerales de interés comercial como el oro, la plata, el cobre y el plomo. Las operaciones mineras, al alterar las condiciones geológicas y químicas del entorno, pueden provocar la liberación y movilización de grandes cantidades de arsénico hacia las fuentes de agua superficiales y subterráneas. (38)

Algunos de los principales procesos mineros que libran arsénico son la excavación y procesamiento de minerales, fundición de metales, residuos mineros, drenaje ácido de las minas y lixiviación de relaves y residuos.

La excavación de rocas y minerales de la tierra es el primer paso para movilizar el arsénico. La excavación expone los minerales sulfuros, como la arsenopirita (FeAsS), el mineral de arsénico más común, al oxígeno atmosférico y al agua. Esta exposición desencadena reacciones de oxidación que liberan arsénico de su matriz mineral estable. (25)

El procesamiento posterior del mineral, que incluye técnicas de trituración, molienda y extracción como la lixiviación, aumenta aún más la superficie de los minerales, acelerando la velocidad de reacción y la disolución del arsénico. La lixiviación, un proceso que utiliza soluciones químicas para disolver metales valiosos, que también se puede disolver y movilizar el arsénico presente en el mineral. Factores como el pH y el potencial redox de las soluciones de procesamiento influyen significativamente en la especiación y movilidad del arsénico, determinando su forma química (arsenito o arsenato) y ya en consecuencia su toxicidad y comportamiento en el medio ambiente. (38)

La fundición es un proceso metalúrgico de alta temperatura por el cual se utiliza para extraer metales de sus minerales. Cuando los concentrados de mineral que contienen arsénico se calientan a altas temperaturas, el arsénico se volatiliza y pasa a la fase gaseosa. Estas emisiones que son gaseosas pueden contener óxidos de arsénico, como el trióxido de arsénico (As_2O_3), que en particular son considerados altamente tóxicos. (39)

Si estos gases no son captados por los sistemas de control de la contaminación, estas emisiones atmosféricas pueden extenderse por grandes áreas, contaminando el suelo, los cuerpos de agua y la vegetación. Las partículas como el polvo generadas durante los procesos de fundición también son una fuente importante de contaminación por arsénico, ya que pueden contener altas

concentraciones del metaloide. La deposición de estas partículas contribuye a la contaminación del suelo y del agua en las zonas que rodean las fundiciones. (40)

Las actividades mineras generan grandes volúmenes de residuos, incluyendo la sobrecarga (roca extraída para acceder al mineral) y los relaves (el material restante tras la extracción del mineral objetivo). Estos residuos suelen contener trazas de minerales sulfuros, incluyendo arsénico. Estos desechos a menudo contienen minerales de sulfuro residuales, incluidos los que contienen arsénico. (41)

Uno de los problemas ambientales más importantes asociados a los desechos mineros es la generación de drenaje ácido de mina (DAM). La DMAE se produce cuando los minerales de sulfuro presentes en los desechos quedan expuestas al aire y el agua, lo que produce ácido sulfúrico. Esta solución ácida es muy eficaz para lixiviar metales y metaloides, incluido el arsénico, de los desechos, lo que genera un efluente altamente contaminado. El DAM puede contaminar gravemente las aguas superficiales y subterráneas, volviéndolo tóxico para la vida acuática y no apto para el consumo humano. (41)

Incluso en ausencia del DAM, la lixiviación de arsénico de pilas de desechos de roca y presas de relaves puede ocurrir con el tiempo debido a la percolación del agua de lluvia. (41) Factores como la mineralogía de los residuos, el tamaño de las partículas, el pH del agua de filtración y la presencia de otras sustancias químicas influyen en la tasa de liberación de arsénico. La movilización de

arsénico puede verse exacerbada por la presencia de otros iones en el agua, como el fosfato, que puede desplazar el arsénico adsorbido en las superficies minerales. (39)

Los procesos mineros, desde la excavación inicial hasta la disposición final de residuos, presentan múltiples vías de liberación de arsénico al medio ambiente. Comprender estos mecanismos es fundamental para desarrollar estrategias eficaces de gestión y mitigación que minimicen el impacto ambiental de la minería y protejan la salud pública. (41)

La actividad industrial, la contaminación por arsénico en el río Yura y su cuenca se relaciona principalmente con las fuentes naturales de origen geológico y volcánico, propias de la cordillera de los Andes. Sin embargo, ciertas actividades industriales como la presencia de la cementera Yura cerca del río aumentan la sospecha de concentración y movilización de este metaloide en aguas superficiales. La descarga de efluentes industriales no tratados y la lixiviación de vertederos pueden ser fuentes puntuales de contaminación. En el distrito de Yura se han reportado problemas con aguas residuales y lixiviados del vertedero de Quebrada Honda, que podrían arrastrar diversos contaminantes a fuentes de agua cercana como es el río Yura.

La agricultura, especialmente en el siglo XX, fue una fuente importante y duradera de contaminación por arsénico debido al uso extensivo de pesticidas y herbicidas que contenían este metaloide. Si bien muchas de estas prácticas se han interrumpido en muchas partes del mundo, el legado de esta contaminación persiste en los suelos

agrícolas y podría seguir afectando las fuentes de agua y la seguridad alimentaria.

Los pesticidas arsenicales inorgánicos, históricamente han sido la principal vía de contaminación agrícola. Compuestos como el arseniato de plomo ($PbHAsO_4$) y el arseniato de calcio ($Ca_3(AsO_4)_2$) fueron ampliamente utilizados como insecticidas desde los finales del siglo XIX hasta mediados del siglo XX, principalmente para controlar las plagas en los huertos de frutas como manzanas, peras y uvas. (38)

El mecanismo por el cual se genera la contaminación se debe a que estos pesticidas se rociaban directamente sobre los cultivos. El exceso de arsénico se filtraba al suelo o se depositaba en él mediante la caída de las hojas. Debido a su baja solubilidad y fuerte absorción a las partículas del suelo, el arsénico se acumulaba en la capa superficial, donde permanecía durante décadas. Se estima que tan solo en Estados Unidos, se aplicaron más de un millón de toneladas de pesticidas arsenicales. (42)

1.4. NORMATIVA Y ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AGUA.

La calidad del agua se encuentra regulada a nivel internacional y nacional mediante normas y estándares que establecen los valores máximos permitidos para diferentes contaminantes, entre ellos el arsénico, debido a su alta toxicidad y riesgo para la salud.

Estas regulaciones buscan garantizar la protección de la salud humana, las actividades agrícolas y ganaderas, así como la preservación de los ecosistemas acuáticos.

1.4.1. Límites permisibles de arsénico en agua.

1.4.1.1. Organización mundial de la salud (OMS).

La Organización Mundial de la Salud (OMS), como autoridad directiva y coordinadora en asuntos de sanidad internacional en el sistema de las Naciones Unidas, establece valores de guía para la calidad del agua potable. Estos valores se han adoptados como referencia para diversos países y organismos que puedan adoptar o adaptar para establecer sus propias normativas nacionales. (1)

Valor guía: 0.010mg/L

El valor guía 0.010mg/L, establecido por primera vez en 1993 y reafirmado en la última edición de las “Guías para la calidad del agua de consumo humano”, se basa sobre todo en la evaluación del riesgo de cáncer de piel, pulmón y vejiga asociados a la exposición crónica al arsénico inorgánico a través del agua. El arsénico es clasificado por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) como un carcinógeno del Grupo 1, lo que significa que hay evidencias suficientes de su carcinogenicidad en humanos. Por lo que la OMS determinó que una concentración de 0.010mg/L corresponde a un riesgo de cáncer de piel de aproximadamente 6 por 10,000 personas a lo largo de su vida. (1)

La OMS califica este valor como “provisional” por dos razones principales:

Limitaciones analíticas y de tratamiento: Reconoce que, para muchos países, alcanzar y sobre todo monitorear de manera consistente niveles inferiores a 0.010mg/L presenta muchos desafíos técnicos y económicos significativos. Las tecnologías para la remoción de arsénico pueden ser

costosas y complejas de operar, sobre todo en aquellas comunidades pequeñas o con recursos limitados. (43)

Incertidumbre científica: Aunque la evidencia de carcinogenicidad es sólida, persisten incertidumbres en la cuantificación del riesgo a concentraciones muy bajas.

No obstante, el consenso científico indica que no existe un umbral por debajo del cual la exposición al arsénico sea completamente segura. Por ello la recomendación es mantener las concentraciones bajas. (1)

1.4.1.2. Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA).

A diferencia de la Organización Mundial de la Salud, la EPA es una agencia gubernamental de los Estados Unidos con autoridad para establecer y hacer cumplir regulaciones ambientales, incluidos los estándares de calidad del agua potable para los sistemas públicos del país. La EPA ha establecido el **Máximo Contaminant Level (MCL)**, o Nivel Máximo de Contaminante, para el arsénico en agua potable en 0.010 mg/L. (44)

El estándar actual de 0.010 mg/L, conocido como la “Regla del arsénico”, fue establecido el 22 de enero de 2001, y los sistemas de agua debían cumplirlo a más tardar el 23 de enero de 2006. Este estándar reemplazó al antiguo límite de 0.05 mg/L. La reducción fue el resultado de años de investigación científica que confirmaron los riesgos para la salud a concentraciones más bajas de las previamente aceptadas. (44)

La EPA establece dos tipos de valores

Meta de Nivel Máximo de Contaminante (MCLG): Para el arsénico, el MCLG es de cero. Este es un objetivo de salud pública no exigible que

establece el nivel en el cual no se conocen ni se anticipan efectos adversos para la salud humana. Al ser el arsénico un carcinógeno sin un umbral seguro conocido, la meta ideal es su ausencia total. (45)

Nivel Máximo de Contaminante (MCL): El MCL es el estándar legalmente exigible. Se fija en 0.010 mg/L, lo más cercano posible del MCLG, tomando en consideración la viabilidad tecnológica y económica del tratamiento de agua. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) determinó que 0.010 mg/L era el nivel más bajo que los sistemas de agua podían alcanzar de manera factible utilizando las mejores tecnologías de tratamiento disponibles y sobre todo a un costo razonable. (45)

1.4.1.3. Estándares de calidad ambiental (ECA).

En Perú a través del Ministerio del Ambiente (MINAM), establece que los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el agua mediante el Decreto Supremo N°004-2017-MINAM. Los ECA son una herramienta de gestión ambiental que define el nivel de concentración de sustancias en el agua que no representa un riesgo para la salud o el ambiente estableciendo límites diferentes según el uso final del recurso.

Que establece un valor máximo de 0.010 mg/L de As. (46)

En la Tabla 1 se detallan los estándares de calidad del agua.

Categoría 1: Poblacional y recreacional

Esta categoría es la más relevante e importante para el consumo humano y se subdivide según el nivel de tratamiento que requiere para ser potable.

- **A1- Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección (Límite 0.010 mg/L):** Se refiere a fuentes de agua de muy alta

calidad que teóricamente solo requieren de desinfección para ser aptas para el consumo. El límite de 0.010 mg/L se alinea con la recomendación de la OMS y el estándar de la EPA, reconociendo que el agua de alta calidad no debe tener una carga inicial de arsénico que represente un riesgo. (46)

- **A2- Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional (Límite 0.020 mg/L):** Corresponde a la mayoría de las fuentes superficiales que requieren un tratamiento convencional (coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección). Se establece un límite inicial más alto bajo el supuesto de que el proceso de tratamiento convencional puede remover una porción del arsénico presente, permitiendo que el agua tratada final cumpla con el estándar de agua potable que es de 0.010 mg/L en Perú. (46)
- **A3- Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado (Límite 0.050 mg/L):** Aplica a fuentes de agua más contaminadas que requieren tecnologías de tratamiento más sofisticadas y costosas. Este límite, que coincide con el antiguo estándar de la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos., se aplica a cuerpos de agua con una contaminación significativa. Se asume que cualquier entidad que utilice una fuente tan comprometida debe implementar un tratamiento avanzado que sea eficaz en la remoción de arsénico. (46)

Tabla 1. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM

Parámetro	Unidad medida	Contacto primario
Aluminio	mg/L	0.2
Antimonio	mg/L	0.006
Arsénico	mg/L	0.01
Bario	mg/L	0.7
Berilio	mg/L	0.04
Boro	mg/L	0.5
Cadmio	mg/L	0.01
Cobre	mg/L	2
Hierro	mg/L	0.3
Manganeso	mg/L	0.1
Mercurio	mg/L	0.001
Níquel	mg/L	0.02
Plata	mg/L	0.01
Plomo	mg/L	0.01
Selenio	mg/L	0.01
Uranio	mg/L	0.02
Vanadio	mg/L	0.1
Zinc	mg/L	3

1.5. RÍO YURA.

El río Yura es un importante curso de agua ubicado en el sur de Perú, en la región de Arequipa. Nace en las altas montañas de la cordillera de los Andes, específicamente en las zonas de la provincia de Arequipa, a una altitud que supera los 3.000 metros sobre el nivel del mar. Su cuenca abarca una gran variedad de paisajes, desde las frías zonas de la puna hasta los valles interandinos, y recorre un

terreno que es clave para la agricultura y el abastecimiento de agua en la región.

(47)

A lo largo de su trayecto, el río Yura alimenta a varias comunidades rurales y urbanas, siendo especialmente importante para la ciudad de Arequipa, que depende de sus aguas para consumo humano, riego agrícola e incluso para la producción de energías. El río también es conocido por sus paisajes, que incluyen áreas de montañas, quebradas y valles, que le confieren un gran valor ecológico.

Finalmente, el río Yura desemboca en el río Chili, un afluente que atraviesa la ciudad de Arequipa y es uno de los principales cursos de agua en la región. Su cuenca es vital no solo para las actividades económicas locales, sino también para el sustento de diversas especies de flora y fauna que habitan en la zona. (48)

1.5.1. Ubicación geográfica.

El río Yura es parte de la cuenca del río Chili, ubicado en la región de Arequipa, en el Sur del Perú. Nace a una altitud aproximada de 4800 m.s.n.m., en una zona conocida como Pampa de Arrieros. Su recorrido va en dirección sureste-noroeste, atravesando el distrito de Yura, lugar donde recibe aportes de pequeñas quebradas estacionales. Finalmente, sus aguas concluyen con el Río Chili después de recorrer cerca de 60 km a una altitud aproximada de 2400 m.s.n.m. (49)

Es crucial mencionar su recorrido y cómo sus aguas se unen a las del río Chili para formar el río Vítor. El nombre “Yura” proviene del vocablo quechua “Yurac”, que significa “blanco”, posiblemente en alusión a las llanuras salitrosas de la zona. (49)

1.5.2. Importancia socioeconómica y usos de agua.

El río Yura es un recurso vital para la región puesto que sus aguas son fundamentalmente usadas para la agricultura y la ganadería a pequeña escala. Además, el río tiene un rol importante en la generación de energía hidroeléctrica, con plantas que benefician a las comunidades originarias. Por otro lado, la zona es conocida por el Balneario de Yura, cuyas aguas termales poseen propiedades curativas reconocidas desde hace mucho tiempo. Proyectos de modernización hídrica, como la presa Casablanca, buscan optimizar el uso del agua para sectores agrícolas, industrial y poblacional, lo que demuestra su relevancia estratégica. (47)

1.5.3. Problemáticas ambientales y contaminación.

Un punto crítico es la contaminación que afecta al río y sus alrededores. Se ha reportado contaminación por aguas residuales provenientes de plantas de tratamiento, generando focos de malos olores y proliferación de insectos. A esto se suma la grave problemática del botadero municipal de Quebrada Honda, que recibe los residuos sólidos de gran parte de Arequipa y genera contaminantes del aire, suelo y agua, así afectando la salud y calidad de vida de los pobladores que radican por ese sector poblacional. (50)

En la Figura 3 se observa la ubicación del Río Yura.

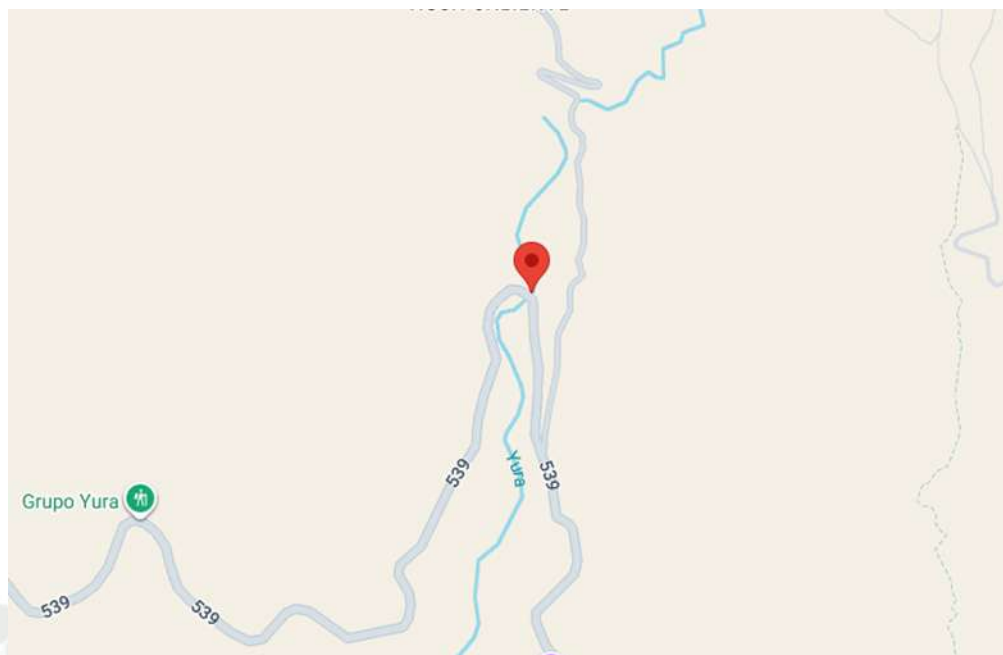


Figura 3 Ubicación geográfica del Río Yura, Google Maps.

1.6. PRINCIPIOS ECOTOXICOLÓGICOS ACUÁTICOS: BIOACUMULACIÓN Y TOXICIDAD CRÓNICA DEL ARSÉNICO EN RÍOS.

La bioacumulación se refiere al proceso mediante el cual los organismos acuáticos acumulan arsénico directamente del medio ambiente (agua o sedimentos) o a través de su dieta, hasta alcanzar concentraciones internas mayores que las del entorno. Estudios en oligoquetos muestran que especies como *Branchiura sowerbyi* y *Tubifex tubifex* acumulaban arsénico en sus tejidos después de exposición prolongada, evidenciando la importancia de la acumulación interna en especies bentónicas expuestas a sedimentos contaminados. (51)

La toxicidad crónica del arsénico en aguas de río implica efectos adversos subletales tras exposiciones prolongadas (semanas a meses). Estos efectos pueden incluir estrés oxidativo, alteraciones en enzimas antioxidantes, daño a tejidos, reducción del crecimiento, cambios en el comportamiento o en la reproducción de organismos. Por ejemplo, en estudios con peces expuestos a concentraciones relativamente bajas

de arsénico por varios días se observaron incrementos en la actividad de catalasa (CAT) y superóxido dismutasa (SOD), así como acumulación en hígado y otros órganos. (52)

1.7. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA.

La determinación de arsénico en agua puede realizarse de mediante diversos métodos analíticos, que varían en sensibilidad, costo y complejidad de la técnica.

1.7.1. Métodos.

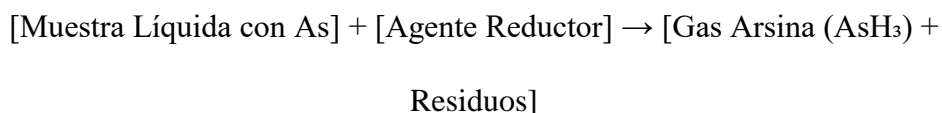
Espectroscopia de absorción atómica (AAS), es una técnica analítica utilizada para la determinación cuantitativa de elementos metálicos. Su principio se basa en la absorción de radiación electromagnética por átomos libres en estado gaseoso, los cuales son generados mediante un proceso de atomización. En el caso del arsénico, la muestra suele someterse a generación de hidruros, técnica que transforma el arsénico en arsina, la cual se atomiza posteriormente en una llama o en un horno de grafito.

La cantidad de radiación absorbida por los átomos es proporcional a la concentración del elemento en la muestra. El análisis se realiza empleando una lámpara de cátodo hueco específica para arsénico, que emite luz en una longitud de onda característica (193.7 nm). La técnica es reconocida por su precisión en la determinación de metales en agua, suelos, alimentos y tejidos biológicos. (53)

Generación de hidruros (Preparación de la muestra).

Proceso, la muestra líquida que contiene arsénico (As) se hace reaccionar con un agente reductor (como borohidruro de sodio, NaBH_4).

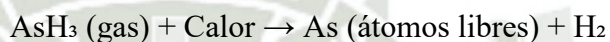
Transformación, esta reacción química convierte el arsénico disuelto en un gas volátil y reactivo llamado Arsina (AsH_3).

**Atomización.**

Proceso, un gas inerte (como argón) arrastra el gas de arsina (AsH₃) desde el reactor y lo conduce hacia una fuente de calor.

Fuente de calor, generalmente es una celda de cuarzo calentado o una llama.

Transformación, el calor intenso descompone las moléculas de AsH₃, liberando una nube densa de átomos de arsénico (As) libres y en su estado fundamental.

**Medición de la absorbancia.**

Fuente de luz, una lámpara de cátodo hueco específica para arsénico emite un haz de luz a una longitud de onda característica y única para este elemento:

193.7 nm.

Interacción, este haz de luz atraviesa a la nube de átomos de arsénico generada en el paso anterior.

Fenómeno, los átomos de arsénico absorben una parte de la energía de la luz, exactamente a 193.7 nm. La cantidad de luz absorbida es directamente proporcional al número de átomos de arsénico presentes.

[Luz de la Lámpara (193.7 nm)] → Pasa a través de [Nube de Átomos de As]

→ [Luz con Intensidad Reducida]

Detección y resultado

Detección, la luz que no fue absorbida por los átomos de arsénico llega a un detector.

Cálculo, el equipo mide la diferencia entre la intensidad inicial de la luz y la intensidad final (después de pasar por la muestra). Esta diferencia se conoce como absorbancia.

Resultado final, la absorbancia se traduce directamente, mediante un gráfico de calibración, en la concentración de arsénico en la muestra original.

[Detector] → Mide la Absorbancia → [Cálculo de Concentración ($\mu\text{g/L}$, ppm)]

Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), es una técnica instrumental de alta sensibilidad utilizada para detectar y cuantificar elementos en concentraciones de trazas o ultratrazas. El principio consiste en ionizar los elementos de la muestra en un plasma de argón generado por una corriente de radiofrecuencia. Los iones producidos son introducidos en un espectrómetro de masas, donde se separan según su relación masa/carga (m/z) y se cuantifican mediante un detector.

El ICP-MS puede determinar simultáneamente más de 70 elementos, incluyendo arsénico, con límites de detección del orden de nanogramos por litro (ng/L). Es ampliamente empleado en estudios ambientales, biomédicos y de control de calidad debido a su capacidad multielemental, su rapidez de análisis y la posibilidad de realizar especiación química cuando se acopla a técnicas cromatográficas (como cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC) para separar compuestos químicos con la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) para detectar y cuantificar elementos en esos compuestos (HPLC-ICP-MS)). (54)

Introducción de la muestra (Nebulización).

Proceso, la muestra, generalmente líquida, es aspirada e introducida en un nebulizador.

Transformación, el nebulizador convierte la muestra líquida en un fino aerosol (una niebla de diminutas gotas).

Transporte, un flujo de gas argón arrastra este aerosol hacia el siguiente componente: la antorcha de plasma.

[Muestra Líquida] → [Nebulizador] → [Aerosol Fino]

Ionización en plasma de Argón.

Fuente de energía, el aerosol entra en una antorcha de plasma de argón. El plasma es un gas extremadamente caliente (6,000 - 10,000 °C) generado por un campo de radiofrecuencia.

Transformación, dentro del plasma, el aerosol se descompone instantáneamente. Las moléculas se disocian en átomos, la altísima energía del plasma arranca electrones de estos átomos, convirtiéndolos en iones con carga positiva (+).

Resultado, se obtiene una corriente de iones representativa de la composición elemental de la muestra original.

[Aerosol] + [Plasma de Argón (~8000 °C)] → [Átomos] → [Iones +]

Separación por masas.

Extracción, los iones generados en el plasma son extraídos y enfocados mediante lentes iónicas hacia el espectrómetro de masas, que se encuentra en un sistema de alto vacío.

Filtrado, dentro del espectrómetro, los iones se separan en función de su relación masa/carga (m/z). Un campo electromagnético variable permite que

solo los iones con una relación m/z específica puedan pasar a través del filtro en un momento dado.

Barrido, el espectrómetro realiza un barrido rápido a través de un rango de masas, separado eficientemente todos los elementos presentes, desde los más ligeros hasta lo más pesado.

[Corriente de Iones] → [Filtro de Masas (m/z)] → [Iones Separados por
Masa]

Detección y análisis.

Conteo, los iones separados llegan a un detector (como un multiplicador de electrones) que cuenta la cantidad de iones para cada relación m/z .

Señal, la intensidad de la señal registrada para cada masa es directamente proporcional a la concentración de ese elemento en la muestra original.

Resultado final, el software procesa los datos y genera un espectro de masas, mostrando la concentración de más de 70 elementos simultáneos, con límites de detección extremadamente bajos (ng/L o partes por trillón).

[Iones Contados] → [Generación de Espectro de Masas] → [Resultados de
Concentración Multielemental]

Espectrofotometría de UV-VIS, es un método óptico basado en la medición de la absorbancia de radiación electromagnética en las regiones ultravioleta (200–400 nm) y visible (400–800 nm). En la determinación de arsénico, esta técnica se utiliza comúnmente junto al reactivo dietilditiocarbamato de plata (DDTC-Ag), que forma un complejo coloreado con el arsénico reducido a su estado trivalente (As^{3+}).

La intensidad del color del complejo, medida a una longitud de onda de 520 nm, es directamente proporcional a la concentración del arsénico en la muestra.

Esta técnica es adecuada para estudios de monitoreo ambiental y validación de métodos de laboratorio, debido a su simplicidad y capacidad para detectar concentraciones en el rango de microgramos por litro ($\mu\text{g/L}$). (55)

Preparación y reacción coloreada.

Proceso, la muestra que contiene arsénico se somete a un tratamiento químico para convertir todo el arsénico a su estado de oxidación +3 (As^{3+}).

Reacción clave, a esta muestra tratada se le añade el reactivo Dietilditiocarbamato de plata (DDTC-Ag).

Transformación, el As^{3+} reacciona con el DDTC-Ag para formar un complejo de color rojizo. La intensidad de este color será directamente proporcional a la cantidad de arsénico presente.

[Muestra con Arsénico (As^{3+}) + [Reactivo DDTC-Ag] \rightarrow [Formación de un
Complejo Coloreado]

El instrumento (Espectrofotómetro UV-VIS).

Fuente de luz, emite radiación en el rango ultravioleta (UV) y visible (Vis).

Monocromador, selecciona una única longitud de onda. Para este análisis, se fija en 520nm (luz verde), que es la longitud de onda que más absorbe el complejo rojizo.

Portacubetas, donde se coloca la cubeta con la muestra coloreada.

Detector, mide la intensidad de la luz que logra atravesar la muestra.

[Luz Blanca] \rightarrow [Monocromador selecciona 520 nm] \rightarrow [Haz de Luz
Monocromática]

Medición de la absorbancia.

Proceso, el haz de luz de 520nm se hace pasar a través de la cubeta que contiene el complejo de arsénico coloreado.

Fenómeno de absorción, las moléculas del complejo coloreado absorben una porción de la energía lumínica. Cuanto más concentrado esté el complejo, más luz absorberá.

Luz transmitida, la luz restante, que no fue absorbida, atraviesa la muestra y llega al detector.

[Luz Incidente (520 nm)] → Atraviesa la [Muestra Coloreada] → [Luz Transmitida (intensidad reducida)]

Cuantificación y resultado final.

Cálculo, el detector mide la intensidad de la luz transmitida y el equipo lo compara con la intensidad de la luz incidente. Con estos datos, calcula un valor llamado absorbancia.

Ley de Beer-Lambert, este principio establece que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración del analito (en este caso, el complejo del arsénico).

Resultado, mediante un gráfico de calibración previa, el valor de absorbancia se convierte en la concentración de arsénico en la muestra original, típicamente expresada en microgramos por litro ($\mu\text{g/L}$)

[Detector Mide la Luz] → [Cálculo de Absorbancia] → [Concentración de Arsénico ($\mu\text{g/L}$)]

1.7.2. Ventajas y limitaciones.

En la Tabla 2 se comparan las limitaciones y ventajas de cada método.

Tabla 2. Tabla comparativa de los métodos de análisis de arsénico*.

Método	Ventajas	Limitaciones
Absorción Atómica	Buena sensibilidad Relativamente de bajo costo Capaz de diferenciar estados de oxidación.	Analiza un solo elemento a la vez. Menos sensible que ICP-MS. Posibles interferencias químicas.
ICP-MS	Muy alta sensibilidad Permite análisis multi-elemental simultáneo Amplio rango dinámico.	Costo de equipo y mantenimiento muy elevado. Requiere personal altamente especializado. No siempre accesible en laboratorios locales.
Espectrofotometría	Método sencillo y económico. Equipos accesibles y de bajo mantenimiento. Adecuado para laboratorios con recursos limitados. Permite análisis rutinario de varias muestras.	Menor sensibilidad Requiere formación de complejos coloreados

*Elaboración propia

1.8. MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO CON DIETILDITIOCARBAMATO DE PLATA (DDTC-AG).

1.8.1. Principio del método.

El método se fundamenta en la formación de un complejo coloreado que puede ser cuantificado mediante espectrofotometría UV-Vis. El arsénico presente en la muestra se reduce a su estado trivalente (As^{3+}) por acción del cloruro estanoso en un medio ácido. Posteriormente, la adición de zinc genera arsina (AsH_3) junto con hidrógeno gaseoso, el cual actúa como vehículo para transportar la arsina producida.

El gas generado atraviesa un tapón de algodón impregnado con acetato de plomo, con el fin de eliminar posibles interferencias causadas por sulfuros. Finalmente, la arsina es conducida hacia un tubo de absorción que contiene una solución de dietilditiocarbamato de plata y morfolina disueltos en cloroformo, donde se forma un complejo de color rojo cuya absorbancia máxima se registra a 520 nm. (56)

1.8.2. Ventajas frente a otros métodos.

La técnica espectrofotométrica basada en la formación del complejo con dietilditiocarbamato de plata (DDTC-Ag) ofrece diversas ventajas en la determinación de arsénico. Destaca por su alta sensibilidad y especificidad, ya que la reacción del arsénico con el reactivo genera un complejo coloreado que permite detectar concentraciones muy bajas, aspecto fundamental en el análisis de muestras ambientales y biológicas.

En términos de desempeño analítico, el método presenta un límite de detección aproximado de 0.01 mg/L, un límite de cuantificación entre 0.02 y 0.03 mg/L, y un rango lineal de trabajo comprendido entre 0.01 mg/L y 1 mg/L.

Asimismo, se caracteriza por su simplicidad y rapidez, dado que la formación del complejo es un proceso directo que no requiere etapas de preparación extensas ni equipos de alta complejidad. Finalmente, esta técnica ha demostrado una amplia versatilidad de aplicación, habiéndose empleado con éxito en la determinación de arsénico en matrices diversas como agua, suelos, alimentos y muestras biológicas. (56)





CAPÍTULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1. LUGAR DE INVESTIGACIÓN.

La presente investigación se realizó en las instalaciones de la Universidad Católica de Santa María, en el pabellón H-104 y H-301, donde se llevaron las muestras desde el río Yura, para la preparación de soluciones y así continuar con la investigación.

2.2. MATERIALES.

2.2.1. Equipos.

- Espectrofotómetro UV-vis “Peak Instruments T-9200”
- Balanza analítica “Kern ABS 220-4”
- Estufa de secado “Mettler, UM100”
- Campana de extracción “ZJ-TFG-12”

2.2.2. Materiales.

- Matraz
- Matraz aforado
- Vasos de precipitados
- Pinzas
- Espátulas
- Propipetas
- Pipetas
- Embudos
- Soporte universal
- Equipo de determinación de arsénico

2.2.3. Reactivos.

- Ácido clorhídrico 37% grado analítico
- Yoduro de potasio grado analítico Merck Catálogo N° 105043
- Cloruro de estaño (II) grado analítico
- Zinc grado analítico Merck Catálogo N°107375
- Cloroformo grado analítico Merck Catálogo N° 102445
- Acetato de plomo (II) trihidratado grado analítico Merck Catálogo N°107375
- Solución patrón trazable a SRM de NIST H_3ASO_4 en HNO_3 0.5 mol/L. 1000mg/L As. Merck Catálogo N° 119773
- Dietilditiocarbamato de plata Pro-análisis Merck Catálogo N° 101515
- Morfolina para síntesis, Merck Catalogo N° 806127

2.3. MÉTODOS.

2.3.1. Validación del método.

2.3.1.1. Linealidad.

Se preparó un gráfico de calibración a partir de una solución patrón de As con concentraciones entre 0.005 mg/L y 40 mg/L.

Se considera aceptable un coeficiente de correlación lineal (R_2) ≥ 0.995 .

2.3.1.2. Límite de detección (LoD) y Limite de cuantificación (LoQ).

Se midió 10 veces el blanco para calcular la desviación estándar y la pendiente de los resultados.

2.3.1.3. Precisión.

Se usó 3 soluciones de arsénico: Bajo 0.010 mg/L, Medio 0.020 mg/L y Alto 0.030mg/L.

Se realizó 6 réplicas de cada nivel y se expresaron los resultados en la Tabla 5.

Se considera aceptable un valor de variación entre las repeticiones (%RSD) menor al 5%.

2.3.1.4. Exactitud.

Se usó 3 soluciones de arsénico: Bajo 0.015 mg/L, Medio 0.025 mg/L y Alto 0.035 mg/L.

Se realizó 3 réplicas de cada nivel y se expresaron los resultados en la Tabla 8.

Se considera aceptable un porcentaje de recuperación entre 80 y 120% del valor real.

2.3.2. Obtención de muestra.

2.3.2.1. Preparación previa.

Se usó botellas de vidrio limpias y etiquetadas

Las etiquetas incluyen datos como, coordenadas, fechas y hora.

Se llevó ácido nítrico para la presentación de la muestra

Se tomó muestras por duplicado de 3 zonas diferentes, (A) 5 Km río arriba, (B) punto cercano a la planta cementera y (C) 5 Km río abajo

2.3.2.2. En el sitio.

Se sumergió la botella aproximadamente a 30 cm bajo la superficie de agua.

Se llenó la botella, dejando un espacio para evitar derrame del ácido nítrico (HNO₃).

Se agregó el ácido nítrico (HNO₃) inmediatamente para conservar un pH menor a 2.

2.3.2.3. Almacenamiento.

Se conservó la muestra bajo una temperatura de 4 a 6 °C para su posterior análisis.

Según las ISO 5667-3, se puede mantener las muestras acidificadas por un periodo de 6 meses.

2.3.2.4. Preparación de la muestra previa al análisis.

Se filtró las muestras para eliminar partículas suspendidas (si es necesario)

Se homogenizó la muestra (mezcla completa).

2.3.2.5. Preparación de las soluciones.

- **Solución de Dietilditiocarbamato -Morfolina en cloroformo:**

Se midió 1ml de Morfolina con pipeta volumétrica y disolver en 70 ml de cloroformo, añadir 0.3 g de Dietilditiocarbamato de Plata y se enraza a 100 ml con cloroformo. Conservar en frasco color ámbar

- **Solución de Cloruro Estanoso di hidratado 40% m/V de solvente:**

Se disolvió 2g de cloruro estanoso en 5 ml de ácido clorhídrico. Conservar en frasco color ámbar.

- **Solución acuosa de Ioduro de Potasio 15% m/V de solvente:**

Se disolvió 15 g de ioduro de potasio en 100 ml de agua destilada. Conservar en frasco color ámbar.

- **Solución acuosa de Acetato de Plomo 10% m/V de solvente:**

Se disolvió 5 g de acetato de plomo en 50 ml de agua destilada.

- **Preparación del filtro y absorbedor:**

Se impregnó el algodón con solución de acetato de plomo y dejarlo secar en una estufa a 103 -105 °C, por una hora, sobre una malla

metálica, se tomarán unas hebras y se colocan en el tubo recto del equipo de determinación de arsénico evitando obstruir, para que funcione como filtro.

- **Preparación de la alícuota a tratar:**

Se midió 5 mL de la muestra problema con 0.5 mL de HCl al 37% mas 0.5 mL de la solución de Ioduro de Potasio al 15% y 0.04 mL de la solución de Cloruro Estanoso Dihidratado al 40%.

Se deja reacción por 20 min.

Se agrega 4mL de la solución de Dietilditiocarbamato Morfolina en cloroformo en el tubo en U del equipo determinador de arsénico.

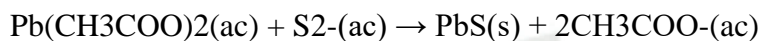
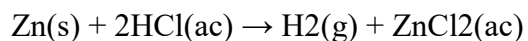
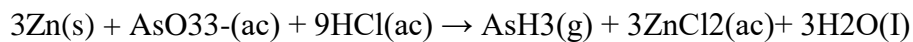
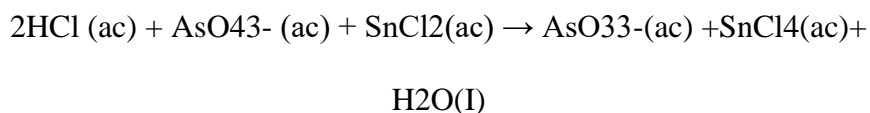
Posterior al tiempo de reacción se agrega 2 g de Zinc Granular y se arma el equipo de determinación de arsénico, se dejó reaccionar en la Campana de Extracción por 80 min.

Finalmente, se extrae 3.5mL del complejo coloreado del tubo en U y se llevó al Espectrofotómetro para medir la absorbancia de la muestra a 520nm.

2.3.2.6. Preparación del grafico de calibración.

El gráfico de calibración se preparó a partir de la solución patrón diluida para obtener concentraciones finales de 0.005 mg/L, 0.010 mg/L, 0.015 mg/L, 0.020 mg/L, 0.025 mg/L, 0.030 mg/L, 0.035 mg/L y 0.040 mg/L de As.

2.3.2.7. Ecuaciones químicas.



El complejo organometálico As (DDTC)₃ formado se extrae con cloroformo, ya que este actúa como disolvente orgánico selectivo, permitiendo aislar el complejo coloreado en la fase orgánica.

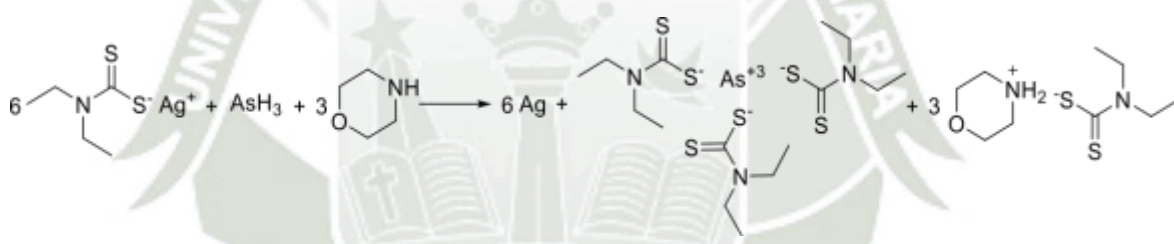


Figura 4. Reacción química de la parte final con la formación del complejo.



CAPÍTULO III

3. RESULTADOS.

3.1. VALIDACIÓN DEL MÉTODO.

3.1.1. Linealidad.

El gráfico de calibración presenta una relación lineal adecuada entre la absorbancia corregida y la concentración de arsénico, con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.9982$, un valor superior al valor mínimo aceptado ($R^2 = 0.995$).

La absorbancia corregida se calcula según la ecuación:

$$Abs\ corregida = Abs\ medida - Abs\ promedio\ del\ blanco$$

Donde:

- Abs medida es la absorbancia medida de la muestra.
- Abs promedio del blanco es la absorbancia promedio del blanco (0.0541).

Reemplazando:

$$Abs\ corregida\ (0.005\ mg/L) = 0.122 - 0.0541$$

$$Abs\ corregida\ (0.005\ mg/L) = 0.0679$$

$$Abs\ corregida\ (0.010\ mg/L) = 0.243 - 0.0541$$

$$Abs\ corregida\ (0.010\ mg/L) = 0.1889$$

$$Abs\ corregida\ (0.015\ mg/L) = 0.357 - 0.0541$$

$$Abs\ corregida\ (0.015\ mg/L) = 0.3029$$

$$Abs\ corregida\ (0.020\ mg/L) = 0.487 - 0.0541$$

$$Abs\ corregida\ (0.020\ mg/L) = 0.4329$$

$$Abs\ corregida\ (0.025\ mg/L) = 0.576 - 0.0541$$

$$Abs\ corregida\ (0.025\ mg/L) = 0.5219$$

$$\text{Abs corregida (0.030 mg/L)} = 0.687 - 0.0541$$

$$\text{Abs corregida (0.030 mg/L)} = 0.6329$$

$$\text{Abs corregida (0.035 mg/L)} = 0.801 - 0.0541$$

$$\text{Abs corregida (0.035 mg/L)} = 0.7469$$

$$\text{Abs corregida (0.040 mg/L)} = 0.890 - 0.0541$$

$$\text{Abs corregida (0.040 mg/L)} = 0.8359$$

Tabla 3 Abs medida y corregida para la creación del grafico de calibración.

Concentración (mg/L)	Abs medida	Abs corregida
0.005	0.122	0.0679
0.010	0.243	0.1889
0.015	0.357	0.3029
0.020	0.487	0.4329
0.025	0.576	0.5219
0.030	0.687	0.6329
0.035	0.801	0.7469
0.040	0.890	0.8359

En la Figura 5 se observa la relación lineal con los datos de la Tabla 3 para establecer una relación directamente proporcional a la concentración de las muestras.

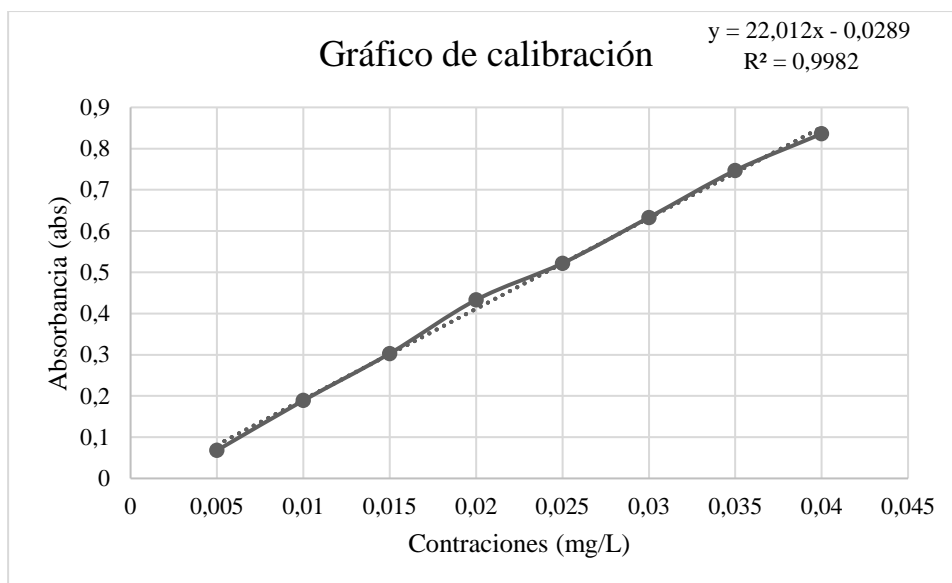


Figura 5. Gráfico de calibración de las concentraciones de As^{+3} , elaboración propia.

3.1.2. Límite de detección (LoD) y Límite de cuantificación (LoQ).

En la Tabla 4 se muestran los datos obtenidos posterior a las 10 mediciones del Blanco.

Tabla 4. Valores del Blanco.

Blanco N°	Absorbancia del blanco
1	0.056
2	0.053
3	0.054
4	0.054
5	0.057
6	0.054
7	0.053
8	0.053
9	0.054
10	0.053
Promedio	0.0541
Desviación estándar	0.0013

El límite de detección (LoD) y límite de cuantificación (LoQ) se calculan según la ecuación.

$$LoD = \frac{3 \times So_{blanco}}{pendiente} ; LoQ = \frac{10 \times So_{blanco}}{pendiente}$$

Donde:

- So (blanco) es la desviación estándar de las medidas del Blanco.
- Pendiente corresponde a la sensibilidad obtenida de la curva de calibración.

Reemplazando:

$$LoD = \frac{3 \times 0.0013}{22.012} = 0.00018 \text{ mg/L}$$

$$LoQ = \frac{10 \times 0.0013}{22.012} = 0.00059 \text{ mg/L}$$

El método espectrofotométrico mostró un límite de detección de 0.00018 mg/L y un límite de cuantificación de 0.00059 mg/L de arsénico. Los valores son significativamente inferiores al valor de ECA para agua (0.010 mg/L), por lo tanto, el método tiene sensibilidad suficiente para detectar y cuantificar concentraciones de arsénico por debajo de los niveles exigidos por la norma.

Los resultados obtenidos son significativamente inferiores a los valores establecidos por la ECA, por lo tanto, demuestra que el método tiene sensibilidad adecuada para detección y cuantificación

3.1.3. Precisión.

La precisión se evaluó mediante 6 réplicas de 3 niveles de diferentes concentraciones (bajo 0.010 mg/L, medio 0.020 mg/L y 0.030 mg/L). Para cada nivel se calculó, el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación relativo.

Tabla 5. Abs medida de los niveles de concentración.

Concentración (mg/L)	Abs medida					
0.010	0.245	0.243	0.241	0.244	0.246	0.243
0.020	0.485	0.489	0.487	0.486	0.488	0.484
0.030	0.685	0.687	0.686	0.687	0.686	0.684

La absorbancia corregida se calcula según la ecuación:

$$Abs\ corregida = Abs\ medida - Abs\ promedio\ del\ blanco$$

Tabla 6. Abs corregida de los niveles de concentración.

Concentración (mg/L)	Abs corregida					
0.010	0.1909	0.1889	0.1869	0.1899	0.1919	0.1889
0.020	0.4309	0.4349	0.4329	0.4319	0.4339	0.4299
0.030	0.6309	0.6329	0.6319	0.6329	0.6319	0.6299

Tabla 7. Estadísticas de precisión usando las lecturas corregidas.

NIVEL	MEDIA	SD	%RSD
BAJO (0.010 mg/L)	0.1896	0.0018	0.92%
MEDIO (0.020 mg/L)	0.4324	0.0019	0.43%
ALTO (0.030 mg/L)	0.6317	0.0012	0.19%

Los resultados obtenidos mostraron valores de %RSD de 0.92% para el nivel bajo, 0.43% para el nivel intermedio y 0.19% para el nivel alto. Según la guía ICH Q2, un método se considera preciso cuando el %RSD es menor al 5%.

En este caso todos los %RSD se encontraron por debajo del límite. Lo que demuestra que el método presenta alta repetibilidad y buena precisión.

3.1.4. Exactitud.

La exactitud se determinó mediante un ensayo de recuperación de tres niveles de concentración (0.015 mg/L, 0.025 mg/L y 0.035 mg/L).

Tabla 8. Abs medido de los niveles de concentración.

Concentración (mg/L)	Abs medida		
0.015	0.352	0.359	0.356
0.025	0.571	0.573	0.570
0.035	0.798	0.801	0.797

La absorbancia corregida se calcula según la ecuación:

$$Abs\ corregida = Abs\ medida - Abs\ promedio\ del\ blanco$$

Tabla 9. Abs corregida de los niveles de concentración.

Concentración (mg/L)	Abs corregida		
0.015	0.2979	0.3049	0.3019
0.025	0.5169	0.5189	0.5159
0.035	0.7439	0.7469	0.7429

Tabla 10. Estadísticas de la Exactitud usando las lecturas corregidas.

NIVEL	MEDIA	SD	%RSD
BAJO (0.015mg/L)	0.3016	0.0035	1.17%
MEDIO (0.025 mg/L)	0.5172	0.0015	0.29%
ALTO (0.035mg/L)	0.7446	0.0020	0.27%

Los resultados revelaron que para el nivel más bajo se obtuvo una recuperación promedio de 100.09% con un %RSD de 1.17%, para el nivel intermedio la recuperación promedio fue de 99.24% con un %RSD de 0.29% y para el nivel más alto la recuperación fue de 100.4% con un %RSD de 0.27%.

En general los valores de recuperación promedio se encuentran dentro del rango de aceptación (80% - 120%), mientras que los %RSD fueron menores al 2%, lo que indica una adecuada precisión de los resultados de recuperación. Por lo expuesto, el método presenta una exactitud aceptable para la cuantificación de arsénico en muestras de agua.

3.2. ANÁLISIS DE MUESTRA.

Se analizaron 9 muestras por duplicado, en 3 temporadas diferentes, con 3 ubicaciones diferentes.

En la Tabla 11 se muestran las absorbancias obtenidas en las diferentes temporadas y ubicaciones.

Tabla 11. Abs medidas y corregidas de las muestras en las distintas temporadas y ubicaciones.

Muestra	Temporada	Ubicación respecto a la cementera	Abs	Abs corregida
1	Pre - lluvias	5 km antes	0.087	0.033
2	Pre - lluvias	5 km antes	0.085	0.031
3	Pre - lluvias	Cerca	0.114	0.060
4	Pre - lluvias	Cerca	0.116	0.062
5	Pre - lluvias	5 km después	0.098	0.044
6	Pre - lluvias	5 km después	0.102	0.048
7	Durante lluvias	5 km antes	0.241	0.187
8	Durante lluvias	5 km antes	0.238	0.184
9	Durante lluvias	Cerca	0.405	0.351
10	Durante lluvias	Cerca	0.409	0.355
11	Durante lluvias	5 km después	0.367	0.313
12	Durante lluvias	5 km después	0.371	0.317
13	Post - lluvias	5 km antes	0.201	0.147
14	Post - lluvias	5 km antes	0.203	0.149
15	Post - lluvias	Cerca	0.347	0.293
16	Post - lluvias	Cerca	0.338	0.284
17	Post - lluvias	5 km después	0.304	0.250
18	Post - lluvias	5 km después	0.305	0.251

Con los datos obtenidos podemos calcular la cantidad de arsénico presente en las distintas muestras, siendo:

$$y=22.012x-0.0289$$

Donde:

y = absorbancia corregida

x = concentración de As en mg/L

En la Tabla 12 se muestran las concentraciones de Arsénico presentan las muestras.

Tabla 12. Concentraciones calculadas de As^{+3} .

Muestra	Cantidad de As (mg/L)
1	0.00282
2	0.00272
3	0.00404
4	0.00413
5	0.00333
6	0.00352
7	0.00981
8	0.00987
9	0.01727
10	0.01745
11	0.01554
12	0.01572
13	0.00800
14	0.00809
15	0.01465
16	0.01423
17	0.01267
18	0.01272

3.3. COMPARACIÓN CON LOS LÍMITES PERMISIBLES.

Según el D.S. N°004-2017-MINAM el límite máximo permisible de arsénico es de 0.010 mg/L. En la Figura 6 se observa la comparación.

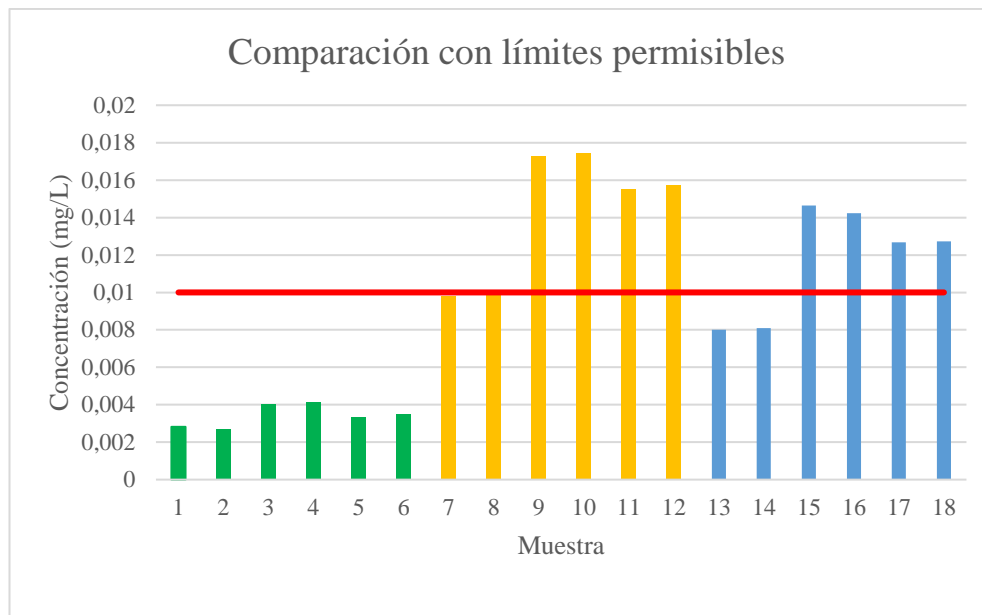


Figura 6. Comparación de las concentraciones de As^{+3} con los estándares de calidad ambiental (ECA).

Posterior a la comparación se observa un claro aumento en las concentraciones acumuladas de arsénico en las muestras correspondientes a las temporadas de precipitaciones y post lluvias, en las ubicaciones más cercanas a la zona industrial y aguas abajo.

4. DISCUSIÓN.

La distribución de las concentraciones de arsénico, con los picos más altos en los puntos cercanos (B) y aguas abajo (C) de la zona industrial de Yura, sugiere firmemente un origen antrópico. Esta gradiente de contaminación es consistente con el modelo de dispersión de efluentes o material particulado desde un punto fijo de emisión. Las actividades cementeras son una fuente conocida de metales pesados, incluido el arsénico, los cuales pueden ser transportados por escorrentía superficial o lixiviación de residuos sólidos hacia los cuerpos de agua circundantes, Yuchen Zhou et al. (57), este artículo estudia sobre el polvo emitido por una cementera y demuestra que contiene arsénico y otros metales pesados que se acumulan en suelos y aguas cercanas, Abdel Gawad et al. (58), en su investigación analiza como las concentraciones de cromo y arsénico emitidos desde una cementera se modela en el entorno, calculando riesgos a largo y corto plazo de puntos cercanos de hasta 30 Km. La presencia de niveles detectables, aunque inferiores al LMP, en el punto A, podría atribuirse a fuentes naturales por erosión geológica o a contribución difusas previas en la cuenca.

El hecho de que el 44.4% de las muestras excedieran el LMP de 0.010 mg/L establecido por el ECA- Perú (D.S. N°004-2017-MINAM) y el guideline de la OMS (2011) es motivo de preocupación. Concentraciones crónicas superiores a ese nivel se asocian con un aumento significativo del riesgo de cáncer de piel, vejiga y pulmón en la población expuesta, OMS 2011, U.S. EPA 2001. SmithAH et al. (59) es su estudio poblacional en lugares con agua contaminada por arsénico muestras que concentraciones en el rango de 0.01 – 0.05 mg/L a lo largo del tiempo aumentan significativamente la incidencia de cáncer de vejiga, piel y pulmón. Si bien nuestros valores máximos (0.01745 mg/L) no alcanza los reportados en crisis sanitarias es graves como las de Bangladesh o Argentina (> 0.050 mg/L si se encuentran en un rango que requiere monitoreo continuo o

intervención, especialmente para comunidades rurales que usan esta agua para riego o consumo sin tratamiento alguno.

El marcado patrón estacional observado, con las concentraciones más elevadas durante la época de lluvias, puede explicarse por dos mecanismos principales: la movilización por escorrentía: las precipitaciones arrastran sedimentos y partículas del suelo que habían acumulado arsénico por deposición seca de material particulado de la cementera, y la lixiviación de residuos: el agua de lluvia percola a través de pilas de residuo o áreas de almacenamiento de la industria, solubilizando y transportando especies de arsénico hacia el cauce del río. Este fenómeno de movilización estacional ha sido documentado en otras cencas impactadas por la minería e industria, Félix H et al. (60), en su estudio en la cuenca del río Moche halló diferencias en concentraciones de metales pesados entre temporada de lluvias y de estiaje, esta variación sugiere procesos estacionales de movilización relacionados con escorrentía, sedimentación y dinámica del caudal. La disminución de los niveles en la época post-lluvias sugiere un proceso de dilución y sedimentación una vez que cesa el evento de arrastre.

Cabe señalar algunas limitaciones de este estudio. El muestreo se realizó en tres meses específicos; un monitoreo a más largo plazo permitiría caracterizar mejor la variabilidad interanual. Además, el método DDTC-Ag utilizado cuantifica arsénico total reactivo, predominantemente en su forma inorgánica (As^{+3}), pero no especifica la especiación. Futuros estudios podrían emplear técnicas como entre As (III) y As(V), esta última generalmente menos tóxica pero aun así preocupante. Futuros estudios podrían emplear técnicas como cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC) para separar compuestos químicos con la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) para elucidar la especiación y así evaluar con mayor precisión de toxicidad y movilidad del arsénico presente.

En conclusión, los resultados obtenidos apoyan la hipótesis inicial de que la zona industrial de Yura es una fuente probable de arsénico en el río del mismo nombre. Se logró cuantificar el metaloide (As^{+3}) mediante el método espectrofotométrico con DDTC-Ag, validado y con la sensibilidad suficiente, cumpliendo con el objetivo general. Los patrones espaciales y temporales observado son altamente sugerentes de una influencia antrópica que se superpone a un posible fondo natural, si bien el impacto ecológico inmediato requiere más estudio, el riesgo para la salud humana por uso recreativo o agrícola del agua es tangible y justifica la implementación de las recomendaciones propuestas.

Según la evidencia encontrada, si las concentraciones de arsénico se mantienen elevadas durante un periodo de tiempo mas prolongado en el río Yura, podrían ocasionar daños al ecosistema, las plantas siendo importantes vectores de acumulación de arsénico en el medio ambiente, ya que pueden absorberlo del suelo y el agua y transportarlo a sus tejidos. En las plantas, el arsénico puede causar una amplia gama de efectos adversos, como clorosis, retraso en el crecimiento y disminución de la fotosíntesis. También puede alterar la absorción de agua y nutrientes, lo que provoca deficiencias nutricionales y la muerte de la planta. Además, el arsénico puede acumularse en el tejido vegetal, volviéndose tóxico para los herbívoros que se alimentan de ella. Una de las principales vías de exposición de las plantas al arsénico es a través de la contaminación del suelo y el agua. En zonas donde se utilizaron intensivamente plaguicidas con arsénico, el suelo y el agua pueden contaminarse, y las plantas que crecen en esa zona pueden absorber el metaloide tóxico a través de sus raíces. El arsénico también puede ser absorbido por las plantas a través de sus hojas si está presente en el aire como resultado de emisiones industriales o actividad volcánica. (61)



CAPITULO IV

CONCLUSIONES.

Primera:

Se desarrolló y validó el método espectrofotométrico con DDTC-Ag; mediante los parámetros: Linealidad con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.9982$, el Límite de Cuantificación mostró un valor de 0.00059 mg/L, el Límite de Detección dio un valor de 0.00018 mg/L, la Precisión mostro valores de %RSD de 0.92% para el nivel bajo, 0.43% para el nivel intermedio y 0.19% para el nivel alto y la Exactitud reveló que para el nivel más bajo se obtuvo una recuperación promedio de 100.09% con un %RSD de 1.17%, para el nivel intermedio la recuperación promedio fue de 99.24% con un %RSD de 0.29% y para el nivel más alto la recuperación fue de 100.4% con un %RSD de 0.27%., para determinar la cuantificación la presencia de arsénico en el río Yura.

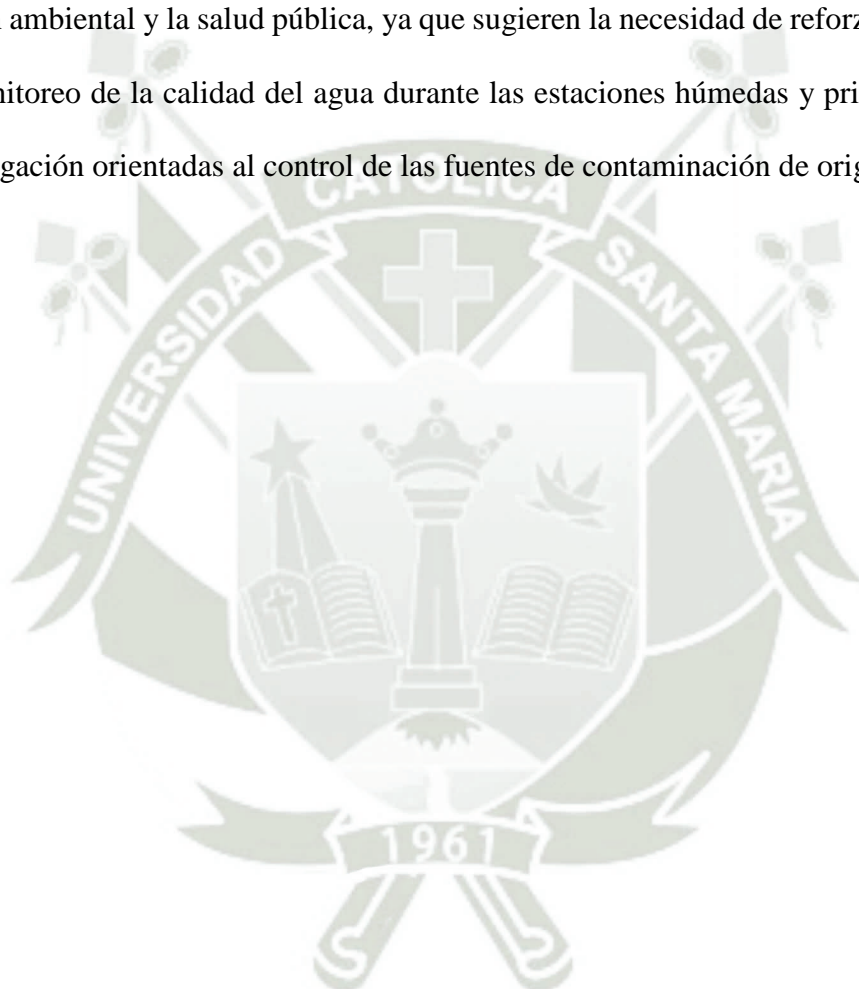
Segunda:

Se determinó la concentración de arsénico utilizando el método de espectrofotometría con Dietilditiocarbamato de plata (DDTC-Ag) en 18 muestras de agua del río Yura. Los niveles de concentración de arsénico determinados en dichas aguas presentan una gran concentración de este metaloide. Obteniéndose que el 44.4% de las muestras superan el LMP que es de 0.010 mg/L en las cercanías de la zona industrial de Yura y que esta situación agrave con las lluvias, evidencia una gestión ambiental deficiente en la contención de los contaminantes generados por dicha industria

Tercera:

El análisis de las concentraciones obtenidas en las muestras evidenció que las actividades humanas, en particular las asociadas a procesos industriales constituyen una fuente primaria de aporte de arsénico al ecosistema, el cual tiende a acumularse principalmente en el suelo. Posteriormente, los ciclos estacionales, especialmente durante la temporada de lluvias,

actúan como un mecanismo de movilización de este metaloide, siendo la escorrentía pluvial el principal vehículo de transporte de los contaminantes desde las zonas de emisión hacia las fuentes de agua. Este comportamiento explica la presencia de picos de concentración de arsénico durante y después de las lluvias, así como su incremento en áreas cercanas a focos de actividad antrópica. Los resultados obtenidos tienen implicaciones relevantes para la gestión ambiental y la salud pública, ya que sugieren la necesidad de reforzar los programas de monitoreo de la calidad del agua durante las estaciones húmedas y priorizar estrategias de mitigación orientadas al control de las fuentes de contaminación de origen humano.



RECOMENDACIONES

Se recomienda la implementación de un programa de monitoreo trimestral en 5 puntos estratégicos del río Yura, considerando zonas, aguas arriba, aguas abajo, de la zona industrial. Esta estrategia permitirá establecer una línea base ambiental y, al mismo tiempo identificar la dinámica espacial y temporal de las concentraciones de arsénico y otro metal pesado en cuerpo de agua. Al realizar campañas en periodos estacionales diferenciados se podrá determinar la influencia de factores hidrológicos en la dispersión de contaminantes. El cumplimiento de los valores obtenidos deberá contrastarse con los estándares de calidad ambiental para agua y con las guías internacionales de la OMS, a fin de disponer una evaluación comparativa sólida y de uso oficial para gestión hídrica.

Se recomienda a futuros investigadores ampliar el periodo de muestreo, anual o estacional más prolongado para comparar las concentraciones de arsénico en función del cambio climático y la actividad industrial. También se considera evaluar los efectos biológicos y ecotoxicológicos incluyendo bioindicadores para determinar el impacto ecológico del arsénico en el río Yura.

Incorporar análisis de riesgo para la salud humana, calculando el riesgo no carcinogénico y carcinogénico por exposición al arsénico a través del consumo de agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. World Health Organization. Arsenic in drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva: WHO; 2011.
2. Ministerio de Salud (Perú). Anexo N.º 2 – Programa Presupuestal 0018: Enfermedades No Transmisibles. Lima: Ministerio de Salud; 2021.
https://www.minsa.gob.pe/presupuestales/doc2021/ANEXO2_5.pdf
3. Díaz Rodríguez K, Ita Balta Y, Mujica Guzmán A, Ramos Cáceres K, Medina Pérez J, Villanueva Salas J. Estudio de los niveles de arsénico (As) en agua de consumo humano en la ciudad de Arequipa 2015–2016. Revista (o repositorio) de la Universidad Católica de Santa María; 2017.
<https://revistas.ucsm.edu.pe/ojs/index.php/veritas/article/view/83>.
4. Choquehuayta EM. Estudio de la calidad de agua y diversidad de macroinvertebrados en el canal de regadío anexo del balneario de Yura, Arequipa de agosto 2022 a febrero 2023 [Tesis]. Arequipa: [s.n.]; 2023.
5. Autoridad Nacional del Agua (ANA). Arequipa: Autoridad Nacional del Agua realiza monitoreo de calidad de agua superficial en Yura [Internet]. Gobierno del Perú; 2021. <https://www.ana.gob.pe>
6. Tahir MA, Rasheed H, Malana MA. Method development for arsenic analysis by modification in spectrophotometric technique. Drink Water Eng Sci. 2012;5(1):1–8.
<https://dwes.copernicus.org/articles/5/1/2012/>
7. Gleick PH. Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources. Oxford University Press; 1993.
8. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water. Paris: UNESCO; 2023.

9. Appelo, CAJ., Postma, D. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 2nd ed. London: A. Balkema Publishers; 2005.
10. American Public Health Association (APHA). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. Washington, DC: APHA; 2017.
11. George CM, Smith AH, Kalman DA, et al. Arsenic exposure in drinking water: an unrecognized health threat in Peru. *Bull World Health Organ*. 2014;92(8):565–72.
12. Smedley PL, Kinniburgh DG. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Appl Geochem*. 2002;17(5):517–68.
13. Tahir MA, Rasheed H, Malana MA. Method development for arsenic analysis by modification in spectrophotometric technique. *Drink Water Eng Sci*. 2012; 5:1–8.
14. Cumbal L, Montoya A, Medina E. Métodos analíticos para la determinación de arsénico en aguas. *Rev Soc Quím Perú*. 2019;85(1):96–106.
15. Ministerio del Ambiente (Perú). *Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua*. DS N.º 004-2017-MINAM. Lima: MINAM; 2017.
16. American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. Washington, D.C.: American Public Health Association; 2017.
17. National Research Council. *Water quality criteria 1986*. Washington (DC): National Academy Press; 1987. <https://www.osti.gov/biblio/5944416>.
18. Postma, D., Appelo, CAJ. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 2nd ed. London: A. Balkema Publishers; 2005.
19. Ayers RS, Westcot DW. *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Rev. 1. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1994. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/t0234e>

20. Ayers RS, Westcot DW. Water quality for agriculture. 2nd ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1985. (FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1). <https://www.fao.org/3/t0234e/t0234e00.htm>
21. Smith, AH., Lopérg, R., Mcelroy, J., Steinmaus, C. Arsenic in drinking water and cancer. *Environmental Health Perspectives*. 2003; 111(10): 1479-1486.
22. Bowen, H.J.M. *Environmental Chemistry of the Elements*. London: Academic Press; 1979.
23. Masuda H. Arsenic cycling in the Earth's crust and hydrosphere: interaction between naturally occurring arsenic and human activities. *Prog Earth Planet Sci*. 2018;5:68. <https://progearthplanet.sci.springeropen.com/articles/10.1186/s40645-018-0224-3>
24. Ramos, P., Velásquez, L., Salazar, L. Origen natural del arsénico en América Latina: un estudio sobre su distribución en las cuencas hidrográficas. *Revista de la Sociedad Geológica del Perú*. 2019;109(2):165-177.
25. Díaz W. Factores que determinan el origen de la contaminación de suelos por arsénico en la comunidad de Llacuabamba, Pataz, mediante procedimientos secuenciales y alternos [Tesis doctoral]. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos; 2020. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0334.pdf>
26. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). Resumen de Salud Pública: Arsénico (Arsenic) [Internet]. Atlanta (GA): Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública; 2007. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.pdf.
27. Garmendia, I., et al. (2019). "Residuos de plaguicidas en suelos de uso agrícola y zonas circundantes". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018849992019000200307

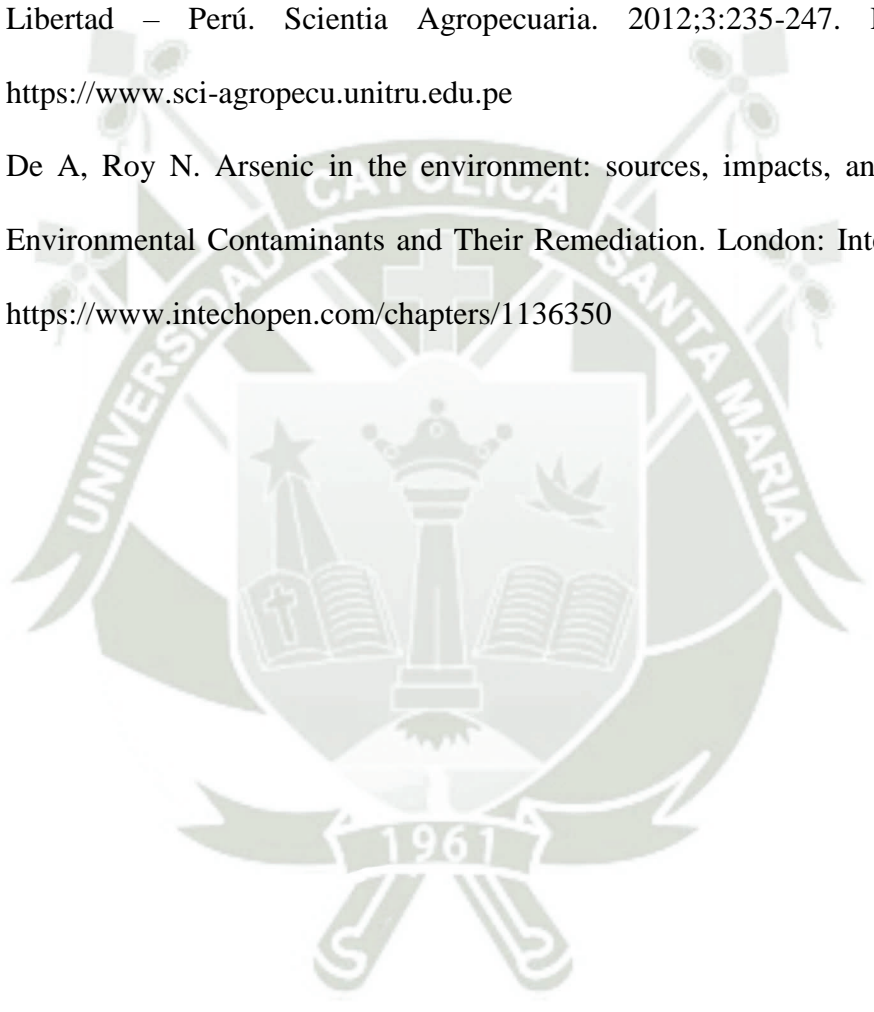
28. Rangel Montoya EA, Montañez Hernández LE, Luévanos Escareño MP, Balagurusamy N. Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. TerraLatinoam [Internet]. 2015 http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018757792015000200103&lng=es&tlng=es.
29. The Broad Scope of Health Effects from Chronic Arsenic Exposure: Update on a Worldwide Public Health Problem. Environ Health Perspect. 2013;121(3):295-302.
30. A systematic review of arsenic exposure and its social and mental health effects with special reference to Bangladesh. Publicaciones sobre salud mental y social. 2009.
31. Arsenic toxicity: sources, pathophysiology and mechanism. 2023; artículo de revision 2023.
32. Patel KS, Pandey PK, Martín-Ramos P, Corns WT, Varol S, Bhattacharya P, Zhu Y. A review on arsenic in the environment: contamination, mobility, sources, and exposure. RSC Adv. 2023 Mar 17. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/ra/d3ra00789h>
33. Universidad Autónoma de Aguascalientes. Algunos inhibidores [Internet]. Aguascalientes (Aguascalientes): Universidad Autónoma de Aguascalientes; 2017. Capítulo 9, <https://libroelectronico.uaa.mx/capitulo-9-aspectos-importa/algunos-inhibidores.html>.
34. Fatoki JO, Fatoki OS, Odendaal JP. Arsenic as an environmental and human health antagonist. Sci Total Environ. 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772416622000092>
35. Elsevier. Chemical carcinogenesis [Internet]. ScienceDirect Topics: Pharmacology, Toxicology and Pharmaceutical Science. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/chemical-carcinogenesis>

36. World Health Organization. Preventing disease through healthy environments exposure to arsenic: a major public health concern World Health Organization; 2019.
37. Acevedo Afanador LM. Remoción de arsénico en agua con ozonación y carbón activado: Universidad Autónoma Metropolitana; 2016.
<https://hdl.handle.net/11191/6923>
38. Hughes MF. Exposición al arsénico y toxicología: una perspectiva histórica. Toxicol Sci. 2011 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21750349/>
39. Dótor Almazán A, Armienta Hernández MA, Árcega Cabrera F, Talavera Mendoza O. Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México: Aplicación de isótopos estables. Rev Int Contam Ambie. 2014. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018888972014000300008
40. Carabelli F. El arsénico liberado por la megaminería. No a la Mina Esquel; 2011.
<https://noalamina.org/esquel-chubut/item/7445-el-arsenico-liberado> por la megaminería.
41. Bravo Covarrubias A, Torres E, Ayora C, Ramos Arroyo YR. Movilidad de arsénico en los sedimentos de una presa que recibe escurrimientos de minas epitermales. Rev IntContamAmbie.2020;36(4):90924. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018849992020000400797
42. Zhao FJ, McGrath SP, Meharg AA. El arsénico como contaminante de la cadena alimentaria: mecanismos de absorción y metabolismo en las plantas y estrategias de mitigación. Annu Rev Plant Biol. 2010 <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20192735/>
43. Environmental Protection Agency. National Primary Drinking Water Regulations; Arsenic and Clarifications to Compliance and New Source Contaminants Monitoring. Federal Register, 22 de enero de 2001

- <https://www.federalregister.gov/documents/2001/01/22/01-1668/national-primary-drinking-water-regulations-arsenic-and-clarifications-to-compliance-and-new-source>.
44. Agencia de Protección Ambiental (EPA). Reglamento Nacional de Agua Potable Primaria; Arsénico y Aclaraciones sobre el Cumplimiento y el Monitoreo de Contaminantes de Nuevas Fuentes; Norma Final. Registro Federal. 22 de enero de 2001;66 <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>
 45. Environmental Protection Agency. Chemical Contaminant Rules [Internet]. Washington, D.C.: US EPA, 2024 <https://www.epa.gov/dwreginfo/chemical-contaminant-rules>
 46. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias, 2017 <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>
 47. Marín Torres, Alberto Raúl. Estudio de aguas subterráneas del Río Yura, su aprovechamiento hídrico para su Parque Industrial y Zonas Urbanas, 2017. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/ab62cbcf-de1b-4396-9731-8a04f8543964/full>
 48. Municipalidad Provincial de Arequipa. Estudio hidrográfico y geográfico del río Yura. Arequipa: Municipalidad Provincial de Arequipa; 2019. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/ANAI_9168adb218ae8d28a71673c19eed139b
 49. Autoridad Nacional del Agua. Estudios básicos de la cuenca del río Yura – Arequipa: borrador del informe final. Arequipa: ANA; 2019 https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/ANAI_9168adb218ae8d28a71673c19eed139b

50. Innova Ambiental. La crisis de los botaderos en el Perú [Internet]. Lima: Innova Ambiental; 2020. Disponible en: <https://innova.com.pe/la-crisis-de-los-botaderos-en-el-peru/>
51. Pizarro J, Gómez M, Torres R. Bioaccumulation of arsenic in benthic invertebrates exposed to contaminated sediments: implications for aquatic ecosystems. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [Internet]. 2021 [citado 9 oct 2025]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34500378/>
52. Sinha S, Gupta AK. Chronic exposure to arsenic causes oxidative stress and physiological alterations in freshwater fish. *Environmental Toxicology and Pharmacology*[Internet].2015. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26657392/>
53. Christian GD. *Analytical Chemistry*. 6th ed. John Wiley & Sons; 2004.
54. Montaser A. *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*. Wiley-VCH; 1998.
55. Skoog DA, West DM, Holler FJ, Crouch SR. *Fundamentos de Química Analítica*. 9ª ed. México: Cengage Learning; 2014.
56. APA La Pampa, Laboratorio de Aguas, Método de ensayo, Determinación de Arsénico por el Método Espectrofotométrico del dietilditiocarbamato de Plata, junio 2020
57. Zhou Y, Wu F, Cai H, et al. Escalating health risk of thallium and arsenic from farmland soils irrigated by metal-smelting wastewater in southern China. *Science of the Total Environment*. 2021;761:143226. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.143226.
58. Abdel-Gawad AI, NourEldeen M, Mahmaoud H, Hamouda AS. Assessment of Emissions from Cement Plants Using AERMOD Modeling. *Appl Environ Res*. 2022;44(1):10-27. doi:10.35762/AER.2021.44.1.2

59. Smith AH, Hopenhayn-Rich C, Bates MN, Goeden HM, Hertz-Picciotto I, Duggan HM, Wood R, Kosnett MJ, Smith MT. Cancer risks from arsenic in drinking water. *Environ Health Perspect.* 1992 Jul;97:259-67. doi:10.1289/ehp.9297259.
60. Huaranga Moreno F, Méndez García E, Quilcat León V, Huaranga Arévalo F. Contaminación por metales pesados en la cuenca del río Moche, 1980–2010, La Libertad – Perú. *Scientia Agropecuaria.* 2012;3:235-247. Disponible en: <https://www.sci-agropecu.unitru.edu.pe>
61. De A, Roy N. Arsenic in the environment: sources, impacts, and solutions. In: *Environmental Contaminants and Their Remediation.* London: IntechOpen; 2023. <https://www.intechopen.com/chapters/1136350>



ANEXOS.

EVIDENCIAS FOTOGRÁFICAS



Recolección de la muestra.



Muestras recolectadas.



Secado del filtro absorbedor.



Soluciones preparadas.



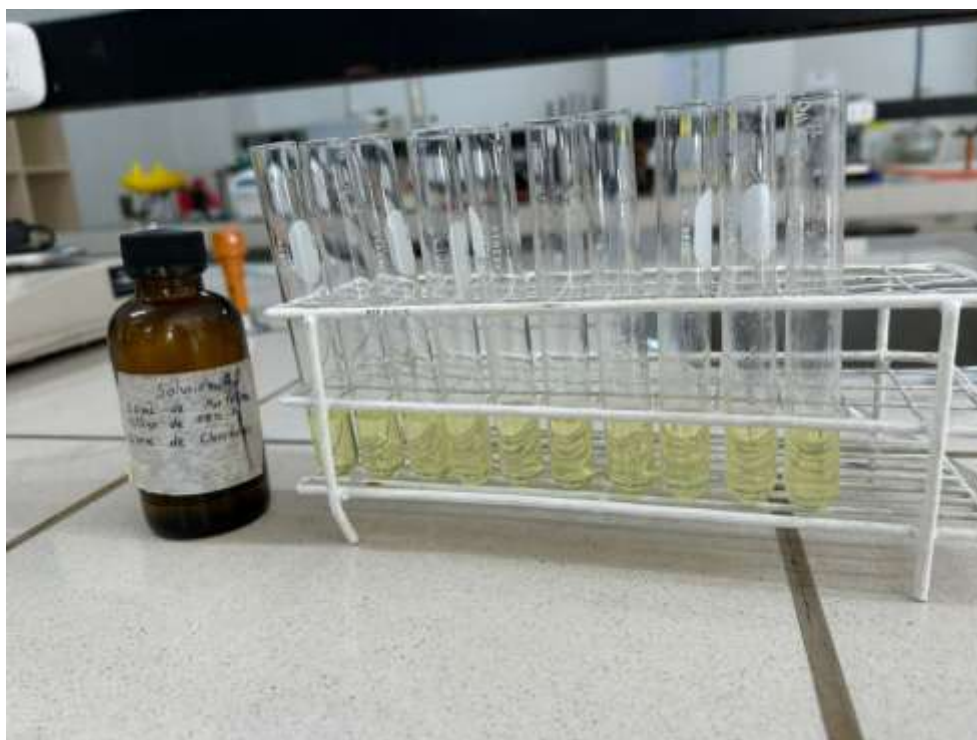
Preparación de la solución Dietilditiocarbamato- Morfolina en Cloroformo.



Equipo armado con la muestra.



Equipo reaccionando en la campana de extracción.



Blanco medido 10 veces para determinar el LoQ y LoD.



Espectrofotómetro usado.



Certificate of Analysis

8.06127.0100 Morpholine for synthesis
Batch S8532327

	Batch Values	
Assay (GC, area%)	99.9	% (a/a)
Density (d 20 °C/ 4 °C)	1.000	
Water (K. F.)	< 0.10	%
Identity (IR)	passes test	

Date of examination (DD.MM.YYYY) 04.04.2024
Minimum shelf life (DD.MM.YYYY) 30.04.2029

Dr. Jörg Bauer
Responsible laboratory manager quality control

This document has been produced electronically and is valid without a signature.

Supelco.

www.sigmaaldrich.com

Certificate of Analysis – Certified Reference Material

Certipur® Arsenic standard solution 1000 mg/l As

Producer: Merck KGaA, Frankfurter Str. 250, 64293 Darmstadt, Germany
Product no.: 1.19773.0100
Lot no.: HC44404373
Description of CRM: Arsenic standard solution 1000 mg/l As
Expiry date: 2028/02/29
Storage: +15°C to +25°C tightly closed in the original container
Composition: H₃AsO₄ in HNO₃ 0.5 mol/l

Analyte	Certified value as mass fraction	Associated uncertainty, $U=k \cdot u$ ($k=2$) as mass fraction
As	985 mg/kg	± 8 mg/kg

Metrological traceability: Directly traceable to NIST SRM 3103a, lot 100818
Measurement method: Inductively coupled plasma optical emission spectrometry ICP-OES
Intended use: This reference material is intended for use as a calibration standard in element analysis.
Instructions for handling and correct use: Shake well before use and never pipet directly from the original container. See Details for correct use on page 2.
Health and safety information: Please refer to the Safety Data Sheet for detailed information about the nature of any hazard and appropriate precautions to be taken.
Accreditation: Merck KGaA, Darmstadt, Germany is accredited by the German accreditation authority DAkkS as registered reference material producer D-RM-15185-01-00 in accordance with ISO 17034.
Certificate issue date: 2024/03/13



ISO 17034



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-RM-15185-01-00

CRM released by Approving Officer
or delegate of Quality Control

A. Yildirim

Dipl.-Ing. Ayfer Yildirim
Responsible Laboratory Manager

Merck KGaA, Corporation with General Partners, Frankfurter Straße 250, 64293 Darmstadt, Germany
 EMD Millipore Corporation, 400 Summit Drive, Burlington MA 01803, USA, Phone: +1-978-715-4321
 MilliporeSigma Canada Ltd., 2149 Winston Park Dr, Oakville, Ontario, L6H 6J8, Canada,
 Phone: +1 800-565-1400

Certificate Page 1 of 2

Certificate version 01





Certificate of Analysis

1.01515.0005 Silver diethyldithiocarbamate for analysis EMSURE® Reag. Ph Eur
Batch CN23015715

	Spec. Values		Batch Values	
Purity (DSC (differential scanning calorimetry))	≥ 99	%	100	%
Identity (IR-spectrum)	passes test		passes test	
Appearance			GRÜNLICHGELB	
Appearance (description)	passes test		fine powder	
pH-value (aqueous suspension)	5.0 - 6.5		5.8	
Nitrate (NO ₃)	≤ 0.01	%	≤ 0.01	%
Loss on Drying (105 °C)	≤ 0.5	%	0.2	%

Date of release (DD.MM.YYYY) 17.01.2024
Minimum shelf life (DD.MM.YYYY) 31.01.2027

Dr. Pascal Patschinski
Responsible laboratory manager quality control

This document has been produced electronically and is valid without a signature.

Merck KGaA
Corporation with General Partners
Frankfurter Straße 250
64293 Darmstadt, Germany

The life science business of Merck KGaA, Darmstadt,
Germany operates as MilliporeSigma in the U.S. and
Canada.

Page 1 of 1

SALSA Version 1369282/990001061927// Date: 17.01.2024