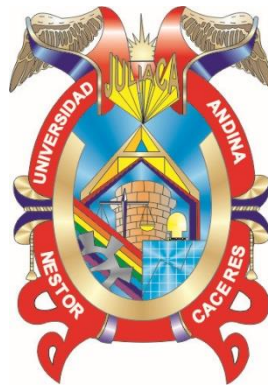




UNIVERSIDAD ANDINA
NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL



**EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE
EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL
RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE**

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL

JULIACA - PERÚ

2025



UNIVERSIDAD ANDINA

NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

**EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE
EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL
RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE**

TESIS PRESENTADA POR:

Bach. DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL

APROBADA POR EL JURADO REVISOR:

PRESIDENTE


: _____
Mgtr. FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES

PRIMER MIEMBRO


: _____
M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA

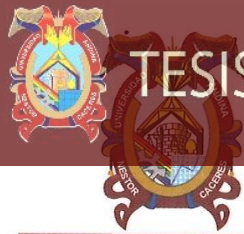
SEGUNDO MIEMBRO


: _____
Mgtr. WILFREDO DAVID SUÑO PACORI

ASESOR DE TESIS


: _____
Dr. ARNALDO YANA TORRES

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN : SANEAMIENTO AMBIENTAL – P22



RESOLUCIÓN DECANAL N° 494-2025-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 19 de junio del 2025

VISTO: El expediente N° 2025- CU-4319 presentado por el (la) Bachiller: **DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA** estudiante de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN**.

CONSIDERANDO:

Que, el (la) Bach. **DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA**, quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN** de la Tesis Titulado: **EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE**, la misma que pertenece a la línea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en concordancia con el dictamen de similitud.

De conformidad al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 24, Art. 28 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO. - **APROBAR**, la **NOMINACIÓN DE JURADOS** integrado por los siguientes docentes:

- * **Presidente** : Mgtr. FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES
- * **1er Miembro** : M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA
- * **2do Miembro** : Mgtr. WILFREDO DAVID SUPO PACORI

ARTICULO SEGUNDO. - **RECONOCER** como asesor de la investigación (tesis) de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras al (a la) docente, **Dr. ARNALDO YANA TORRES**.

ARTICULO TERCERO. - **APROBAR**, la **FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS** de el (la) bachiller: **DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA**; del informe final de la investigación (tesis) titulado: **EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental**. de acuerdo al siguiente detalle:

- * **FECHA** : Miércoles 25 de junio del 2025
- * **HORA** : 08:30 horas
- * **LUGAR** : Aula 306 - Pabellón de Hidraulica

ARTÍCULO CUARTO. - **DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y Cs. PURAS

M. F. WALTER J. LIZARRAGA ARMAZA
DECANO (e)
CIP. 70808



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y Cs. PURAS

Dr. Fritz Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.
Archivo
interesado (a)

**RESOLUCIÓN DECANAL N° 243-2025-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 05 de mayo del 2025

VISTO: El expediente N° 2025-CU - 1175 por el señor (a): **DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA** quien solicita **REVISIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (borrador de tesis)**, el PROVEIDO - N° 146 - 2025-UI-FICP-UANCV/J, y la **FICHA DE OPINIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACION (BORRADOR DE TESIS)** formato N° 001 - 2025 del integrante del comité de investigación EPISA de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): **DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA**, ha presentado su informe final de la investigación (borrador de tesis) Titulado: **EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación Mgtr. **Franz Joseph Barahona Perales** de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión del informe final de la investigación (borrador de tesis) formato N° 001 - 2025 **aprobando** el informe final de la investigación (borrador de tesis) titulado: **EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE**, Correspondiente a la línea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducentes a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y estando a la opinión favorable del comité de investigación respecto al informe final de la investigación (borrador de tesis).

Estando, con la opinión favorable del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 27 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, el **INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)**, para la **REVISIÓN DE SIMILITUD TURNITIN**, presentado por el señor (a): **DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental, con el Tema Titulado: **EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE** correspondiente a la línea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL**, en virtud a los considerandos expuestos.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RATIFICAR como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** al (a) la), **Dr. ARNALDO YANA TORRES**.

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y Cs. PURASDr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA
DECANO (e)
CIP. 32730UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURASDr. Frita Willy Mamani Apaza
DIRECTOR
UNIDAD DE INVESTIGACIÓNcc.
Archivo
interesado (a)



RESOLUCIÓN DECANAL N° 1666-2024-D-UI-FICP-UANCV

Juliaca, 05 de diciembre del 2024

VISTO: El expediente N° 2024-CU- 17143, presentado el señor (a) **DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA** solicitando **APROBACIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** el **PROVEIDO - N° 1438 -2024-UI-FICP-UANCV/J**, y la **FICHA DE OPINIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** formato N° 164-2024 del integrante del comité de investigación **EPISA** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

CONSIDERANDO:

Que, el señor (a): **DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA** ha presentado su propuesta de investigación Titulado: **EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **Mgtr. Franz Joseph Barahona Perales** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión de la propuesta de investigación formato N° 164-2024- aprobando la propuesta de investigación titulado: **EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE**.

Que, es requisito indispensable contar con un asesor docente ordinario y/o contratado de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras con un mínimo de cinco años de docencia, grado de doctor o magister y experiencia en la línea a investigar, o deberá estar acreditado por Resolución 0989-2022-UANCV-CU-R, quien asumirá como asesor de la propuesta de investigación, según el área o grado.

Estando, con la opinión favorable de la propuesta de investigación del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 25 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR, la **PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN**, presentado por el señor (a): **DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental, con el Tema Titulado: **EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE** correspondiente a la línea de investigación **SANEAMIENTO AMBIENTAL**.

La misma que deberá proceder con la ejecución de la propuesta de Investigación aprobado de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales.

ARTÍCULO SEGUNDO.- RECONOCER como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** de al (a la) docente **Dr. ARNALDO YANA TORRES**.

ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y Cs. PURAS

.....
Dr. MILTON QUISPE HUANCA
DECANO
CIP. 47790

cc.
Archivo 2024
Interesado (a)



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

.....
Dr. Efraim Parillo Sosa
Dir. de la UI
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORCIÓN PARA LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS


1	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	2%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	tesis.unap.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.uancv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	revistas.unbosque.edu.co Fuente de Internet	<1%
8	upc.aws.openrepository.com Fuente de Internet	<1%



Metadatos complementarios

Título de la Tesis	
EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE	
Datos de autor	
Nombres y apellidos	DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75929891
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0006-9458-7843
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	ARNALDO YANA TORRES
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	41414676
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-6740-5024
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02442876
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01323821
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	WILFREDO DAVID SUPO PACORI
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02428673



Datos de investigación	
Línea de investigación	Saneamiento Ambiental – P22
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	<p>País: Perú Departamento: Puno Provincia: Melgar Distrito: Ayaviri Sector: Sucre RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE Coordenadas: Latitud: -15.5848004 Longitud: -70.1263172 URL Maps https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?mid=12XYjKpOo-lxQ1CFCnAHKsPS8y84d1jA&usp=sharing</p> 
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Diciembre 2024 – Junio 2025
URL de disciplinas OCDE https://concytec-pe.github.io/Peru-CRIS/vocabularios/ocde_ford.html Librería	<p>Ingeniería ambiental https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.00</p> <p>Ciencias del medio ambiente https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08</p>



UNIVERSIDAD NACIONAL "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
 FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
 Dr. Fritz Willy Mamani Apaza
 DIRECTOR
 UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA, identificado con DNI Nro. 75929891, en mi condición de egresado de:

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

INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

informo que he elaborado el/la **Tesis** o **Trabajo de Investigación**, **Trabajo Académico** denominada:
EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE

Asesorado por: Dr. ARNALDO YANA TORRES

Es un tema original.

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

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

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

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Juliaca 04 de Julio del 2025

Firma del Asesor
(obligatoria)

Firma del Estudiante
(obligatoria)



Huella



DEDICATORIA

Este proyecto de grado se la dedico a mis padres, que siempre han sido mi inagotable fuente de cariño y apoyo incondicional. Su sacrificio y dedicación ha sido el impulso detrás de este logro importante para mí.

A mis hermanos y amigos, que aportaron desinteresadamente su juicio y experiencia; también a todos los que me han apoyado en estos últimos meses con sus consejos y orientaciones.



AGRADECIMIENTO

A Dios, mi guía y fortaleza, quien me ha acompaña en todo momento, siendo esa luz que ilumina mi camino con humildad y gratitud.

A la UANCV y a la EPISA por ofrecerme un ambiente de aprendizaje acogedor y accesible para mi desarrollo profesional.

A mi director de tesis, Mgtr. Franz Joseph Barahona Perales, por su orientación y apoyo constante en todo este proceso. Su experiencia y dedicación fueron esenciales para el éxito de este trabajo.

Al Dr. Arnaldo Yana Torres, por su asesoramiento experto. Sus comentarios críticos y sugerencias mejoraron significativamente la calidad de esta tesis.



ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Análisis de la situación problemática	1
1.2. Planteamiento del problema	3
1.2.1. Problema General.....	3
1.2.2. Problemas Específicos	3
1.3. Objetivos de la Investigación	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. Justificación	4
1.4.1. Justificación social.....	4
1.4.2. Justificación económica.....	5



1.4.3. Justificación tecnológica.....	6
1.5. Hipótesis.....	6
1.5.1. Hipótesis general.....	6
1.5.2. Hipótesis específicas.....	6
1.6. Variables.....	7
1.6.1. Variable independiente.....	7
1.6.2. Variable dependiente.....	7
1.6.3. Operacionalización de variables.....	7

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio.....	8
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	8
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	11
2.1.3. Antecedentes Locales.....	14
2.2. Base teórica de la investigación.....	16
2.2.1. El Agua.....	16
2.2.2. Contaminación del agua superficial.....	18
2.2.3. Contaminación del agua por metales pesados.....	19
2.2.4. Contaminación del agua por actividades mineras.....	20
2.2.5. Impactos de la minería en el agua.....	23
2.2.6. La aplicación judicial del derecho ambiental.....	25



2.2.7. El mercurio 26

2.2.8. Las zeolitas 36

2.2.9. Adsorción como método de remoción 45

2.2.10. Eficiencia en la remoción de contaminantes 47

2.2.11. Marco legal de la calidad del agua 48

2.2.12. Difracción de rayos X 50

2.2.13. Espectrofotometría de adsorción atómica 52

2.3. Marco Conceptual..... 54

2.3.1. Criterio de la calidad del agua 54

2.3.2. Estándar de calidad ambiental para agua 54

2.3.3. Contaminación del agua..... 54

2.3.4. Muestra puntual..... 54

2.3.5. Efluente líquido de actividades minero-metalúrgicas..... 54

2.3.6. Bioacumulación 55

2.3.7. pH..... 55

2.3.8. Adsorción 55

2.3.9. Metal pesado..... 55

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Diseño de investigación..... 56

3.2. Tipo de investigación 56



3.3. Enfoque de la investigación 57

3.4. Nivel de investigación 57

3.5. Diseño estadístico 58

3.6. Población y muestra 58

 3.6.1. Población..... 58

 3.6.2. Muestra 58

3.7. Técnica e instrumentos..... 59

3.8. Lugar de estudio 60

3.9. Procedimiento metodológico 61

 3.9.1. Recolección de muestras de material zeolítico 62

 3.9.2. Análisis en laboratorio del material zeolítico..... 65

 3.9.3. Recolección de muestras de agua del río Llallimayo sector Sucre 69

 3.9.4. Determinación de la eficiencia en la remoción de mercurio 82

 3.9.5. Estadísticos utilizados en el análisis de datos 83

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados..... 84

 4.1.1. Análisis mineralógico a través del método de difracción de Rayos X..... 84

 4.1.2. Determinación de la concentración de mercurio y otros parámetros..... 85



4.1.3. Determinación de la remoción de mercurio con el material zeolítico.....	86
4.1.4. Determinación de la eficiencia en la remoción de mercurio con el material zeolítico.....	94
4.2. Análisis estadístico	97
4.3. Discusiones	102
CONCLUSIONES	109
RECOMENDACIONES	110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
ANEXOS	121



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Operacionalización de variables.....	7
Tabla 2	Vertientes hidrográficas del Perú	17
Tabla 3	Precios de los minerales en el mercado mundial	20
Tabla 4	Desempeño ambiental: La visión de los actores	23
Tabla 5	Características del drenaje ácido de mina e impactos ambientales ..	24
Tabla 6	Propiedades físicas y químicas del mercurio	26
Tabla 7	Vida media biológica para los múltiples tipos de mercurio	30
Tabla 8	Toxicología del mercurio	32
Tabla 9	Principales tipos de zeolitas naturales	37
Tabla 10	ECA para agua –Categoría 3.....	50
Tabla 11	Factores de influencia en la de remoción de mercurio.....	58
Tabla 12	Materiales, equipos y reactivos empleados en la investigación	59
Tabla 13	Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo de material zeolítico.....	62
Tabla 14	Manejo de las muestras de agua según el parámetro a evaluarse..	70
Tabla 15	Metodologías de análisis para los parámetros de interés	74
Tabla 16	Matriz del diseño experimental.....	75
Tabla 17	Diseño factorial 2 ³ con interacciones	76
Tabla 18	Tabla del análisis de varianza	78
Tabla 19	Composición mineralógico del material zeolítico	84
Tabla 20	Concentración de mercurio y otros parámetros.....	85
Tabla 21	Porcentaje de remoción por tratamiento	86
Tabla 22	Matriz de efectos principales	88
Tabla 23	Análisis de varianza de la remoción de mercurio.....	93



Tabla 24	Porcentaje de remoción por tratamiento	94
Tabla 25	Información del factor	96
Tabla 26	Análisis de varianza para la eficiencia en la remoción de mercurio .	96
Tabla 27	Pruebas simultáneas de Tukey para incompatibilidades de las medias.....	97
Tabla 28	Estadísticas descriptivas de la prueba de hipótesis general	98
Tabla 29	Prueba de T-student para la hipótesis general.....	98
Tabla 30	Estadísticas descriptivas de la prueba de hipótesis específico 1	99
Tabla 31	Prueba de T-student para la hipótesis específico 1	100
Tabla 32	Concentración de mercurio y la comparación con el ECA para agua.....	101
Tabla 33	Estadísticas descriptivas de la prueba de hipótesis específico 3...	101
Tabla 34	Prueba de T-student para la hipótesis específico 3.....	102



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ámbito de influencia de la vertiente del Titicaca y ubicación de las estaciones hidrométricas	18
Figura 2 Crecimiento del PBI 2019-2021.....	21
Figura 3 Ciclo del mercurio.....	28
Figura 4 Proceso LADME para el mercurio	31
Figura 5 Biotransformación del mercurio en los ríos	33
Figura 6 Distribución de especies de Hg (II) en función del pH.....	34
Figura 7 Diagrama de Eh-pH del mercurio	35
Figura 8 Unidad estructural básica de las zeolita	36
Figura 9 Modos de aparición de las zeolitas naturales y profundidades aproximadas.....	41
Figura 10 Esquema del proceso de adsorción.....	46
Figura 11 Eficiencia de remoción expresada como valor relativo	47
Figura 12 Características básicas de un difractor de rayos X y la Ley de Bragg.....	51
Figura 13 Espectrofotómetro de absorción atómica básico	53
Figura 14 Ubicación del lugar de estudio o población.....	60
Figura 15 Mapa morfoestructural de los cuadrángulos de Puno y Ácora.....	61
Figura 16 Diagrama para la recolección de muestras de material zeolítico ...	63
Figura 17 Afloramientos de material zeolítico y su recolección	63
Figura 18 Diagrama para el análisis mineralógico del material zeolítico.....	66
Figura 19 Análisis de la composición mineralógica en laboratorio.....	67
Figura 20 Diagrama para el muestreo de agua del río Llallimayo, sector Sucre.....	71



Figura 21	Muestreo de agua del río Llallimayo, sector Sucre	72
Figura 22	Diagrama para la determinación de la remoción de Hg	79
Figura 23	Determinación de la cantidad de remoción de Hg	80
Figura 24	Remoción de mercurio.....	88
Figura 25	Grafica de efectos más relevantes para la remoción de mercurio .	89
Figura 26	Grafica de interacciones para la remoción de mercurio.....	90
Figura 27	Grafica de Pareto para la remoción de mercurio	92
Figura 28	Grafica de suministro normal y tendencia de datos	95



RESUMEN

El estudio tiene como propósito analizar la eficiencia del material zeolítico del C.P. de Llungo como un material con la capacidad de adsorción de Hg en agua cruda, específicamente del río Llallimayo sector Sucre; con la influencia de 03 factores (Tamaño de partícula, pH y Tiempo de contacto). Siendo de naturaleza experimental, con un enfoque cuantitativo orientada al tipo aplicada y con un diseño factorial 2^k para el análisis de los factores. Donde la muestra está representada por 25 L de agua superficial tomando en cuenta la RJ N° 010-2016-ANA y 06 muestras compuestas de un 1Kg de material zeolítico teniendo en consideración el DS N° 002-2013-MINAM. Para el análisis mineralógico del material zeolítico se empleó la técnica de DRX en polvo en el Laboratorio de Yacimientos Minerales de la EPIG-UNAP y las concentraciones de mercurio mediante la técnica de espectrofotometría de adsorción atómica en el Laboratorio de la EPISA-UANCV, además de la T°, pH y turbidez. Dando como resultados que la presencia de CaCO_3 es cuantiosa en la muestra de material zeolítico además de presentar cuarzo y feldespatos como minerales acompañantes, así mismo el contenido de Hg en el río Llallimayo sector Sucre es de 0.00342 mg/L presentando también una T° de 13.7 °C, pH 7.44 y una turbidez de 35.7 NTU. Además, en los tratamientos realizados se observa que el factor "tiempo de contacto" es el más influyente seguido del "pH", logrando una máxima eficiencia en la remoción de Hg de un 80.41%. Concluyendo que la eficiencia es aceptable, puesto que se logra cumplir el ECA para agua "categoría 3-D1".

Palabras Clave: Adsorción, zeolita natural, remoción, mercurio.



ABSTRACT

The purpose of the study is to analyze the efficiency of the zeolitic material of the C.P. Llungo as a material with the capacity to adsorb Hg in raw water, specifically the Llallimayo river from Sucre sector, with the influence of three factors (particle size, pH and contact time). It is experimental in nature, with a quantitative approach oriented to the applied type and with a 2^k factorial design for the analysis of the factors. Where the sample is represented by 25 L of surface water taking into account the RJ N° 010-2016-ANA and 06 samples composed of a 1 Kg of zeolitic material taking into consideration the DS N° 002-2013-MINAM. For the mineralogical analysis of the zeolitic material, the powder XRD technique was used at the Mineral Deposits Laboratory of the EPIG-UNAP and the mercury concentrations were determined using the atomic adsorption spectrophotometry technique at the EPISA-UANCV Laboratory, in addition to T°, pH and turbidity. The result show that the presence of CaCO₃ is high in the sample of zeolitic material in addition to the presence of quartz and feldspars as accompanying minerals, likewise the Hg content in the Llallimayo river in the Sucre sector is 0.00342 mg/L, also presenting a T° of 13.7 °C, pH 7.44 and a turbidity of 35.7 NTU. In addition, it is observed that the "contact times" factor is the most influential, followed by "pH", achieving a maximum Hg removal efficiency of 80.41%. Concluding that the efficiency is acceptable, since the ECA for "category 3-D1" water is met.

Keywords: Adsorption, natural zeolite, removal, mercury.



INTRODUCCIÓN

El agua es un componente que se encuentra en gran parte de la corteza terrestre; pese a su cantidad no es un recurso de disponibilidad plena para actividades agrícolas y para el consumo humano; es más, su calidad tiene un importancia ecológica esencial para la salud y el desarrollo económico (Villena, 2018). En el Perú del total de agua dulce que discurre en la superficie (alrededor de 20 millones de m³/año), el 2% es empleado por la minería teniendo al agua como un insumo básico para el procesamiento de minerales, el 18% se destina al uso poblacional e industrial y el 80% restante es aprovechado por la agricultura (Guevara, 2008).

Desde hace unos años, la economía peruana ha presentado un incremento significativo, está principalmente inducido por el capital privado y en consecuencia el desarrollo acelerado de las actividades extractivas; generando a la vez varios escenarios de conflicto relacionado a la afectación de recursos naturales como el suelo y agua. Regularmente estas empresas mineras buscan desarrollarse en zonas ricas en yacimientos minerales, que casualmente la mayoría se ubican en territorio alto andino; donde las cuencas hidrográficas presentan cabeceras o nacientes de ríos. Estos lugares generalmente pertenecen a comunidades campesinas, donde sus actividades económicas principales dependen del aprovechamiento de la tierra y del empleo del agua como recurso productivo (Castro, 2011).

Es el caso de Arasi, siendo esta parte de las operaciones mineras de Aruntani S.A.C., ubicado en la parte alta de la subcuenca Llallimayo, en el distrito de Ocuwiri de la región de Puno. Donde los pobladores de la zona de



influencia del proyecto minero Arasi, vienen siendo afectados por la variación del color de las aguas y mortandad de animales; afectando áreas agropecuarias de la jurisdicción de Melgar; que reúne a los distritos de Llalli, Cupi, Humachiri y Ayaviri (Figueroa, 2022).

Planteándose así esta investigación; buscando poner en práctica un tratamiento alternativo en la remoción de Hg en aguas del río Llallimayo del sector de Sucre; buscando conocer la eficiencia del uso de zeolita natural como material adsorbente. Ya que este, tiene como principales ventajas la remoción de una amplia variedad de metales pesados, la no generación de lodos, posibilidad de restaurar el material y su costo mínimo de producción (Caviedes et al., 2015; Curi et al., 2006).

Dividiéndose este trabajo de investigación del subsiguiente modo: El Capítulo I, se formula el planteamiento del problema, los objetos, las justificaciones, las hipótesis y las variables necesarias para esta investigación. El Capítulo II, se contextualiza los antecedentes, el marco teórico y conceptual, que son los conocimientos necesarios. El Capítulo III, se hace mención de la metodología empleada para alcanzar cada uno de los objetivos formulados, como también los instrumentos, materiales, reactivos y equipos utilizados en la etapa de campo y laboratorio. El Capítulo IV, muestra los resultados obtenidos comparándolas e interpretándolas con otras investigaciones en el apartado de las discusiones. Finalmente, el Capítulo V se contrasta toda la investigación a través de las conclusiones llegadas y se redacta las recomendaciones para investigaciones venideras.



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Análisis de la situación problemática

En Latinoamérica la minería representa una palanca para el crecimiento económico por presentar una relevante contribución al PIB, siendo vista como necesaria y sinónimo de riqueza; sin embargo pese al apoyo gubernamental, estos territorios vienen padeciendo deterioro ambiental; acompañado de un gran número de denuncias por la población afectada por actividades mineras (Muñoz-Duque et al., 2020). En el Perú, esta industria extractiva rivaliza en el uso del agua con otras diligencias como la agricultura, ganadería y la ingesta humana; ocurriendo que en la mayoría de casos devuelve este recurso contaminado con metales pesados, donde la población se ha acostumbrado a convivir con sus efectos (Fernández et al., 2013).

Es así que el problema de estos contaminantes derivados de la minería radica en la duración de permanencia que tiene en el medio natural, aumentando de esta forma el tiempo de exposición y riesgo de propagarse en otros medios (Orbe, 2021). Siendo la mayor parte de las repercusiones el deterioro de la calidad de los ríos y demás cursos hídricos; causado por el drenaje ácido de



mina "DAM" (Guevara, 2008). A su vez, lo que empeora su peligrosidad y su potencial como generador de contaminación de este, es su mal manejo; debido a que el riesgo proviene tanto del modo en que se le gestiona y de la toxicidad elevada de sus elementos (As, Cu, Cd, Zn, Pb, Se, Hg, Cr, y otros) (Menéndez & Muñoz, 2021). Sumado su alta movilidad llegan a contaminar efluentes, ríos y ecosistemas enteros, como en la cuenca alta del río Santa Rosa (Angamarca & Valarezo, 2020).

Hoy en día la literatura reporta una amplia variedad de métodos para la remoción de estos elementos nocivos del agua; como la adsorción con carbón activado, ultrafiltración, coprecipitación, electrodeposición, intercambio iónico, coagulación con sales de Al y Fe, e incluso procesos biológicos. Sin embargo su eficacia en el tratamiento proporcionado pende tanto de la naturaleza química y la concentración inicial del contaminante, así como la presencia de otros componentes en las aguas que pueden interferir en el proceso (Patterson & Stein, 1997). Analizándolos se evidencia también más percances en el empleo de estos métodos; como los altos costos, la baja eficiencia en aguas con demasiada turbiedad o tiempos largos en el tratamiento, inclusive en algunos métodos se necesita de un personal capacitado.

Por tanto el empleo de la zeolita natural como tratamiento alternativo se hace interesante, ya que muestra una elevada eficacia en la eliminación de metales pesados, con fácil empleo y acceso (Loya, 2022). Actualmente al NW del C.P. de Llungo del distrito de Atuncolla, cuenta con afloramientos de este material. En ese contexto se formula esta investigación, dado que en la provincia de Melgar - Puno se encontró la presencia de Pb, Cd y Hg en leche y pelo de



vacas, en muestras recolectadas de los distritos de Umachiri y Llalli. En la que los pastos son regados con agua del río Llallimayo; aguas que son influenciadas por la mina Arasi, de la empresa Aruntani S.A.C. (Pacco, 2018). Ante ello, los pobladores del distrito de Llalli-zona Sucre y demás; estarían expuestos a un serio problema de contaminación por Hg. Puesto que una parte de esas mismas aguas es represada por una bocatoma y distribuida para riego a través de la irrigación Canal N (Cano & Atajo, 2019). Más aun, que esta subcuenca Llallimayo tras haber sido declarado en estado de emergencia en el año 2021 (Figueroa, 2022); sus aguas actualmente sigue mostrando una coloración fuera de lo normal.

1.2. Planteamiento del problema

a) Problema general

- ¿Cuál es la eficiencia de la zeolita como material adsorbente en la remoción de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre?

b) Problemas específicos

- ¿Cuál es la composición mineralógica del material zeolítico que se encuentra al NW del centro poblado de Llungo?
- ¿Cuál será la concentración de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre?
- ¿Qué tanto es la remoción de mercurio después de realizar el tratamiento con zeolita, con la influencia de 03 factores: tiempo de contacto, pH y tamaño de partícula?



1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. *Objetivo General*

Analizar la eficiencia de la zeolita como material adsorbente en la remoción de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

- Determinar la composición mineralógica del material zeolítico localizado al NW del C.P. de Llungo.
- Determinar la concentración de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre.
- Determinar la cantidad de remoción de mercurio después de realizar el tratamiento con zeolita, con la influencia de 03 factores (tiempo de contacto, pH y tamaño de partícula).

1.4. Justificación

1.4.1. *Justificación social*

Por lo general en los países en desarrollo las empresas mineras permanecen indiferentes ante el deterioro ambiental, y a menudo generadas por ellas mismas; y estas en ciertos casos son resguardadas por la falta de rigor y aplicabilidad de la legislación medioambiental o el total desinterés de los gobiernos ante estos problemas (Sarmiento et al., 1980). Solo obteniendo atención de las autoridades cuando se generan contextos de conflictos graves entre la empresa y los afectados, que entorpecen la continuidad de las labores mineras (Muñoz-Duque et al., 2020). Situación observada en la subcuenca Llallimayo, que actualmente mantiene un escenario de conflicto latente, a causa de la contaminación de los ríos por las diligencias de la mina Arasi de la empresa Aruntani S.A.C. (Figuroa, 2022). Afectando principalmente la zona



agropecuaria de los distritos de Ayaviri, Cupi, Llalli y Humachiri de la jurisdicción de Melgar; pues esta provincia es reconocida como "La Capital Ganadera del Perú" (Figuroa, 2022).

En tal sentido, al evaluar la eficiencia de la zeolita natural del C.P. de Llungo como material adsorbente, se podría ofrecer una opción para reducir contaminantes como el mercurio en el flujo del río Llallimayo sector Sucre. Así pudiendo mejorar la calidad de agua de este sector como de las comunidades aledañas, así esta forma mitigar los efectos generados por la mala minería y asegurar el bienestar de esas familias.

1.4.2. Justificación económica

La contaminación de la subcuenca Llallimayo, no únicamente representa un problema ambiental; sino también un impedimento significativo para el crecimiento económico del sector Sucre y las comunidades aledañas. Ya que la degradación de tierras y la contaminación del agua puede ocasionar un ciclo de pobreza; mediante la pérdida de ingresos producidos por la agricultura y la ganadería (Ofosu et al., 2020). Ya que en el departamento de Puno en el ámbito rural, la pobreza monetaria está sujeto notablemente del número de hectáreas de tierra y parcelas que posea el poblador (Paredes & Escobar, 2018).

En ese contexto, la implementación de métodos basados en materiales accesibles como el material zeolítico del C.P. de Llungo; podría representar una alternativa asequible frente a métodos convencionales de remoción de metales pesados que suelen requerir altos costos de infraestructura como el de mantenimiento; y así empezar a usar nuestros propios recursos naturales para



mitigar los perjuicios de la contaminación en los ríos con influencia de actividades mineras.

1.4.3. Justificación tecnológica

El estudio puede impulsar el desarrollo de tecnologías en el tratamiento de aguas contaminadas con mercurio; basadas en el material zeolítico del C.P. de Llungo. De modo que es una alternativa y a la vez fomenta la aplicación en contextos locales como el sector Sucre, donde notoriamente se observa el cambio de color de sus aguas, la presencia de sedimentos finos y la ausencia de peces. Promoviendo así una alternativa sostenible y por su puesto amigable con el medioambiente.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

- El empleo de la zeolita como material adsorbente es eficaz para la remoción de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre.

1.5.2. Hipótesis específicas

- La composición mineralógica del material zeolítico del centro poblado de Llungo, incide en la remoción de mercurio en agua.
- La concentración de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre, supera los Estándares de Calidad Ambiental para agua.
- La cantidad de remoción de mercurio después de realizar el tratamiento con zeolita es influenciada por 03 factores (tiempo de contacto, pH y tamaño de partícula).



1.6. Variables

1.6.1. Variable independiente

Zeolita como material adsorbente.

1.6.2. Variable dependiente

Remoción de mercurio.

1.6.3. Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Dimensiones	Indicador	Índice	Tipo
Independiente	Tiempo de contacto	Tiempo	Minutos	Discreta
	Acidez del agua	pH	pH	Continua
	Tamaño de partícula (ZN)	Tamaño	mm	Discreta
Dependiente	Cantidad de remoción de mercurio	Concentración de mercurio	mg/L	Continua

Nota. Cronómetro para determinar el tiempo, multiparámetro para medir el pH, tamices para determinar el tamaño de partícula y espectrofotómetro de adsorción atómica para determinar la concentración de mercurio; ZN (zeolita natural).



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Ugrina et al., (2020) en Nueva Zelanda; investigaron la influencia del pH, relación sólido/liquido (S/L), tiempo de contacto y contenido inicial; sobre la eficiencia de sorción en dos zeolitas (clinoptilolita natural y modificada con hierro) hacia iones de Hg (II). La muestra de partida zeolita natural (NZ), se recogió del depósito de Zlatokop; muestra que se molió, tamizó y se separó una fracción de tamaño de partícula de 0.6 a 0.8 mm. Posteriormente la muestra se enjuagó en agua ultrapura y secada a 60°C. Para la caracterización físico-química detallada de la NZ y FeZ se realizó por el técnica de XRPD en polvo para el análisis de composición química y área de superficie específica, además de microscopia electrónica de barrido-Rayos X por energía disgregadora (SEM-EDS), TG-DTG y análisis FTIR. Para las concentraciones de Hg (II) antes y después de los experimentos, se determinaron utilizando un espectrofotómetro de adsorción atómica de llama. Teniendo como resultados que la composición mineralógica de la zeolita natural era principalmente clinoptilolita con cuarzo, feldespato y



carbonatos como minerales acompañantes, así como también se observó que la sorción de Hg (II) era altamente sensible al efecto del pH y la relación S/L, especialmente en FeZ, además se encontró que a un pH = 2 y S/L = 10 g/L eran óptimos para ambas zeolitas, siendo la cantidad máxima de 0.28 mmol/g adsorbido para la zeolita natural y 0.54 mmol/g en zeolita modificada con hierro. Concluyendo que el mecanismo principal es el intercambio iónico, acompañada de difusión de película y la coprecipitación; siendo así ambas zeolitas materiales eficaces para unir y retener Hg (II) en su estructura.

Barrera & Granda (2020) en Quito-Ecuador, evaluaron la eficacia de remoción de Pb y Hg empleando zeolita A y Sodalita sintetizadas por la técnica hidrotermal, adicionalmente el diseño de dos sistemas de adsorción (filtración en columnas y remoción en batch). Para la síntesis de ambas zeolitas utilizó Na_2SiO_3 y SiO_2 pulverizada como fuente de silicio, así como $NaAlO_3$ como fuente de aluminio, además $NaOH$ como solución activadora como agente mineralizante. Para los ensayos de adsorción de plomo y mercurio, usó cloruro de mercurio ($HgCl_2$) y nitrato de plomo ($Pb(NO_3)_2$), adicionalmente el ácido clorhídrico (HCl) e hidróxido de sodio ($NaOH$), para regular el pH; siendo de grado reactivo todos los materiales. Los ensayos de eficiencia de remoción se realizaron a diferentes pH, con un contenido inicial de 10 mg/L de Pb y Hg, en un periodo de 8 hrs. en conmovición continua. Para la determinación de las zeolitas se empleó la técnica de DRX, y a la vez esta para estimar la composición mineralógica como su nivel de cristalización. Teniendo como resultado que para un pH 7 la Sodalita presenta una eficacia en la remoción de 93.59% en Hg y 99.72% para Pb, mientras que para un pH de 4 la eficiencia tuvo un valor menor



de 60.25% para Hg. Por otra parte, para la Zeolita A con un pH de 7 presentó una eficiencia de remoción del 88.91% para Hg y 80.4% en Pb. Concluyendo que las zeolitas sintetizadas pueden ser una opción viable monetariamente, con respecto a otros métodos, como la precipitación química, la ósmosis inversa o el carbón activado.

García (2015) en Colombia, determinó la extensión de la contaminación por el uso de Hg en la minería áureo. Tomó 10 muestras de las quebradas cercanas al área de explotación minera de Pacarní hasta la desembocadura del río Yaguará, tanto de agua y sedimentos en base al procedimiento sugerido por el IDEAM 2010. Para su análisis, las muestras fueron enviadas al laboratorio de Ingeominas-Bogotá, donde fueron analizadas por medio de la técnica de adsorción atómica con generación de hidruros para las muestras de agua y desintegración térmica y amalgamación con oro conectada a adsorción atómica-vapor en frío; en base a la técnica 7473 de la EPA, para las muestras de sedimentos. Como resultados obtuvo que, de las muestras de agua tomadas solo la reconocida como R1 que incumbe a San Luis Alto, ubicación cercana al área de explotación, muestra un valor igual al umbral detectable por el equipo (0.6 parte por millón); en cambio el valor más elevado de mercurio en sedimentos fue de $1497 \mu\text{gHg}/\text{Kg}$ en la quebrada Damita alto, área correspondiente a la mayor cantidad de títulos mineros otorgados por Ingeominas. Concluyendo que las concentraciones observadas en agua en el área de estudio, no exceden los rangos permitidos por el Decreto 1594, pero algunos valores si superan a lo sugerido por la EPA, además que se evidencia la dispersión de la contaminación a partir del área minera hasta la represa de Betania, ya que el curso de agua



traslada el Hg comprendido en los sedimentos, gestándose perjuicios en el ecosistema de la zona.

2.1.2. Antecedentes nacionales

De La Puente & Tello (2022) en Cajamarca, evaluaron la eficiencia de una zeolita comercial tipo clinoptilolita en la remoción de Ba, Cu, B, Pb, Cr, Fe, y Zn; en aguas del río Condebamba. La toma de muestra se realizó en la provincia de Cajabamba, distrito de Cachachi; donde recolectaron 20 L de agua superficial, además de 5 L para los análisis correspondientes, siendo el muestreo de carácter simple o puntual, haciendo uso de la RJ N° 010-2016-ANA. Los ensayos de eficiencia en la remoción de estos contaminantes se realizaron a tres pesos diferentes de zeolita en muestras de 1L de agua del río Condebamba, en agitación constante en un test de jarras. Para los análisis de las muestras se empleó el método EPA Method200.8; en el laboratorio SGS del Perú S.A.C. acreditado por la INACAL. El resultado más favorable mostro que para 100 gr. de zeolita en 1 L de muestra de agua cruda del río en estudio, con una agitación de 3 horas, se logra una eficiencia en la remoción de 51.7051% de Ba, 56.739% de B, 50.247% de Cu, 53.56% de Cr, 58.90% de Fe, 53.68% de Pb y 49.15% de Zn; adicionalmente comprobó que a mayor cuantía de masa del adsorbente hay un mayor número de sitios disponibles para la adsorción de metales. Concluyendo que, a pesar del proceso realizado las concentraciones no cumplieron con el ECA para Agua.

Ita (2017) en Arequipa-Perú, determinó la capacidad de remoción de Hg (II), bajo el efecto de coeficientes como temperatura, tiempo de exposición y concentración del adsorbente. Llevó a cabo 03 métodos de síntesis a partir de



una arcilla tipo bentonita sódica, como fuente de silicio y aluminio; así mismo una solución de nitrato de mercurio ($Hg(NO_3)_2$) para obtener Hg (II). Los ensayos de remoción se llevaron a cabo en un equipo de pruebas de jarras en agitación continua con baño de termostato para mantener la T° constante. Para determinar Hg (II) utilizó la técnica de Voltamperometría con lámina de disco rotatorio de oro, además de la fisisorción de nitrógeno (BET) y microscopio electrónico de barrido (SEM) para la caracterización de las síntesis; adicionalmente evaluó la cinética de adsorción del material mediante isothermas de Freundlich y Langmuir. Como resultado alcanzó que la mayor proporción en la eficiencia de remoción fue de 81.14% a una temperatura de 15 °C, con una concentración de zeolita de 20 g/L, a una exposición de 180 min; con la síntesis denominada M2b en un medio ácido (pH<2) con la solución de HNO_3 al 1% para mantener el metal en solución. Concluyendo que se alcanzó sintetizar una zeolita tipo clinoptilolita mediante una arcilla tipo bentonita, siendo esta un material de bajo valor; además de ello diferenciar el material inicial y la síntesis. Así mismo determinó que la remoción de Hg (II) se ajusta mejor al modelo de Langmuir por tanto, en los ensayos el proceso de remoción se desarrolla en una monocapa; donde no hay interacciones entre los iones removidos y los que aún están en la solución.

Ordoño & Mendoza (2020) en Puno-Perú, evaluaron la capacidad de adsorción de Cu (II) y As (V) en agua del ex recinto minero Limón Verde; utilizando como adsorbente zeolita natural. La materia prima se extrajo de una cantera del centro poblado de Llungo este situado en el distrito de Atuncolla; así mismo, tomaron muestras de aguade los efluentes de este pasivo ambiental de explotación de cobre, localizado en el distrito de Santa Lucia. Para el acondicionamiento de la zeolita natural; trituró y tamizó a malla N° 60, seguido



de un lavado con agua desionizada para eliminar el material fino y secado al aire libre (T° -ambiente). Subsiguientemente tratada con ($NaCl$) 2M, en relación 1 vol. de zeolita/2 vol. de $NaCl$ durante 72 hrs., cambiando la solución cada 8 hrs., seguido de secado natural hasta peso constante. En los ensayos se evaluaron factores como la cantidad de adsorbente, tiempo de contacto e influencia del pH. La identificación de la distribución atómica y molecular de la zeolita fue realizada en el Laboratorio de Investigación y Certificaciones (LABICER-UNI) por la técnica DRX y para los análisis químicos de contenido Cu (II) y As (V) se realizaron en el laboratorio de la UCSM-Arequipa. Como resultados se observó que la zeolita acondicionada contiene componentes similares a la clinoptilolita; además que, con los valores óptimos de 2g/L de adsorbente, pH de 6.2 para el As (V) y pH de 5.5 para el Cu (II), tiempo de contacto de 70 min. para As (V) y tiempo de contacto de 30 min. para el Cu (II). Lograron un eficiencia en la remoción de las aguas de mina en un 52.78% de As (V) y en gran medida en un 99.36% de Cu (II). Concluyendo que las concentraciones de estos dos contaminantes en aguas del ex recinto minero de cobre Limón Verde después de la remoción, son menores a los valores estipulados en el LMP y el ECA para agua.

Turpo et al. (2022) en Puno-Perú, evaluaron la eficiencia de remoción de (As) de aguas subyacentes por medio de filtros empaquetados con zeolitas naturales procedentes de Atuncolla, Ocuvi y Comercial. Como muestras se seleccionaron 03 puntos con antecedentes de mayor concentración de arsénico, de la urbanización Santa Adriana de la localidad de Juliaca. Así mismo el material filtrante se separó de impurezas, secado a temperatura ambiente, trituradas, tamizadas y caracterizadas por la técnica DRX. Diseñaron 03 filtros de $0.55m^3$



en volumen con una altura de 0.70m, hechos con Policloruro de Vinilo (PVC); y las muestras de agua subterránea con contenido de (As) se enmohecieron (oxidación) con H_2O_2 y exposición continua al sol durante 8 hrs. El proceso de filtración se realizó con el empaquetado de las tres zeolitas con un peso de 1 Kg, altura de 30 cm, tamaño de malla de 8-14, caudal de 33 mL/min, pH de 6.5 y temperatura de 14 °C; tratándose 20 L de agua por filtro donde las muestras se tomaron una vez finalizado el proceso; los análisis de las concentraciones de (As) se efectuaron en BHIOS Laboratorio por el método generación/espectrofotometría de adsorción atómica. Como resultados obtuvieron que, la composición mineralógica de la zeolita comercial y la proveniente de Ocuvi presentaban picos típicos de aluminosilicatos (54.88 y 62.87) %; en cambio la situada en Atuncolla presenta un pico intenso de CaO_3 (83.22%). Mientras que, en los procesos de filtración la remoción de arsénico fueron de 5.47, 23.38 y 47.56% respectivamente. Concluyendo que, la reducción de (As) es factible en aguas subterráneas empleando las zeolitas naturales como lecho filtrante, asimismo el material adsorbente proveniente de Atuncolla expuso resultados más favorables en la adsorción de (As).

2.1.3. Antecedentes locales

Soloisolo (2022) en Melgar-Puno, determinó los niveles de Pb y Hg en aguas del río Llallimayo, que riega los campos de pastoreo de los distritos de Ocuvi, Llalli y Umachiri. Las muestras se recolectaron durante el cese de actividades de ARASI S.A.C., mediante un muestreo no aleatorio por juicio de los puntos Jatun Ayllu (1), Pukachupa (2), Koripuna (3), Llalli (4) y Chuquibambilla (5); colectándose 5 muestras de agua por cada metal en estudio,



por punto. La determinación de las concentraciones de Pb y Hg se efectuaron en el laboratorio de la UNMSM-Servicios de Análisis Químicos-Lima, por la técnica GFAAS. Teniendo como resultados que los puntos 2, 3, 1, 4, 5; expresan valores de 1.918 mg, 1.486 mg, 1.416 mg, 1.124 mg y 0.540 mg de Pb/L respectivamente, así como los puntos 2, 4, 1, 5 y 3; expresan los valores de 0.2640 mg, 0.2600 mg, 0.1560 mg, 0.1420 mg y 0.1360 mg de Hg/L. Concluyendo que las concentraciones de plomo y mercurio en agua de río de la cuenca Llallimayo en el periodo de cese de actividades de ARASI S.A.C., todavía presenta concentraciones superiores a los LMP y los estándares del Ministerio de Salud del Perú y la OMS.

Cano (2022) en Melgar-Puno, evaluó la calidad hídrica para verificar el contenido de metales pesados en base a los ECA-categoría 3 y su aptitud según normas Riverside. Donde recolectó 06 muestras, 03 aguas arriba (tramo río Llallimayo) y 03 aguas abajo (Irrigación Canal N-red primaria de suministro). Para estipular los valores de las medidas en campo (conductividad, T° y pH) utilizó un multiparámetro portátil marca HANNA y para las concentraciones de metales y elementos traza fueron realizadas en el "Laboratorios Analíticos del Sur"-Arequipa, mediante la técnica ICP-OES, asimismo la relación SCR (carbonato sodio residual) y la RAS (adsorción de sodio), cationes y aniones fue realizado en el INIA-Puno. Dando como resultado que ninguno de los metales superó los ECA para agua categoría 3. Concluyendo que son aptas para riego y consumo animal; también que, según el Nomograma de Riverside las aguas de la Irrigación Canal N califica como de buena calidad para riego. Además de que, por mínimo que sea el contenido o la concentración de estos metales en el agua



o más aún en el suelo; pudiendo alterar los procesos fisiológicos y estrés de las especies forrajeras utilizadas en la zona; llegando a ser perjudicial en el transcurso del tiempo.

2.2. Base teórica de la investigación

2.2.1. El Agua

Popularmente se refiere a la sustancia más abundante de la Tierra, del volumen total existente el 97% es agua de mar, el 3.0% sobrante es agua dulce; que se localiza la mayor parte en los polos y glaciares (79%), en un porcentaje menor en las aguas subterráneas (20%) y una pequeña parte (1%) en aguas superficiales de ríos, lagos y manantiales (Guevara, 2008).

Según (Cano & Atajo, 2019) el agua es un compuesto dinámico y necesario para el funcionamiento adecuado de los ecosistemas, además de que se le considera un factor limitante o habilitador para el desarrollo tecnológico y social; posible causa de confort o pobreza, colaboración o disputa..

Por lo cual el agua es el indicador más significativo de la salubridad pública de una población; pasando de ser meramente un recurso renovable a constituirse a uno de carácter estratégico para el siglo XXI (Agudelo, 2005).

Con el transcurrir del tiempo le han ido dando múltiples usos, destacándose la explotación intensiva en la agricultura, generación de energía eléctrica, en la desenfadada carrera tecnológica e industrial y ciertamente en la supervivencia y alimentación del hombre (Alvarado Ibarra, 2003).

Actualmente en el Perú hay un total de 106 cuencas, que forman las 03 vertientes hidrográficas (Pacífico, Atlántico y Titicaca). Teniendo una oferta



hídrica sorprendente. Sin embargo no es concordante con la suministro de la población, puesto que alrededor del 70% de la población se centra en la vertiente del Pacífico, disponiendo poco menos del 2% del total de agua; mientras que en la vertiente del Atlántico con una población del 26%, hay un acceso más del 97% de este recurso (Guevara, 2008).

Tabla 2

Vertientes hidrográficas del Perú

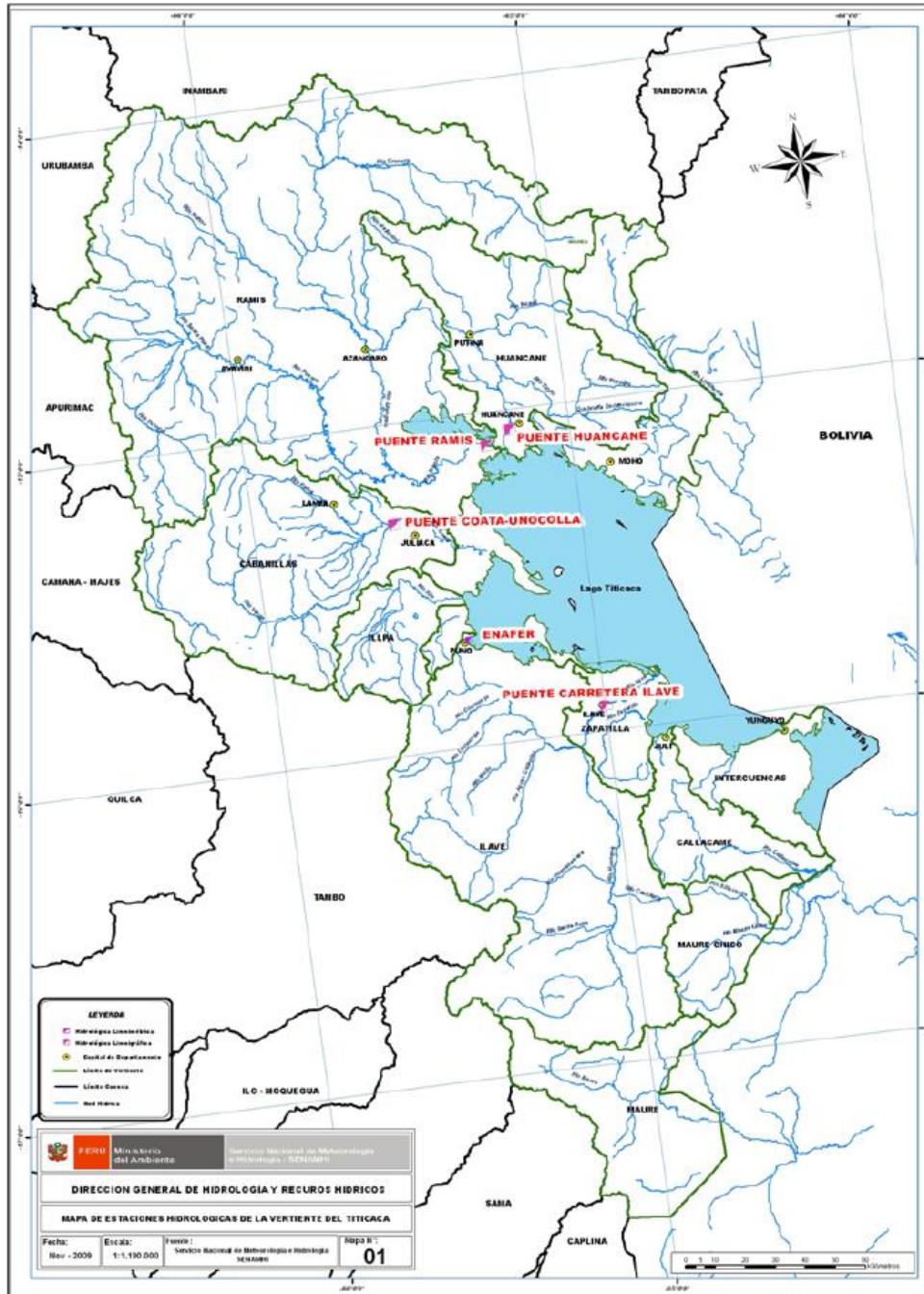
CARACTERÍSTICAS DE LAS TRES VERTIENTES						
VERTIENTE	Cuenca Hidrográfica	Superficie (1 000 Km ²)	POBLACIÓN		RECURSOS DE AGUA	
			miles	%	(MMC)	%
Pacífico	53	279,7	18 430	70	37 363	1,8
Atlántico	44	958,5	6 852	26	1 998 752	97,7
Lago Titicaca	9	47,0	1 047	4	10 172	0,5
TOTAL	106	1 285,2	26 392	100	2 046 287	100,0

Nota. (Guevara, 2008).

La vertiente del Titicaca tiene una forma elipsoidal, con 2 zonas importantes; una conformada por las nacientes (tributarios) con un aporte medio anual de 150 m³/s y la zona del lago con precipitaciones media de 710 mm/año. La mayoría de los ríos que la conforman son sinuosas en la parte alta y radial en la parte baja (Vera, 2009).

Figura 1

Ámbito de influencia de la vertiente del Titicaca y ubicación de las estaciones hidrométricas



Nota. Fuente: (Vera, 2009).

2.2.2. Contaminación del agua superficial

En los últimos años debido al desarrollo demográfico, la mala educación, planificación y conciencia para el manejo y empleo del agua; ha generado una



creciente contaminación en lagos y ríos (Agudelo, 2005). Comúnmente originadas por actividades antrópicas, donde sobresalen como mayoritarias las de fundición y actividades extractivas mineras, seguido del vertido de aguas industriales como urbanas y en menor medida el uso de fertilizantes y pesticidas. Así condicionando su uso, pudiendo afectar a la captación de agua para abastecimiento, explotación pesquera, usos recreativos, inclusive al desequilibrio del ecosistema acuático produciendo muerte y desvanecimiento de muchas especies locales (Vílchez, 2005).

Esta problemática ambiental se coloca como uno de los más relevante que está afectando a la colectividad del siglo XXI, estimándose una tasa de contaminación de 2000 millones de m³diarios de agua, evidenciando una crisis de este recurso en los próximos años (Reyes et al., 2016).

2.2.3. Contaminación del agua por metales pesados

Hoy en día el principal causante de la contaminación de las aguas superficiales es por descargas de elementos tóxicos como los metales pesados generados por actividades antropogénicas; que usualmente terminan en los ecosistemas acuáticos, ya sea de fuentes puntuales; como efluentes de minas, plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAR) o desde fuentes difusas. Particularmente en los ecosistemas de agua dulce, estos contaminantes se distribuyen entre la biota, el agua y en los sedimentos, esta última tanto en sus poros como en las partículas; convirtiéndose en reservorios de contaminantes a largo plazo (Väänänen et al., 2018).

Debido a la toxicidad que representan, es considerado un problema grave en primera instancia para las poblaciones que se suministran de fuentes como los ríos; acarreado perjuicios económicos tanto a nivel local como nacional, a

causa del incremento en los tratamientos médicos y un descenso notable en la productividad de los pobladores del área (Pabón et al., 2020). Además de que sus efectos dependerán principalmente de la edad de la población expuesta, la concentración, especie y tipo de metal pesado (Reyes et al., 2016).

2.2.4. Contaminación del agua por actividades mineras

La economía en Latinoamérica está altamente vinculada a la explotación de sus recursos naturales; sus grandes yacimientos de minerales económicos atraen inversiones de empresas privadas, especialmente canadienses, británicas y chinas. Entre los países, México es el fabricante mayoritario de plata, Chile de cobre, Bolivia de litio, Brasil de hierro ocupando el tercer lugar y Perú está entre los primeros puestos en la producción de plata, cobre y oro (Martínez, 2021).

Tabla 3

Precios de los minerales en el mercado mundial

Mineral	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Copper (\$/lb)	2,73	2,76	4,15	4,05	3,84	3,79	4,06	3,65	6,25	6,00	2,90	2,90
Gold (\$/troy oz)	1.393,63	1.774,74	1.811,48	1.804,32	1.752,47	1.372,79	1.688,13	1.719,00	1.716,67	1.825,00	1.850,00	1.875,00
Silver (\$/troy oz)	16,28	20,47	25,65	25,24	23,98	23,22	21,34	20,73	18,80	NA	NA	NA
Zinc (\$/lb)	1,15	1,00	1,27	1,21	1,17	1,15	1,13	1,10	1,20	1,20	NA	NA
Iron ore (\$/T)	92,84	103,06	171,03	132,25	104,95	85,89	73,07	NA	NA	NA	NA	NA
Lead (\$/lb)	0,91	0,83	0,96	0,95	0,94	0,90	0,88	0,84	NA	NA	NA	NA

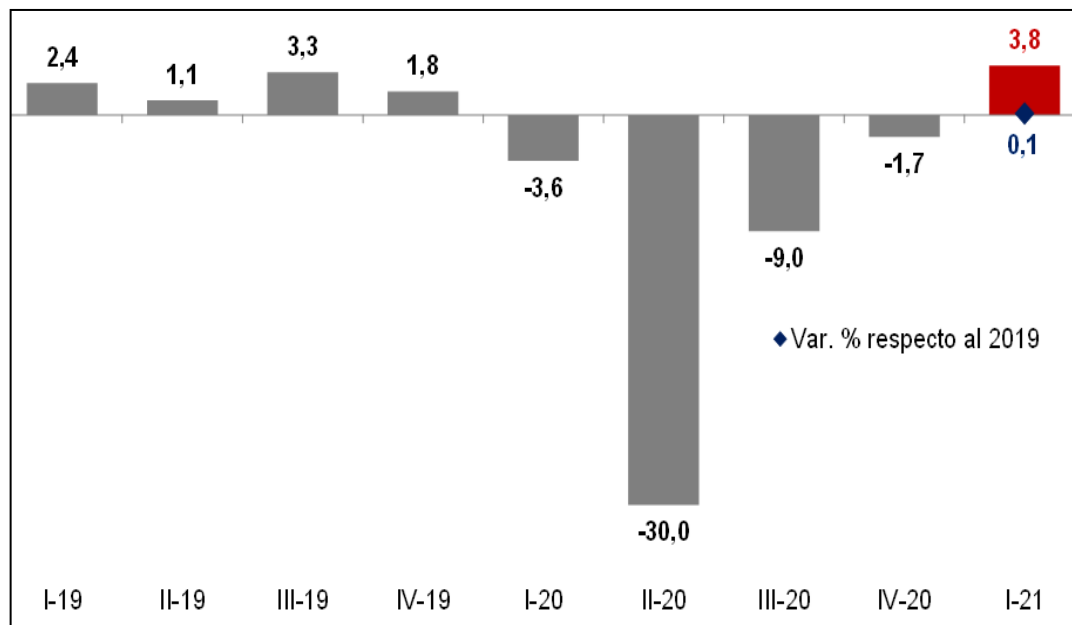
Nota. Fuente: (Cancino et al., 2022)

Con frecuencia las empresas mineras en el Perú suministran servicios básicos (atención médica, educación y energía eléctrica, agua, comunicaciones

y otros), no solo a sus trabajadores sino también a la población de las áreas en que operan; además en conjunto con los proveedores locales elevan notablemente el nivel de vida de la población. Adicionalmente en términos económicos existen otros tipos de contribuciones relevantes, como las compras locales, los programas de colaboración social y salarios pagados, etc.; según la información del MINEM, solo en el año 2007 las empresas extractivas del rubro minero adquirieron más de S/. 13 mil millones de bienes y servicios nacionales, correspondiendo el 25% a las regiones en las que se desarrollan y el 7.5% corresponde a los distritos donde están activos (IPE, 2011).

Figura 2

Crecimiento del PBI 2019-2021



Nota. La caída en la recaudación llegó a ser negativa “-30% en el periodo 2020 II, debido a las restricciones impuestas por el COVID 19 durante la emergencia sanitaria en todo el mundo. Fuente: (Cancino et al., 2022)

Posicionándose como uno de los sectores esenciales de la economía del Perú, cuyo desempeño de ingresos fiscales fue preciso, para que la caída en la



recaudación tributaria del año 2020, fuese menor a diferencia de otros países (Coaquira et al., 2022). No obstante, se observa una contradicción o paradoja; mientras que las actividades extractivas es el motor económico clave que impulsa el desarrollo y reduce la pobreza en el país. Es a la vez el protagonista principal en materia de contaminación ambiental, por la generación de miles de millones de toneladas de roca y minerales que no simbolizan pérdidas económicas para este sector; pero en la salud representan un peligro potencial (Villena, 2018).

Históricamente esta actividad extractiva es asociada a regiones alto andinas a menudo con poblaciones locales organizadas en comunidades campesinas; cuyas actividades económicas son afectadas por la minería. Como resultado se genera un conflicto latente, que se hace más notorio con la expansión de las operaciones mineras; considerándose como incompatible con el desarrollo rural por los actores locales (Glave & Kuramoto, 2002).

Puesto que, la minería en el Perú entra en competencia con la agricultura, la ganadería y la ingesta humana en el uso del agua; devolviendo este recurso la mayoría de las veces contaminado, generando impactos en el manejo de este recurso; por consiguiente, se generan conflictos socioambientales entre la empresa y las comunidades. Situación que se ha agravado en los años recientes, a causa de una legislación promotora de la inversión extranjera (por ser una fuente de divisas para el país); así como un manejo ambiental sectorizado y una deficiencia por parte del estado peruano, que no ha podido armonizar el avance monetario con la sostenibilidad ambiental (Fernández et al., 2013).

Tabla 4

Desempeño ambiental: La visión de los actores

Gobierno Nacional		Gobierno Local		Comunidades Locales	
Problemas	Propuestas y/o Soluciones	Problemas	Propuestas y/o Soluciones	Problemas	Propuestas y/o Soluciones
* Falta de responsabilidad social y ambiental del empresariado.	* Aplicar instrumentos analíticos de valoración económica, tecnológica, ambiental y social. * Aplicación de instrumentos de gestión, como auditorías ambientales, EIA, PAMA, ISO 14000, etc. * Gestión de Riesgos.	* Las empresas mineras no cumplen con los parámetros ambientales. * Dificultad jurídica para defender derechos ambientales. * Falta de independencia en la elaboración de los EIA, que además son incumplidos e incompletos.	* Exigir certificado ISO para productores mineros. * Desarrollo de la legislación ambiental considerando particularidades regionales. * Independencia en la elaboración de los EIA. * Monitoreo y vigilancia ambiental con participación de las comunidades y autoridades locales. * Fortalecimiento de los Comités Ambientales Regionales (CAR).	* Incumplimiento de legislación ambiental por parte de las empresas. * Indiferencia de las autoridades ante el problema de la contaminación. * Incumplimiento de los acuerdos internacionales para defensa del medio ambiente. * Incapacidad legal de los gobiernos locales para la defensa del medio ambiente.	* Educación de la población de áreas afectadas para que defiendan sus derechos. * Indemnización de pueblos afectados. * Independencia en la elaboración de los EIA. * Certificación de los EIA por otras entidades ambientalistas.

Nota. (Glave & Kuramoto, 2002)

2.2.5. Impactos de la minería en el agua

La dimensión de los impactos dependerá exclusivamente de: a) del tamaño de las operaciones mineras, pues al extraer depósitos de más baja leyes es necesario una mayor y extensiva remoción de materiales; b) de la tecnología empleada, puesto que grandes volúmenes de agua son usados por la minería para el procesamiento del mineral y c) la localización de los proyectos mineros, por ubicarse en cabeceras de cuenca o el uso de cauces de ríos como sistemas de disposición de desechos y relaves (Guevara, 2008).



Siendo el drenaje ácido de mina (DAM) la principal fuente de alteración en la calidad del agua; pudiendo producirse de varias maneras, por ejemplo:

- ❖ Cuando el agua y el mineral entran en contacto la zona de explotación minera.
- ❖ Durante el procesamiento del mineral.
- ❖ Cuando el agua y las pilas de desmonte entran en contacto.
- ❖ Cuando el agua es usada como medio de transporte de concentrados y relaves (Guevara, 2008).

Su mala gestión, por otra parte agrava su peligrosidad y por ende su potencial como contaminante por la elevada toxicidad de sus constituyentes (As, Cd, Cu, Pb, Hg, Cr, Se, Zn y otros); además de la forma en que se gestiona (contención, recogida, transporte y tratamiento), lo que indirectamente compromete los aspectos de «salud», «enfermedad» y «atención» por los efectos de la minería (Menéndez & Muñoz, 2021).

Tabla 5

Características del drenaje ácido de mina e impactos ambientales

Propiedad	Especies químicas	Concentraciones (rangos en solución)	Impacto ambiental
Acidez	H ⁺	pH <4.5	Deterioro de la calidad del agua, degeneración y muerte de animales como de plantas, movilización de iones metálicos y disminución de bicarbonato para los organismos fotosintéticos.
Metaloides y metales pesados disueltos	Cu, Ni, As, Pb, Hg, Zn,	0.01 a 1000mg/L	Deterioro y defunción de plantas y animales, bioacumulación, contaminación de sólidos y



	Co, Sb, Cd		sedimentos y disminución de la calidad del agua.
Precipitación de hierro	Fe(OH) _{3(s)} , Fe ²⁺ , Fe ³⁺	100 a 1000mg/L	Disminución de la luz que entra en la columna de agua, asfixia de las criaturas bentónicas, obstrucción de las branquias en peces, además de turbiedad y coloración del agua a causa de la precipitación de las sales férricas mientras que el pH aumenta.
SDT	SO ₄ ²⁻ , Mg, K, Ca Fe, Na, Al, Mn, Si	100 a más de 10000 mg/L	Deterioro de la calidad de agua, contaminación de sedimentos y sólidos.

Nota. (Cervantes, 2014)

2.2.6. La aplicación judicial del derecho ambiental

Los siguientes son algunos de los desafíos en materia de justicia ambiental que Latinoamérica y nuestro país más específicamente presenta complicaciones: 1) la complejidad científico-técnico, que complica su entendimiento y requiere evaluaciones de alto costo; 2) la complejidad de los intereses en juego, típicamente colectivos y difusos debiéndose ser acompañadas de la capacidad técnica y financiera para defender sus intereses; y 3) la propia complejidad del derecho ambiental, que requiere una preparación más rigurosa de jueces y abogados; sumándose la ineficiencia de la propia legislación ambiental. Pues no cuenta con dispositivos apropiados para su aplicación por las autoridades judiciales, esto expresándose actualmente en una baja capacidad de respuesta a las necesidades que requiere el caso (Charre, 2018).

2.2.7. El mercurio

El mercurio es un metal líquido, con una coloración plata brillante; a temperatura ambiente es ligeramente volátil y permanece en estado líquido; en la tabla periódica se encuentra en la familia de los metales de transición con número atómico 80; funde a 38.87°C y es uno de los componentes de la hidrosfera, litosfera y la atmósfera en bajas concentraciones (Medina, 2016).

Tabla 6

Propiedades físicas y químicas del mercurio

PROPIEDADES	
Olor	Inoloro
T° de saturación	356.72°C
Masa molecular	200.59
Densidad	13.5 a 25°C
Solubilidades	Soluble en ácido nítrico y se disuelve en alguna medida en lípidos. En agua de 20-30 µg/L a 25°C.
Viscosidad	15.5 milipoise a 20°C
Valencias	1 y 2
Tensión superficial	484 dinas/cm a 25°C.
Otras propiedades	En su estado puro no se oxida a temperatura ambiente. Forma aleaciones con los metales, exceptuado con el Fe. A temperatura ambiente se combina con el azufre. Forma compuestos con radicales orgánicos.

Nota. Fuente: (Jiménez, 2005; Medina, 2016; Weinberg, 2007)

A lo largo de la historia los yacimientos de cinabrio ha sido la fuente principal para la explotación de mercurio comercial (conocido también como "Hg⁰, elemental o metálico"), dado a las elevadas concentraciones de sulfuro de mercurio en su composición. También se puede producir mercurio elemental como un producto derivado de la minería y refinamiento de metales como el Cu,



Au, Pb, Ag y Zn; ya que el Hg tiende a encontrarse entremezclado como elemento traza en las mismas o similares formaciones geológicas (Medina, 2016; Weinberg, 2007).

2.2.7.1. Principales fuentes de emisiones

La atmosfera, el suelo y el agua son los componentes ambientales que reciben las emisiones de Hg, destacándose las siguientes:

- a) **Fuentes Naturales**, emisiones del Hg en su estado natural en la que se localiza en la litosfera como la presteza volcánica, meteorización de las rocas y suelos.
- b) **Fuentes antropogénicas**, consecuencias del contenido del Hg en materias primas convencionales (petróleo, gas, carbón y otros minerales), extraídos y refinados; de esta fuente proviene el 85% de las emisiones. También producen emisiones la elaboración de papel, lamparillas luminiscentes, instrumental médico, faros de automóviles, termostatos, cementeras, vertederos, depuración de desechos, pinturas, etc.
- c) **Antiguas fuentes antropogénicas**, referido a las emisiones de Hg resguardadas en sedimentos, suelos, vertederos, agua y acaparamientos de residuos; que transitan reiteradamente a la atmosfera por diferentes procesos químicos, físicos y biológicos (Gaioli et al., 2012).

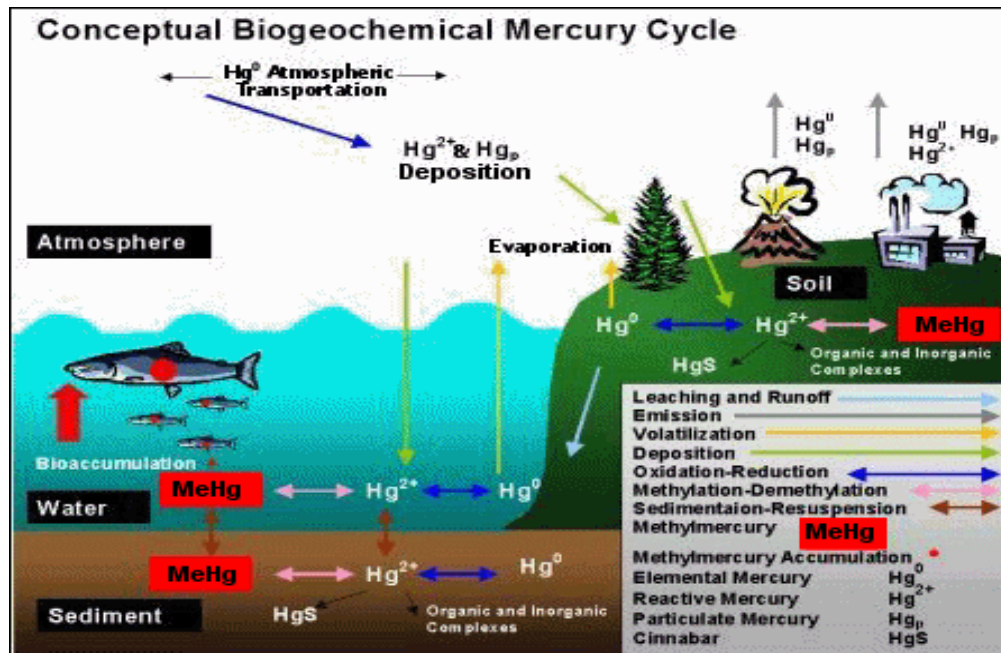
2.2.7.2. Ciclo del mercurio

Definido como la movilización continua de este componente; entre la atmosfera, suelo y agua; basado en las reacciones químicas implicadas,

biodisponibilidad en diferentes medios, parámetros de transporte y su disposición final (Medina, 2016).

Figura 3

Ciclo del mercurio



Nota. (Jiménez, 2005).

Puede tener tres estados de oxidación: metálico (Hg^0), mercurioso (Hg_2^{+2}) y mercúrico (Hg^{+2}); cada una con diferentes propiedades. Por su configuración electrónica $[Xe] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2$, puede perder con relativa facilidad los dos electrones de la capa "s", de ahí sus estados de oxidación (0, +1, +2) y la variedad de compuestos inorgánicos y orgánicos; principalmente de las formas mercúricas y mercuriosas (Medina, 2016).

Cuando la contaminación por Hg ya está comprometido en los suelos y en el agua; todas las tecnologías disponibles para la remediación regularmente son muy caras y no del todo eficientes. Para el tratamiento de las aguas con frecuencia cambiar las propiedades de esta (pH) o del mercurio (Hg^0 a Hg^{+2}), permite obtener una mayor tasa de remoción (Weinberg, 2007).



2.2.7.3. Formas químicas: especiación del mercurio

Las diferentes formas de Hg que existen se les conoce como especies, esta rescata un papel clave en la exposición y toxicidad del Hg. Se pueden clasificar en dos grupos según (Gaioli et al., 2012; Medina, 2016):

a) Compuestos inorgánicos: Dentro la cadena trófica la conforman el propio mercurio metálico (Hg^0), el óxido de mercurio (HgO) y 02 géneros iónicas (el catión mercurioso Hg_2^{+2} y mercúrico Hg^{+2}); pudiendo formar así los siguientes compuestos:

- HgCl_2 , Hg_2Cl_2 (Cloruros de mercurio)
- HgI_2 , Hg_2I_2 (Yoduros de mercurio)
- $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (Nitratos de mercurio)
- $\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Nitratos de mercurioso)
- $\text{Hg}(\text{CN})_2$ (Cianuro de mercurio II)
- $\text{Hg}(\text{CN})_2^0$ (Oxicianuro de mercurio II)
- $\text{Hg}(\text{SCN})_2$ (Tiocianato de mercurio II)
- $\text{Hg}(\text{CNO})_2$ (Fulminato de mercurio II)
- HgS (Sulfuro de mercurio)

b) Compuestos orgánicos: Son habitualmente tres: el $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ (dimetilmercurio), CH_3Hg^+ (metilmercurio) y $\text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}^+$ (fenilmercurio). Estas especies son particularmente liposolubles y de fácil absorción; siendo el metilmercurio la que posee una mayor toxicidad.

2.2.7.4. Metabolismo del mercurio

El Hg se puede absorber por tres vías: la respiratoria, dérmica y gastrointestinal (Medina, 2016):

- a) **Vía respiratoria:** Se pueden absorber por inhalación directa dos especies que se encuentran en la atmosfera, el HgO en forma de partículas y el Hg metálico en forma de gas o vapor.
- b) **Vía dérmica:** Las especies inorgánicas son de difícil absorción dérmica.
- c) **Vía gastrointestinal:** El Hg⁰, el Hg⁺² y las especies orgánicas son las especies químicas que entran por esta vía. La primera se produce por descuido y sólo se absorbe un 0,01%; en cambio, el Hg⁺² puede absorberse hasta un 15% y las especies orgánicas hasta un 80%, ambas extremadamente nocivas.

El Hg⁰, una vez que entra al organismo persiste de manera transitoria en su forma metálica y se moviliza a distintos órganos, donde es oxidado a ion mercurio Hg⁺²; pudiéndose unirse con las proteínas sanguíneas e hísticas. Una vez adsorbido el transporte se efectúa por los diferentes constituyentes de la sangre (Academia Nacional de Medicina, 2006).

Tabla 7

Vida media biológica para los múltiples tipos de mercurio

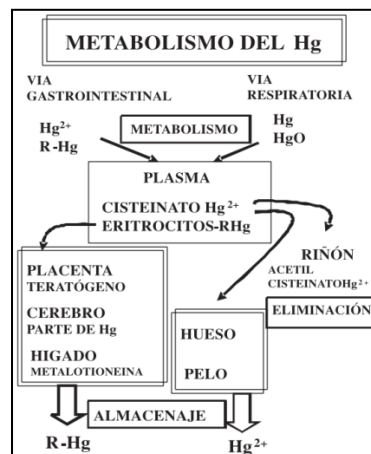
COMPUESTO	VIDA MEDIA BIOLÓGICA ORGANISMO EN CONJUNTO	VIDA MEDIA BIOLÓGICA EN ÓRGANOS Y TEJIDOS
Mercurio inorgánico	Mujeres: 29 a 41 días Hombres: 32 a 60 días	Sangre: 20 a 28 días
Mercurio elemental	35.0 a 90.0 días	Riñón: 64 días Pulmón: 1,7 días Cerebro: > 1 año
Metilmercurio	110.0 a 190.0 días	Cerebro: 240 días Sangre: 70 días

Nota. Fuente: (Medina, 2016).

Las especies inorgánicas, tiene como vía más importante de excreción la digestiva y en menor medida la urinaria, respiratoria y sudorípara; siendo más fáciles de eliminar por el organismo, pues se unen a la cisteína del plasma ($C_3H_7NO_2S$), formando un complejo plasmático que se elimina por los riñones. En cambio las especies orgánicas (R-Hg), como el CH_3Hg^+ la mayor parte se excreta por las heces en un 90% desde el hígado vía bilis; presentándose el ciclo enterohepático (recirculación del 10% de R-Hg no eliminados; desde el tracto gastrointestinal puede ser nuevamente reabsorbido por el sistema porta hasta llegar al hígado y su posterior paso a través del sistema biliar de regreso al intestino). La lenta eliminación de las especies orgánicas puede causar la acumulación en los organismos, por consiguiente efectos negativos en la salubridad (Medina, 2016; Villarejo, 2004).

Figura 4

Proceso LADME para el mercurio



Nota. LADME (Liberación, Absorción, Suministro, Metabolismo y Excreción). Fuente: (Villarejo, 2004).

2.2.7.5. Efectos sobre la salubridad

Entre los factores que determinan los efectos en la salubridad y la gravedad de la intoxicación, están dados por la especie del mercurio, tiempo y

vía de exposición, dosis y edad; siendo la etapa fetal la más vulnerable, afectando con deficiencias neuromusculares y retardo mental (Medina, 2016).

Tabla 8*Toxicología del mercurio*

INTOXICACIONES AGUDAS	INTOXICACIONES CRÓNICAS
<p>El mercurio metálico presenta un cuadro clínico de debilidad, asociado a:</p> <ul style="list-style-type: none">- Tos y opresión torácica- Escalofríos- Nauseas- Vómitos- Diarrea- Insuficiencia renal <p>El Hg⁺² al precipitar en las mucosas le da un aspecto grisáceo a la faringe, intestino ya a la boca en primera instancia; acompañado de vómitos y dolor agudo.</p>	<p>El mercurio metálico produce efectos neurológicos y el síndrome vegetativo asténico.</p> <p>El Hg⁺², muestra signos de sabor metálico fuerte, periodontitis, gingivitis, necrosis tubular renal.</p> <p>Los compuestos-especies orgánicas producen:</p> <ul style="list-style-type: none">- Reducción del campo visual irreversible- Dificultad auditiva irreversible- Ataxia- Parálisis y muerte <p>Agente teratógeno en fetos.</p>

Nota. (Gaioli et al., 2012; Villarejo, 2004).

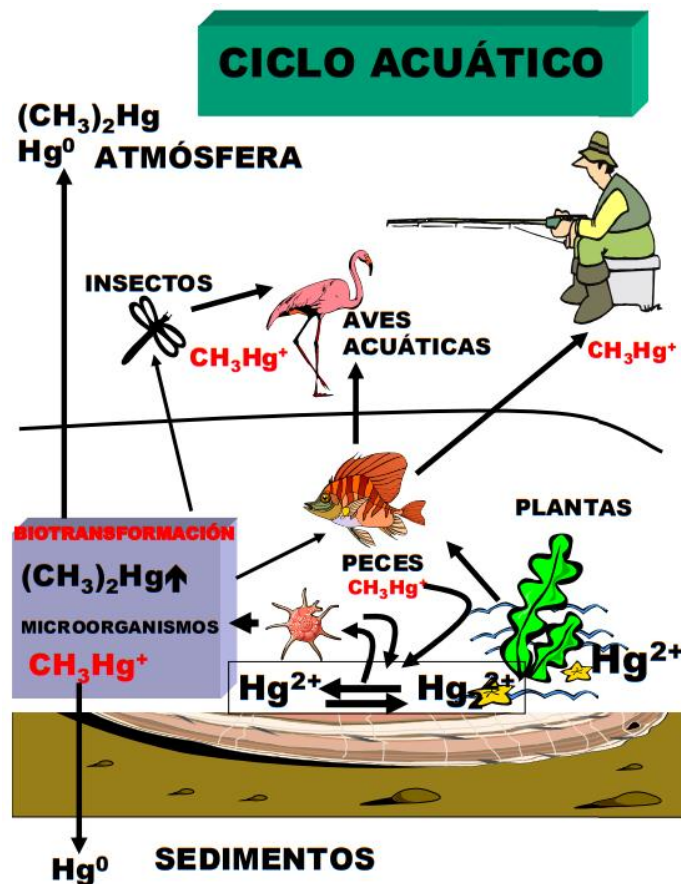
2.2.7.6. Biotransformación del mercurio en el ciclo acuático

La especie más común y mayoritaria es Hg⁺²; puesto que es muy soluble y con una alta capacidad de bioacumularse en los organismos que viven en el agua o seguir un proceso de biotransformación por medio de microorganismos acuáticos, originando a 02 especies-orgánicas. Al (CH₃)₂Hg (dimetilmercurio) volátil, que retorna a la estratosfera y al CH₃Hg⁺ (metilmercurio) que se acumula en los peces; a su vez este puede transformarse en Hg₂⁺² y oxidarse nuevamente

a Hg^{+2} formándose un ciclo, o en Hg^0 , depositándose en forma de sedimentos (Villarejo, 2004).

Figura 5

Biotransformación del mercurio en los ríos



Nota. (Villarejo, 2004)

El comportamiento del Hg en las aguas pueden ocurrir los siguientes procesos (Villarejo, 2004):

- En el agua todas las grafías de mercurio se transmutan en Hg^{+2} , al reaccionar con el oxígeno.
- Por un proceso anaerobio las bacterias pseudomonas reducen las especies orgánicas a Hg^0 , precipitando en forma de sedimentos.

- En aguas continentales el Hg^{+2} se metila, preferentemente por metilación aeróbica (bacterias y microorganismos) o por metilación anaeróbica de bacterias metanogénicas.

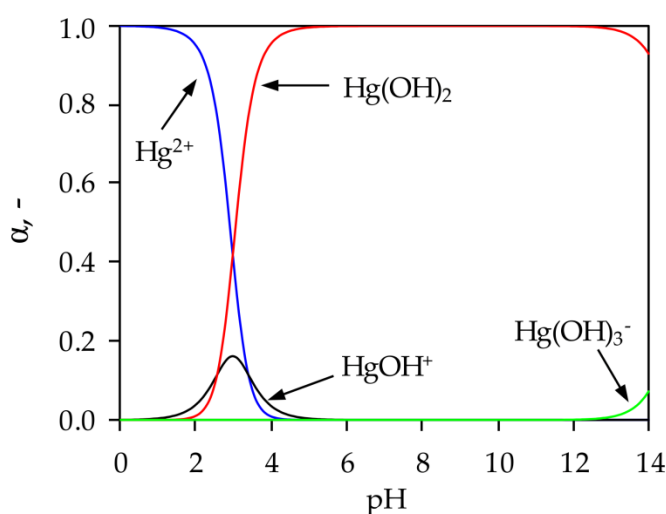
2.2.7.7. Especies de Hg (II) en función del pH

La metilación de Hg (II) da origen a la especie de mercurio de mayor peligro (metilmercurio); debido a su mayor movilidad y a su posibilidad de bioacumulación como de biomagnificación a través de la red trófica natural. Así, en los suelos y sedimentos acuáticos, las especies de mercurio pueden quedar atrapadas por las arcillas y en la materia orgánica (Ugrina et al., 2020).

El Hg (II) tiene varias morfológicas de existencia en diferentes condiciones de pH; si es inferior a 5, la morfología principal en agua es el Hg^{+2} . Sin embargo la cantidad de Hg (II) disminuye sustancialmente con la ampliación del rango de pH debido a los procesos de hidrólisis y precipitación. Por lo tanto el pH de la solución es un parámetro crucial para la eliminación de Hg (II) (Zhou et al., 2022).

Figura 6

Distribución de especies de Hg (II) en función del pH

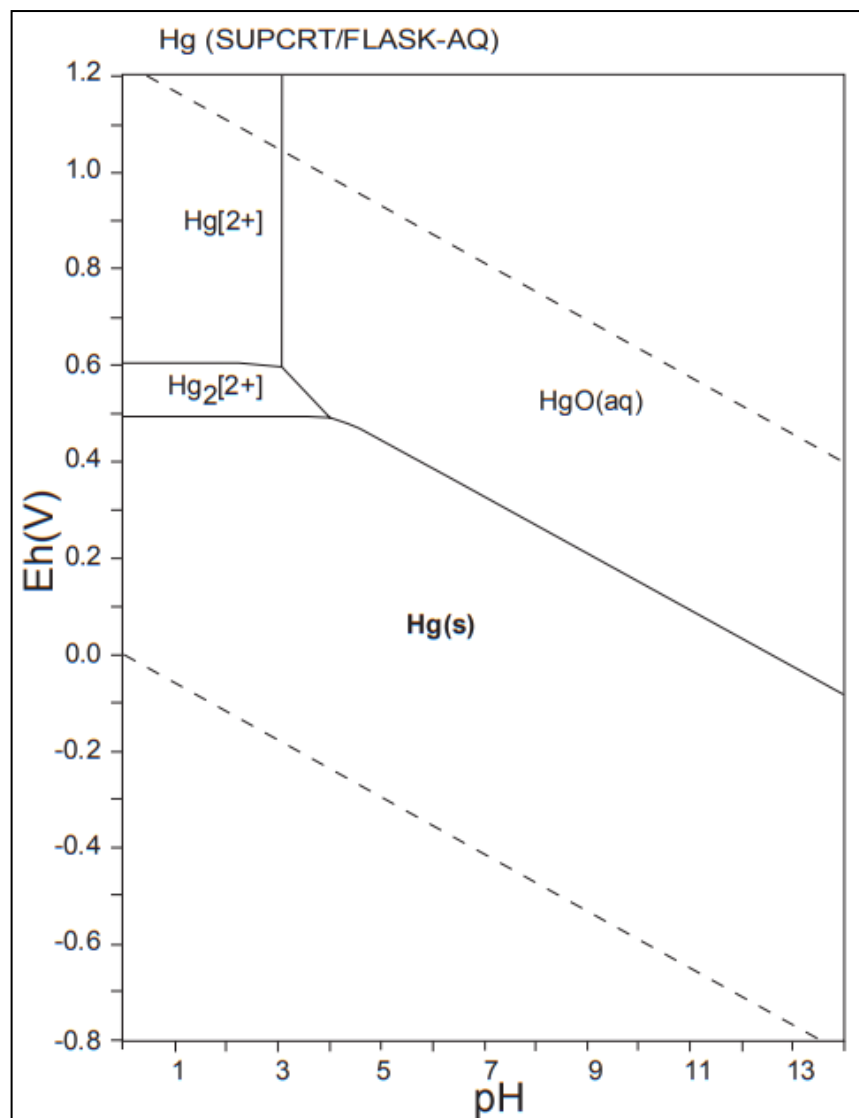


Nota. (Ugrina et al., 2020)

Los esquemas de Pourbaix o Eh-pH se utilizan para demostrar la estabilidad de compuestos o especies de metales pesados y ofrecen una forma sencilla de prever cómo se comportarán en circunstancias ambientales cambiantes. Además de representar las fases sólidas estables y las especies acuosas dominantes en un plano definido por los ejes de pH y Eh (Takeno, 2005).

Figura 7

Diagrama de Eh-pH del mercurio



Nota. (Takeno, 2005).

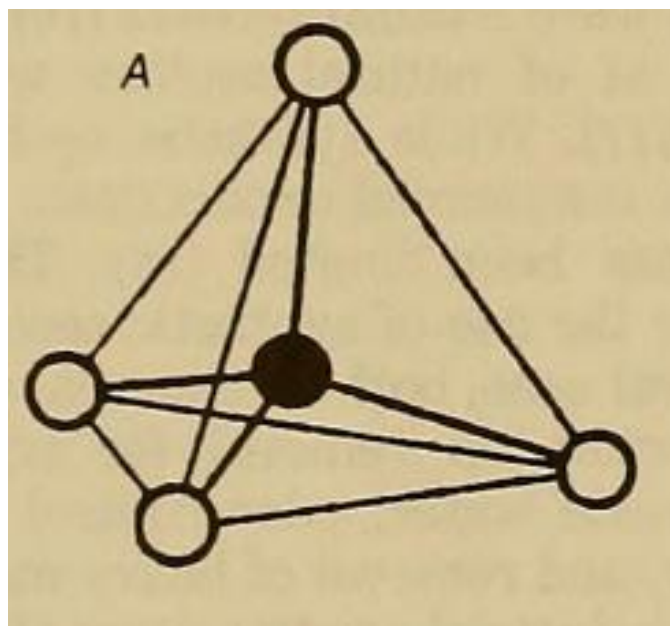
2.2.8. Las zeolitas

Las zeolitas fueron identificadas por primera vez por Constedt en 1756; durante más de 25 años se estuvo utilizado en procesos comerciales, pero a medida que aumentó el conocimiento de las propiedades que tenía; se hizo evidente que podrían utilizarse con fines industriales y ambientales; considerando a las zeolitas naturales como materiales primas potencialmente valiosas (Clifton, 1987). Siendo estas las más selectivas a la hora de remover una sustancia (Alvarado, 2003).

Englert & Rubio (2005), definen a las zeolitas como aluminosilicatos cristalinos, con una estructura tridimensional con tetraedros de AlO_4 y SiO_4 ; unidos entre sí al compartir todo el oxígeno para formar jaulas y canales interconectados que contienen moléculas de agua, cationes alcalinos y alcalinotérreos intercambiables.

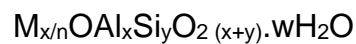
Figura 8

Unidad estructural básica de las zeolita



Nota. A) Tetraedro con un átomo de Si en el centro y átomos de O en los vértices. Fuente: (Clifton, 1987)

Las zeolitas se pueden representar por la siguiente fórmula general (Alvarado, 2003):



Donde:

M: Es el catión con carga eléctrica (+), que puede ser mercantilizado.

n: Es la valencia del catión.

(x+y): Es el número total de tetraedros por celda unitaria.

w: Cantidad de moléculas de agua.

Los cationes principales que se encuentran y que pueden ser intercambiados son: Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Sr^{2+} , Ba^{2+} y Ca^{2+} , puesto que están débilmente unidos en su estructura (Alvarado, 2003).

Estos se pueden encontrar en casi todo el mundo con diversas estructuras cristalinas, a causa de su formación en diferentes condiciones y regiones geográficas; dando como resultado un cambio en sus propiedades físico-químicas. Entre las de origen natural se tiene alrededor de 67 especies identificadas, no obstante el requerimiento de nuevos materiales más eficientes ha llevado a los pensadores a sintetizar más de 232 estructuras de zeolitas en laboratorio por métodos solvotermales e hidrotérmicos; las cuales se designan con letras: Tipo ZSM, Y, A, X, etc. (Alvarado, 2003; Rojas, 2012).

Tabla 9

Principales tipos de zeolitas naturales

FORMULA QUÍMICA	NOMBRE
$CaAl_2Si_4O_{12} \cdot 4H_2O$	Laumontita
$(Na,K,Ca)_{2-3}Al_3(Al,Si)_2Si_{13}O_{36} \cdot 12H_2O$	Clinoptilolita
$NaCa_2Al_5Si_{13}O_{36} \cdot 14H_2O$	Stilbita
$(K,Na,Ca)_{1-2}(Si,Al)_8 \cdot O_{16} \cdot 6H_2O$	Phillipsita
$(K_2,Ca,Na_2)_2Al_4Si_{14}O_{36} \cdot 15H_2O$	Erionita



$(K_2, Ca)_5Al_{10}Si_{26}O_{72} \cdot 30H_2O$	Offretitar
$(Na_2, Ca)Al_2Si_4O_{12} \cdot 8H_2O$	Faujazita
$CaAl_2Si_4O_{12} \cdot 6H_2O$	Chabazita
$Na_2Al_2Si_3O_{10} \cdot 2H_2O$	Natrolita
$NaCa_2Al_5Si_5O_{20} \cdot 6H_2O$	Thomsonita
$(Ca, Na_2, K_2)Al_2Si_{10}O_{24} \cdot 7H_2O$	Mordenita
$CaAl_2Si_6O_{16} \cdot 5H_2O$	Epistilbita
$NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$	Analcima
$(Na, Ca)_{2-3}Al_3(Al, Si)_2Si_{13}O_{36} \cdot 12H_2O$	Heulandita

Nota. Fuente: (Curi et al., 2006).

2.2.8.1. Procesos de formación y ocurrencia geológica

La mayoría de las apariciones de zeolita en la naturaleza se pueden asignar a seis tipos de entornos geológicos (Clifton, 1987):

- a) **Lagos salinos y alcalinos:** Están asociados a regiones áridas y semiáridas, en superficies con fallas en bloque y valles con canales; estableciendo un sistema de cuenca. Se forman comúnmente la clinoptilolita, erionita, chabazita y mordenita, que reemplazan al vidrio volcánico, sílice biogénica, arcilla mal cristalizada, montmorillonita, plagioclasa, nefelina y al cuarzo. Este ambiente origina depósitos zonificados lateralmente, lo que representa la química cambiante del agua a medida que se produce la evaporación y el depósito de minerales.
- b) **Suelos salinos y alcalinos:** El clima es el primordial factor que controla la formación de zeolitas en este ambiente. Los depósitos se forman en suelos áridos y regiones semiáridas donde la evaporación hace que el carbonato-bicarbonato de sodio se concentre en los suelos superficiales; donde la lluvia que se filtra disuelve el carbonato-



bicarbonato de sodio, aumentando el pH en consecuencia permitiendo alterar los vidrios y aluminosilicatos presentes en el suelo. Pudiendo alcanzar espesores de 18 metros y contener entre un 15% a un 40% de zeolitas, siendo la analcima la más común en estas formaciones.

- c) Sedimentos marinos:** Se forman en sedimentos marinos por la reacción de los vidrios y tefras basálticas como silíceas, con el agua intersticial a bajas T° y condiciones de pH entre 7 a 8. Las de sedimentación lenta se encuentran en los océanos del Pacífico e Indico, en arcillas pardas post-miocenas, sedimentos volcánicos basálticos, lodos silíceos vítricos y calcáreos, siendo la phillipsita como especie dominante. Las de sedimentación rápida se encuentran en el margen Atlántico y Pacífico, en sedimentos calcáreos y arcillas terrígenas del Paleógeno y Cretácico. La clinoptilolita es la especie dominante en este ambiente, también pueden estar presente la analcima, chabasita, erionita, laumontita, gmelinita, natrolita y thomsonita.
- d) Sistemas hidrológicos abiertos:** Se forman a partir de la percolación del agua subterránea a través de materiales piroclásticos porosos ricos en vidrio reactivo. El pH y el contenido de sólidos disueltos del agua subterránea aumentan a medida que reacciona con la ceniza vítrica, hasta que se precipitan las zeolitas. El movimiento del agua subterránea hacia abajo a través del sistema da como resultado una zonificación vertical de la composición del agua y los minerales autóctonos, incluidas las zeolitas.

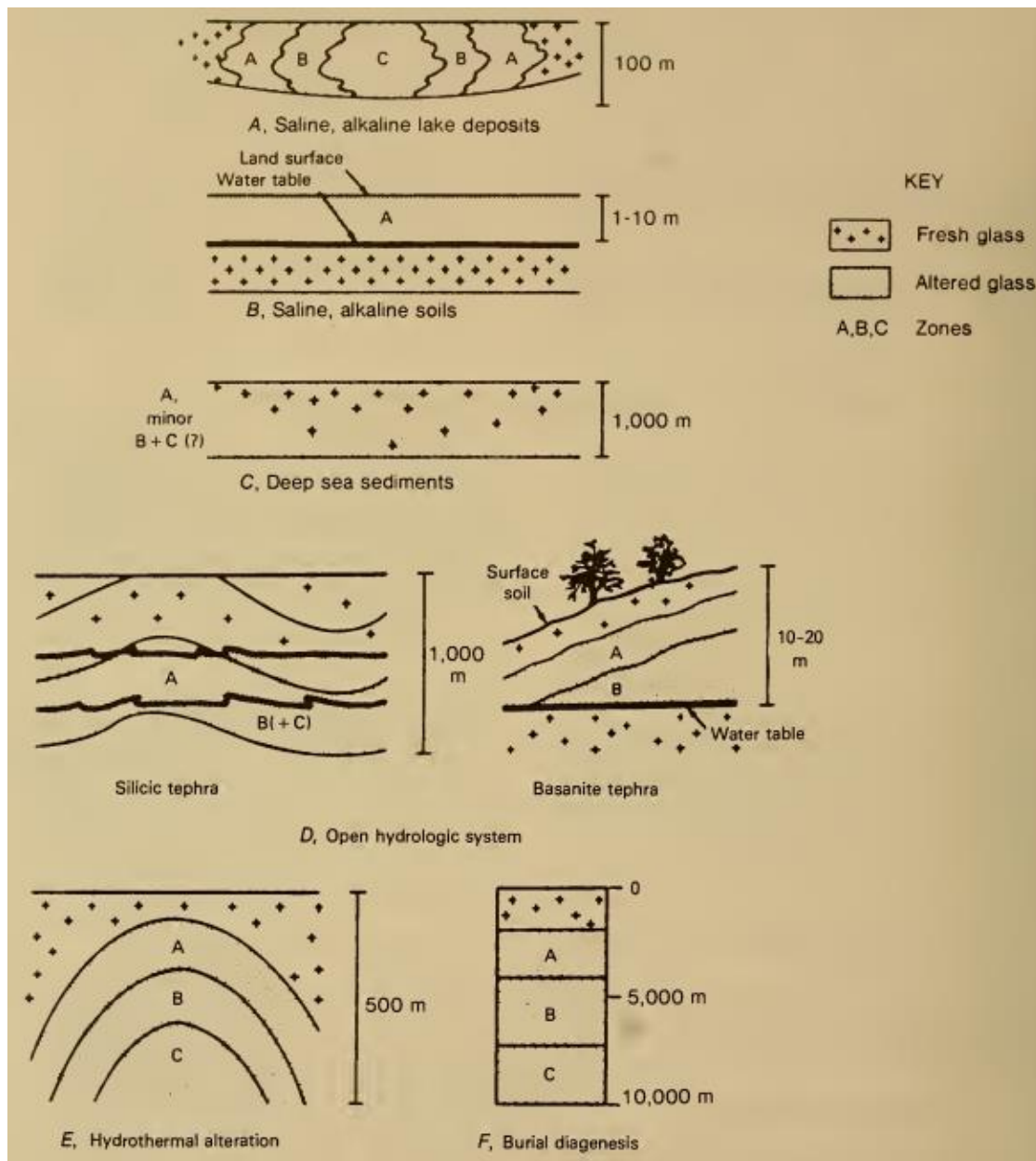


- e) Alteración hidrotermal:** Las zeolitas precipitan en sistemas hidrotermales desde aguas calientes alcalinas hasta débilmente ácidas. Los conjuntos observados están controlados por la composición y permeabilidad de la roca madre, temperatura y por los constituyentes del fluido geotérmico. La clinoptilolita y mordenita se encuentran en las zonas más superficiales y frías, mientras que la analcima, heulandita, laumontita y wairakita (formas menos hidratadas), se encuentran en las zonas más profundas y calientes.
- f) Diagénesis de enterramiento:** Las zeolitas asociadas con la diagénesis de enterramiento se presentan en sedimentos volcanoclásticos gruesos que se metamorfisaron a temperaturas elevadas. Se reconocen dos secuencias de reacción: a) la serie alcalina y b) la serie cálcica. Las secuencias de diagénesis de enterramiento se caracterizan por la zonificación vertical y está relacionada con el aumento de la profundidad de enterramiento, siendo similares mineralógicamente a los sistemas hidrológicos abiertos.

También suelen presentarse en dos apariciones geológicas adicionales: a) sistemas magmáticos, donde las zeolitas cristalizan durante las últimas etapas de formación de las rocas magmáticas, a través de la interacción de fluidos con la roca circundante. Se presentan como cristales finos que revisten cavidades en rocas ígneas básicas, también como granos y glóbulos intersticiales; b) cráteres de impacto, donde el vidrio formado por el impacto del meteorito se transforma en analcima y esmectita (Clifton, 1987).

Figura 9

Modos de aparición de las zeolitas naturales y profundidades aproximadas



Nota. A) Lagos salobres y alcalinos; B) Suelos salobres y alcalinos; C) Sedimentos marinos; D) Sistemas hidrológicos abiertos; E) Alteración hidrotermal; F) Diagénesis de enterramiento. Fuente: (Clifton, 1987).

2.2.8.2. Propiedades de la zeolita

Al tener una gran diversidad y una amplia versatilidad en cuanto a sus propiedades derivadas de sus diferentes estructuras y composiciones; se destacan las siguientes propiedades:



- **Porosidad**

Su estructura microporosa presenta una superficie interna sustancialmente mayor en proporción a su superficie exterior, ya que está desarrollada por cavidades y canales regulares homogéneos de extensiones moleculares comprendidas entre 3 y 13 nm, que son valores comparables a los diámetros cinéticos de numerosas moléculas. Como resultado, los potenciales de adsorción aumentan, incrementando la fuerza con la que una molécula dentro del poro es atraída hacia toda la superficie del poro. No obstante, las moléculas se adsorberán y formarán una monocapa a cierta distancia de la superficie cuando el poro sea suficientemente ancho. A medida que incrementa la cuantía adsorbida, las moléculas se organizan en capas sucesivas (Curi et al., 2006).

- **Intercambio iónico**

Las zeolitas tienen esta característica inherente porque resulta de la sustitución isomórfica de átomos de aluminio trivalente por átomos de "Si" en su estructura atómica. Esto crea una carga (-) en su estructura, que es contrarrestada o equilibrada por cationes intercambiables (sodio, potasio, calcio, etc.) dispuestos en su red cristalina. En las soluciones, estos cationes también pueden ser sustituidos por cationes específicos como el manganeso, el zinc, el plomo y el cadmio. Debido a esta característica, son especialmente adecuados para eliminar los iones de metales pesados no deseados de los efluentes industriales (Alvarado, 2003; Erdem et al., 2004).



En las zeolitas dependen de diferentes factores que determinan una mayor selectividad a determinados cationes, como lo descrito por (Alvarado, 2003; Curi et al., 2006):

- Concentración y naturaleza de los cationes en solución
- T° del sistema
- Aniones asociados con los cationes en solución
- Solvente-agua/orgánico (la mayor parte de intercambios iónicos se efectúan en solución acuosa y en menor medida en solventes orgánicos)
- Estructura de la zeolita (topología y densidad de carga de la red).

En las últimas décadas las investigaciones reportan la eficacia de remoción de cationes como: Pb^{+2} , Zn^{+2} , $Cr^{+4, +5}$, Cd^{+3} , $V^{+4, +5}$, Ni^{+2} , Hg^{+2} , Zn^{+2} y Cu^{+2} de efluentes industriales; también siendo eficaces para eliminar metales como: As(V), Mn(II) y Cr(III). Además de iones de Hg provenientes de actividades del sector minero (Curi et al., 2006; Lescano & Reinoso, 2023).

- **Adsorción**

Las zeolitas presentan una alta eficiencia de adsorción, pues poseen una gran superficie interna que induce el acercamiento de la partícula a remover. Cuando más pequeña sea el tamaño del poro se genera un aumento del potencial de adsorción, por tanto el confinamiento de la molécula adsorbida es mayor. A su vez a partir del contexto de control ambiental, la generalidad de autores concuerdan en la supremacía de las zeolitas naturales en la eliminación de contaminantes; teniendo una gran ventaja sobre la electrodiálisis, extracción por solventes, evaporación, adsorción en



carbón, precipitación e intercambio con resinas sintéticas; que normalmente se usan para la remoción en efluentes de la industria minera (Curi et al., 2006).

Siendo la serie de selectividad de zeolitas como la clinoptilolita, mordenita, chabazita, erionita y phillipsita; frente a soluciones simuladas de cadmio, cromo, níquel, zinc (elaborados a partir de cloruros), plomo (a partir del nitrato de plomo), cobre y cobalto (en forma de sulfato) <metales pesados> es: $Pb > Cd > Cs > Cu(II) > Co(II) > Cr(III) > Zn > Ni(II) > Hg(II)$ (Zamzow et al., 1990).

2.2.8.3. Aplicaciones de las zeolitas

Las zeolitas se utilizaron por primera vez hace 2000 años para la construcción de piedras, su capacidad de intercambio iónico hace unos 100 años, como tamizado molecular para separar gases hace 40 años y los primeros usos comerciales de las zeolitas sintéticas hace 30 años; teniendo un reconocimiento mundial hace 25 años con más de 1000 trabajos de investigación al año. Aun así solo alrededor del 10% de las zeolitas naturales conocidas tenían aplicaciones comerciales y menos del 10% de las zeolitas sintéticas se vendían con éxito; en Europa era monopolizado por la industria de la construcción y en el lejano Oriente como relleno en la industria del papel, debido a la falta de disponibilidad de recursos minerales alternativos (Clifton, 1987). En la actualidad se ha desarrollado un mercado variado en cuando al uso de las zeolitas como:

- Separaciones basados en tamizado y selectividad
- Intercambio iónico
- Acuicultura en la eliminación de NH_4^+



- Eliminación y almacenamiento de radioisótopos
- Catalizadores (obtención de gas licuado, gasolinas de alto octanaje y diesel) y purificadores de agua
- En la fabricación de papel
- Separación del O₂ y N₂ del aire
- Alimentación de animales
- Separación de metales presentes en aguas servidas municipales
- Degradabilidad de detergentes
- Remoción de metales tóxicos, tratamiento de drenajes ácidos de mina (DAM), como de efluentes metalúrgicos, además de aguas contaminadas con mercurio (producto de actividades mineras) (Alvarado, 2003; Clifton, 1987; Curi et al., 2006).

2.2.9. Adsorción como método de remoción

Uno de los mecanismos de más aceptación por la comunidad científica para la separación de metales pesados del agua; es el fenómeno de la adsorción, pues resulta ser: económico, práctico y amigable con el medio ambiente; por lo que se ha promovido su empleo en países en vías de desarrollo (Loya, 2022). Básicamente se distinguen dos tipos de adsorción, una física (débilmente específica, reversible y con un pequeño efecto térmico) basada en fuerzas no específicas como la de Van der Waals y la química (selectiva, a menudo irreversible y con un efecto térmico mucho mayor) basada en reacciones químicas adsorbato-adsorbente que conducen a la formación de enlaces iónicos o covalentes (Kaczorowska & Bożejewicz, 2024).

Al estar basada en fisisorción o quimisorción; es solo un proceso de cesión de masa en la que un adsorbato se une a la superficie de un adsorbente. Siendo

las propiedades fisicoquímicas del adsorbente, la T° y el pH de la solución las variables primordiales que entran en el proceso. Por lo general para el remoción de agua, el procedimiento es poner en contacto un material poroso o cargado (adsorbente) con el agua contaminada de metales (adsorbatos), para atrapar física o químicamente los contaminantes a la superficie y removerlos de la solución (Loya, 2022).

Figura 10

Esquema del proceso de adsorción



Nota. En los procesos de adsorción, el material adsorbente utilizado representa el elemento esencial para obtener separaciones efectivas. Fuente: (Lupa & Coheci, 2023)

El grupo de adsorbentes es bien conocido y su uso frecuente que ha permitido la adsorción eficientemente de varios contaminantes del agua; incluye el carbón activado, zeolita, mineral de arcilla y alúmina. Sin embargo, debido al creciente interés en métodos que aportan beneficios ambientales adicionales como los subproductos agrícolas, desechos biológicos, nanomateriales y los hidrogeles se utilizan cada vez más (Kaczorowska & Bożejewicz, 2024).

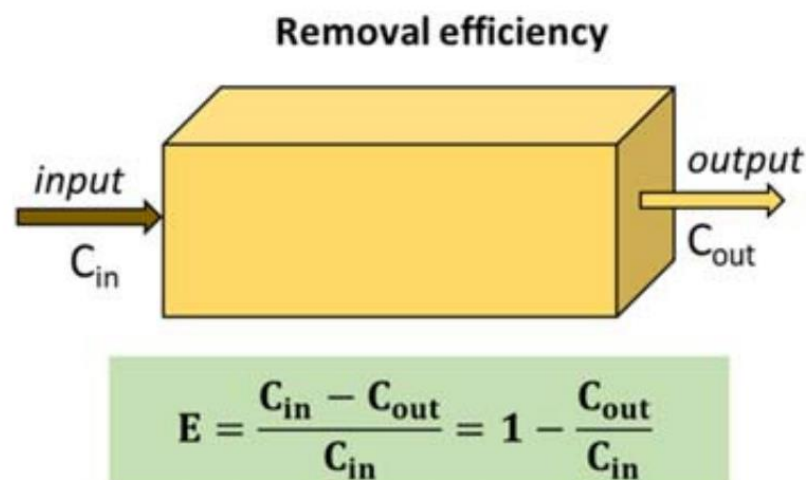
2.2.10. Eficiencia en la remoción de contaminantes

El término de <remoción> refleja la cantidad de contaminante que se logra sacar o eliminar en un proceso, pero un término más preciso podría ser <reducción> ya que refleja el equilibrio entre los valores medidos de entrada y salida. En cambio la eficacia de remoción de un determinado componente en un tratamiento o unidad de procedimiento se reporta como el porcentaje (%) de eficacia de remoción, obteniéndose mediante la siguiente ecuación (von Sperling et al., 2020):

$$\begin{aligned} E &= \frac{\text{Concentración de entrada} - \text{Concentración de salida}}{\text{Concentración de entrada}} \\ &= \frac{\text{Concentración removida}}{\text{Concentración de entrada}} \\ &= 1 - \frac{\text{Concentración de salida}}{\text{Concentración de entrada}} \end{aligned}$$

Figura 11

Eficiencia de remoción expresada como valor relativo



Nota. Fuente:(von Sperling et al., 2020).

Donde:

E : Eficiencia en la remoción.

C_{in} : Concentración de entrada.

C_{out} : Concentración de salida.

Si queremos expresar las eficiencias de remoción como porcentajes, simplemente multiplicamos la ecuación por 100, que se interpretaría como que tan efectivo fue el proceso para sacar el contaminante.

$$E(\%) = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100 = \left(\frac{C_{out}}{C_{in}} \right) \times 100$$

Donde:

$E(\%)$: Porcentaje de eficiencia de la remoción.

C_{in} : Concentración de entrada.

C_{out} : Concentración de salida.

Las unidades de concentración deben ser las mismas para C_{in} y C_{out} , y son las tradicionales para reportar concentraciones (mg/L, g/m³, µg/L, etc.). En cuanto a la interpretación de una eficiencia buena o mala depende de las expectativas basadas en la capacidad del tratamiento en función de los procesos que ocurren (von Sperling et al., 2020).

2.2.11. Marco legal de la calidad del agua⁷

La normativa sobre la particularidad de las aguas es muy amplia, considerando las normas generales están: La Constitución Política del Perú, Ley de Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales, Ley General de



Salud y la Ley General del Ambiente; en cuanto a normas específicas están: La Ley General de Servicios de Saneamiento, Texto Único Ordenado del Reglamento de la Ley General de Servicios de Saneamiento, Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua, Ley de Recursos Hídricos, Clasificación de los Cuerpos de Agua Superficiales y la Ley de Modernización de los Servicios de Saneamiento (ANA, 2013).

El vertimiento de aguas residuales tratadas a una masa natural de agua continental o marina debe apegarse a los lineamientos sobresalientes en el artículo 79 de la Ley de Recursos Hídricos a nivel sectorial. De acuerdo con esta Ley, se prohíbe la descarga directa o indirecta de estas aguas sin la aprobación de la Autoridad Nacional, la misma que se otorga sólo ante puesta un dictamen técnico positiva de las atribuciones ambientales y sanitarias de conformidad con el ECA-Agua y la LMP(Ley N°29338, 2009).

- a) **ECA-Agua:** Es una herramienta de gestión ambiental que el gobierno peruano determina para medir la concentración de parámetros biológicos, químicos, físicos o sustancias, en el agua como cuerpo receptor que no representen un riesgo grave para la salud del hombre o del ambiente. Definidos y clasificados en función al uso actual o potencial; siendo un indicador o referencia sobre la calidad de las aguas (MINAM, 2017).

Tabla 10

ECA para agua –Categoría 3

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animals
FÍSICOS- QUÍMICOS				
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6.50–8.50	6.50–8.40	
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	
INORGÁNICOS				
Mercurio	mg/L	0.001	0.01	

Nota. Para esta investigación se está considerando solo los parámetros de interés del D.S. N° 004-2017-MINAM, dado que el cuerpo natural río Llallimayo está considerado como categoría 3 (Figuroa, 2022); además del mercurio como contaminante de estas aguas. Fuente: (MINAM, 2017).

2.2.12. Difracción de rayos X

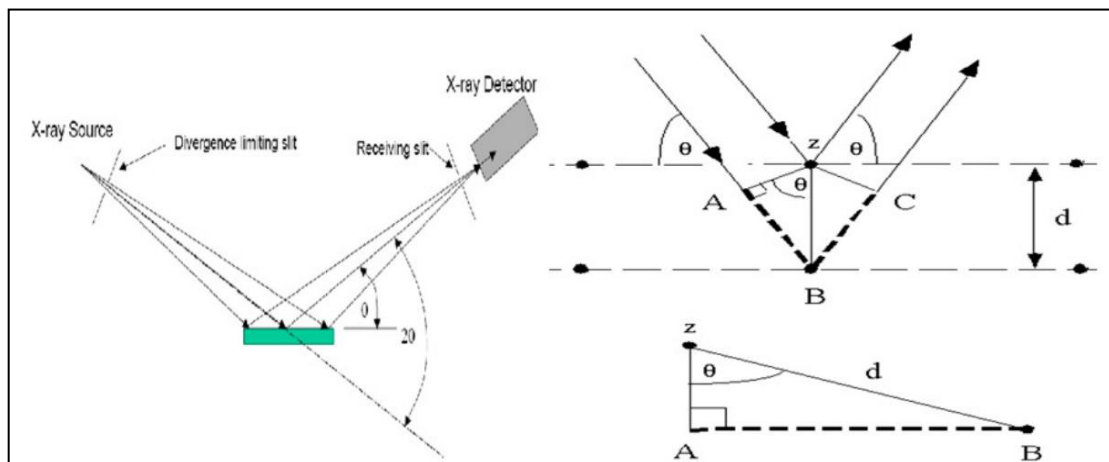
La difracción de rayos X o (XRD) por sus abreviaturas en ingles, es una técnica de caracterización de materiales no destructiva que se utiliza generalmente para el análisis mineralógico cuantitativo y definitivo (Ali et al., 2022). Un instrumento típico de XRD en polvo consta de 04 componentes esenciales: a) fuente de rayos, b) platina de muestra, c) óptica receptora y d) detector de rayos X; de modo que para el análisis, la muestra tamizada se presiona en un portamuestras generando una superficie plana y lisa. Por tanto cuando un manojo de rayos X incide sobre una muestra este es dispersado por los planos atómicos de la muerta, por lo que el ángulo entre el terso de la muestra y la partida de rayos X es θ (ángulo de Bragg) y el ángulo entre la proyección de rayos X y el detector es 2θ . Al elegir el ánodo y la energía de electrones

correctos, se generará una longitud de onda conocida y por lo tanto, un patrón conocido de rayos X (Sharma et al., 2012).

Existe un conjunto único de espaciamiento interplanar e intensidades relativas o un patrón de XRD distinto para cada mineral cristalino o (sólido), que sirve como su huella digital. Por tanto las fases constituyentes se pueden identificar mediante una búsqueda/comparación computarizada de una muestra desconocida, con la base de datos del Centro Internacional de Datos de Difracción (ICDD); precedentemente destacado como Comité Conjunto de Estándares de Difracción de Polvos o (JCPDS) por sus abreviaturas en inglés (Ali et al., 2022).

Figura 12

Características básicas de un difractómetro de rayos X y la Ley de Bragg



Nota.(Sharma et al., 2012).

La ley de Bragg incumbe la longitud de onda (λ) de los rayos X reflejados, la separación por medio de planos atómicos(d) y el ángulo de difracción(θ) de la siguiente manera (Sharma et al., 2012):

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Donde:



n : Indica el orden de reflexión (difracción).

λ : Denota la longitud de onda de los rayos X.

d : Caracteriza el espaciamiento entre planos atómicos.

θ : Representa el ángulo del haz de difracción.

2.2.13. Espectrofotometría de adsorción atómica

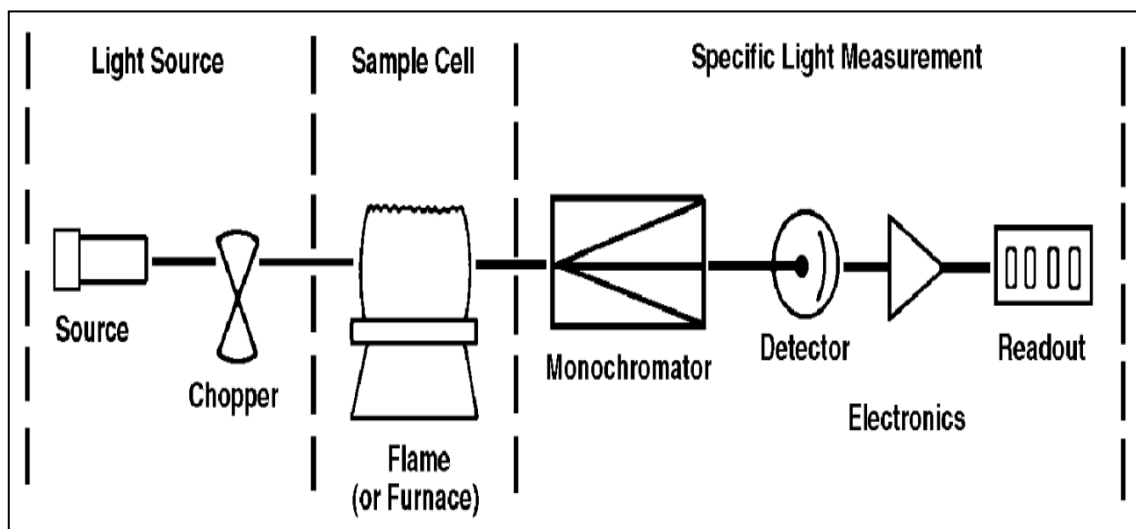
Es una técnica analítica que mide las concentraciones de elementos, es tan sensible que puede detectar hasta partes por billón en una muestra. Principalmente para las mediciones es necesaria una nube de átomos, que es producida proporcionando a la muestra suficiente energía térmica para descomponer los compuestos químicos en átomos libres (esto se consigue aspirando una solución de la muestra en una llama paralela al haz de luz). La generalidad de los átomos permanecerán en su perfil de estado básico en las condiciones adecuadas de la llama, lo que les permitirá absorber la luz con la longitud de onda analítica de una lámpara fuente. Porque cuando un átomo recibe energía, la absorberá y promoverá un electrón exterior a una disposición menos invariable llamada «estado excitado». Dado que este estado es inestable, el átomo volverá instantáneamente al estado de reposo, liberando la energía luminosa. La cantidad de elemento analito presente puede determinarse cuantitativamente midiendo la cantidad de luz absorbida., Siendo necesario construir una curva de calibración ejecutando varias muestras de concentración de elemento conocida en las mismas condiciones que las del elemento desconocido, esto permite calcular la concentración de analito en la muestra desconocida(Beaty & Kerber, 1997).

Un espectrofotómetro de absorción atómica de llama típico consta de los siguientes componentes(Sanjiv, 2022):

- a) Fuente de radiación
- b) Deposito de átomos (llama)
- c) Monocromator
- d) Detector
- e) Dispositivo de lectura

Figura 13

Espectrofotómetro de absorción atómica básico



Nota. (Beaty & Kerber, 1997).

Todos los espectrofotómetros de adsorción atómica de llama disponibles comercialmente utilizan una fuente de radiación que emite el espectro característico del elemento que se va a determinar. Generalmente, la lámpara de cátodo hueco (HCL) se utiliza ampliamente como fuente de radiación; pues es necesario que esta proporcione unas salida constante e intensa de radiación (Sanjiv, 2022). La facilidad y velocidad con la que se pueden realizar determinaciones precisas y exactas con esta técnica han hecho que sea uno de las terminologías más populares para la determinación de metales pesados en aguas.



2.3. Marco Conceptual

2.3.1. Criterio de la calidad del agua

Concentración numérica o enunciado descriptivo recomendado para preservar o mantener los usos destinados del agua en un espacio (cuenca o tramo de río), siendo la base de los reglamentos de control de la contaminación del agua (MAATE, 2015).

2.3.2. Estándar de calidad ambiental para agua

Determina las concentraciones de compuestos o componentes en el agua que no representan un daño para la salud humana o el ambiente; regula ciento cuatro criterios o parámetros para todos los cuerpos de agua naturales del territorio peruano (MINAM, 2017).

2.3.3. Contaminación del agua

Acción y/o consecuencias de agregar al agua sustancias, materiales o elementos que modifiquen sus propiedades físicas, químicas o biológicas y que, en concentraciones suficientemente altas, la hagan no apta para el uso previsto o tengan un efecto adverso sobre las personas, el ambiente en su conjunto y en su mayoría el ecosistema acuático (MAATE, 2015).

2.3.4. Muestra puntual

Una única muestra seleccionada al azar, que refleja la particularidad del agua en el momento y lugar de la recogida la muestra, normalmente para el examen de un conjunto de parámetros o estudios (MAATE, 2015).

2.3.5. Efluente-liquido de actividades minero-metalúrgicas

Cualquiera del flujo consistente o temporal de una sustancia líquida liberado a los cuerpos naturales de agua, provenientes de: a) excavaciones,



movimientos de tierra o trabajos relacionados con la minería o actividades afines; b) instalaciones de procesamiento de minerales; c) sistemas de tratamiento de aguas residuales de minería o afines; d) depósitos de residuos mineros, como depósitos de relaves, desmontes, escorias, etc.; o cualquier combinación de los anteriores (MINAM, 2010).

2.3.6. Bioacumulación

Proceso por el cual una sustancia química se acumula, mediante la cadena alimentaria biológica al pasar de un organismo a otro (EPA, 2024).

2.3.7. pH

Logaritmo negativo de la congregación de iones de hidrógeno, utilizado para expresar acidez (valores por debajo a 7) y alcalinidad (valores por encima a 7) (EPA, 2024).

2.3.8. Adsorción

Proceso mediante el cual compuestos químicos quedan retenidos en la superficie de un mineral o una partícula de suelo (EPA, 2024).

2.3.9. Metal pesado

Los elementos metálicos de alto peso atómico, como Hg, Cr, Cd, As y Pb, tienden a acumularse en la cadena alimentaria y pueden ser tóxicos para los organismos vivos en cantidades traza (EPA, 2024).



CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Diseño de investigación

El diseño de esta investigación es de naturaleza experimental; dado que es una investigación en la que se modifican deliberadamente 01 o más variables autónomas, con el fin de analizar los efectos que estos cambios provocan en 01 o más variables dependientes teniendo en cuenta una situación de control (Hernández Sampieri et al., 2014). Es así que el presente estudio se basa en este diseño, pues se controla de manera intencionada la variable independiente ("zeolita como material adsorbente") con el fin de conocer los efectos que esta causa a la variable dependiente ("remoción de mercurio").

3.2. Tipo de investigación

El tipo de esta investigación es aplicada, puesto que se orienta hacia la resolución de una problemática concreta (contaminación por Hg en agua). Basados en conocimiento científico y tecnológico para resolver perjuicios prácticos (Zeolita como material adsorbente para la remoción de mercurio), proporcionando una solución a perjuicios como del sector social (Sucre y demás áreas aledañas) (Hernández Sampieri et al., 2014).



3.3. Enfoque de la investigación-

El enfoque de esta investigación es cuantitativo, puesto que el tesista plantea o se propone un problema de estudio limitado y preciso que es a la vez secuencial y probatorio. Teniendo en cuenta estudios previos redacta un marco teórico, el cual emana hipótesis y a estas las somete a prueba, con base a datos fundamentados en la medición numérica y el análisis estadístico. Estas recolectadas mediante procedimientos estandarizados y aceptados por la comunidad científica, con el fin principal de demostrar teorías (Hernández Sampieri et al., 2014). En ese entender se contrastará la eficiencia del material natural en estudio como absorbente para la remoción de mercurio, mediante el análisis estadístico de los resultados de las muestras; estas emitidas por el laboratorio.

3.4. Nivel de investigación-

El horizonte de esta tesis es explicativo, pues va más allá de la descripción de un fenómeno. Ya que los estudios explicativos tienen como finalidad explicar las razones detrás de un suceso observable (fenómeno) y en qué escenarios se presenta o por qué se correlacionan 02 o más variables (Hernández Sampieri et al., 2014). En ese contexto, se analizará la composición mineralógica del material para determinar si corresponde a una Zeolita como tal, mediante un proceso exploratorio y análisis en laboratorio. Así poniendo a prueba sus características principales (siendo las causas), que nos permitirá determinar cambios en la variable dependiente "remoción de mercurio" (siendo los efectos); buscando encontrar las razones que provocan el fenómeno.

3.5. Diseño estadístico

El diseño estadístico empleado para esta investigación es el diseño factorial 2^k , ya que permite al investigador poder examinar a profundidad los efectos principales como las interacciones en los tratamientos, estos influenciados por factores (Natoli & Oimoen, 2019). Es decir, que para esta investigación dando como resultado la cantidad en la remoción de mercurio; influenciado por 03 factores y así poder determinar la eficiencia del empleo de zeolita natural del C.P. de Llungo como material adsorbente.

Tabla 11

Factores de influencia en la de remoción de mercurio

Factores de influencia	Nivel (-)	Nivel (+)
Tamaño de partícula	Tamiz N° 50	Tamiz N°80
pH	2.5	7.5
Tiempo de contacto	30 min	120 min

Nota. Para esta investigación serán los 03 factores descritos en la tabla. Fuente: (Natoli & Oimoen, 2019).

3.6. Población y muestras

3.6.1. Población

La población abarca el agua que escurre en la subcuenca Llallimayo sector Sucre, específicamente por el distrito de Llalli de la provincia de Melgar; ubicado en las coordenadas UTM (Este: 298192 mE, Norte: 8346758mS).

3.6.2. Muestra

La muestra corresponde a 25 litros de agua cruda del río Llallimayo sector Sucre (canal principal de la Irrigación Canal N).

Además, la muestra de material zeolítico corresponde a 06 muestras compuestas de los afloramientos del C.P. de LLungo; para fines de estudio mineralógico y su versatilidad en la remoción de mercurio.

3.7. Técnica e instrumentos

a) Técnica

La técnica principal que se dispuso para obtener información en esta investigación fue la observación directa, revisión de artículos científicos, libros y el método estadístico.

b) Instrumentos

En la investigación se utilizó los siguientes instrumentos:

- Guía para el muestreo de suelos
- Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales
- Software estadísticos: Statgraphics, Minitab 18 y Excel
- Cadena de custodia

c) Materiales y equipos

Tabla 12

Materiales, equipos y reactivos empleados en la investigación

Etapa	Materiales	Equipos	Reactivos
Campo-muestreo	Material zeolítico		
	Pala, secas, cintra métrica, bolsas ziploc, guantes de latex, chaleco, cooler y picca de geólogo	GPS	-
	Agua del río Llallimayo sector Sucre		
	Mandil, cubre bocas, guantes de latex, coolers, lavador y envases de muestreo.	GPS	Ácido nítrico (HNO ₃)

Material zeolítico

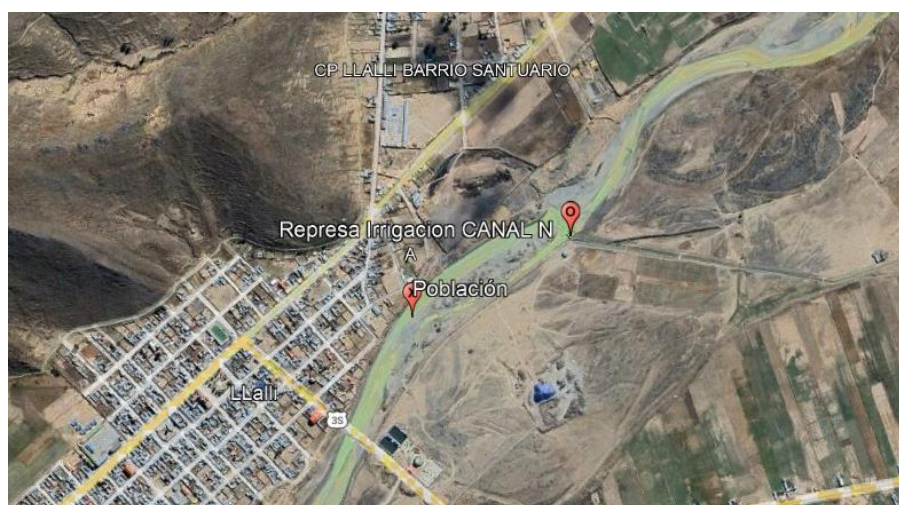
Laboratorio -análisis y tratamiento	Mandil, tamiz N° 200, mortero con pistilo, bolsas ziploc y porta muestras	Equipo de difracción de rayos X	-
Agua del río Llallimayo sector Sucre con el material zeolítico			
	Mandil, guantes de latex, papel kraft, mortero con pistilo, mufla, papel de aluminio, espátula de laboratorio, vasos precitados de 2000 ml, probetas de 1000 ml, embudos, envases de muestro, piseta con agua destilada y tamices (N°80, N°60, N°50 y N°40)	Balanza analítica, pipeta digital, equipo de pruebas de jarras, equipo de espectrofotometría de adsorción atómica, multiparámetro y turbidímetro	Hidróxido de sodio (NaOH) y ácido nítrico (HNO ₃).

3.8. Lugar de estudio

El estudio se realiza en el río Llallimayo sector Sucre, donde a 600 metros al NE aproximadamente se encuentra la bocatoma (Irrigación Canal N). Donde esta capta una parte de las aguas del río en mención, para el uso de riego; localizándose geográficamente en el Dist. de Llalli, Prov. de Melgar del Dpto. de Puno.

Figura 14

Ubicación del lugar de estudio o población

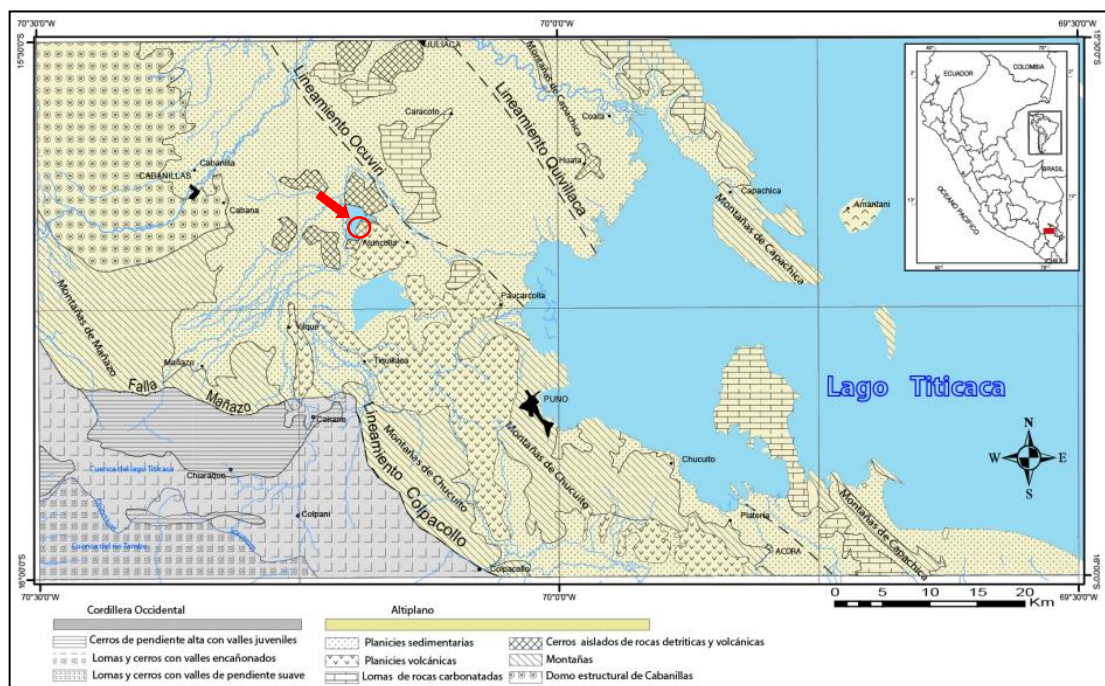


Nota. Río Llallimayo y la Irrigación Canal N. Fuente: Google Earth Pro.

El material zeolítico, del C.P. de Llunco forma parte del cuadrángulo de Puno (Hoja 32v1), ubicándose dentro de las geoformas de cerros aislados de rocas detríticas y volcánicas, que se encuentran al NE de Atuncolla y al SW de la ciudad de Juliaca. Conformada estratigráficamente por las areniscas del Gp. Puno y las secuencias volcánicas del Gp. Mitu (Rodriguez et al., 2020).

Figura 15

Mapa morfoestructural de los cuadrángulos de Puno y Ácora



Nota. Se observa que los afloramientos visitados del centro poblado de Llunco, es parte tanto de las planicies sedimentarias y de los cerros aislados de rocas detríticas y volcánicas. Fuente: (Rodriguez et al., 2020).

3.9. Procedimiento metodológico

Con la intención de lograr los objetivos planteados, nos apoyaremos de la información recopilada de trabajos de tesis, artículos científicos, manuales, guías y otros; con el propósito de respaldar la validez y correcta elaboración del procedimiento metodológico.



Objetivo Específico 1: Determinar la composición mineralógica del material zeolítico localizado al NW del C.P. de Llungo

3.9.1. Recolección de muestras de material zeolítico

Para la ejecución del primer objetivo es necesario desarrollar una primera etapa, que es la de campo. En la que se visita los afloramientos de material zeolítico y se recolecta 06 muestras compuestas de 1kg de peso aprox.; procedimiento llevado a cabo teniendo en consideración la "GUÍA PARA EL MUESTREO DE SUELOS" en el marco del DS N° 002-2013-MINAM, en donde instituye diferentes técnicas de muestro que permiten caracterizar un suelo en estudio. Además de que la elección de la técnica más apropiada a aplicar dependerá del objeto del estudio, las circunstancias meteorológicas, geológicas, edáficas e hidrológicas en el espacio; además de otros aspectos en cuanto a la existencia de contaminación en la superficie del suelo (MINAM, 2014).

Tabla 13

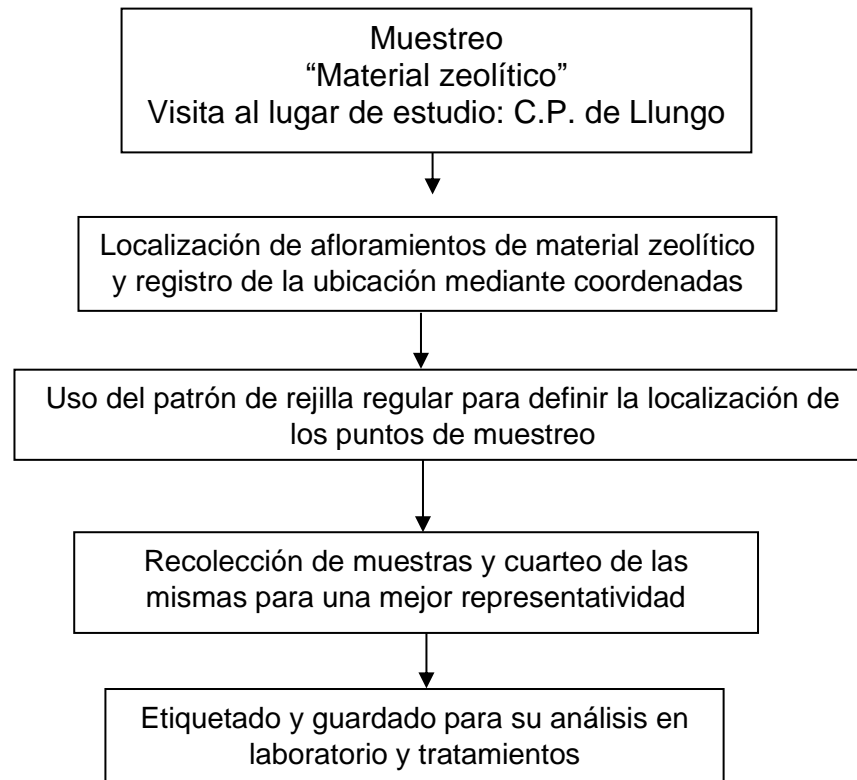
Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo de material zeolítico

Código	Coordenadas UTM (WGS84)		Descripción	Zona
	Este	Norte		
Zeo-01	371992 m E	8264918 m S	A 1 km aprox., al NW de Llungo	19 L
Zeo-02	371071 m E	8264987 m S	A 1.9 km aprox., al NW de Llungo	19 L

Nota. La exploración desde C.P. de Llungo se hizo a pie y preguntando a los pobladores de la zona por irregularidades de color en el suelo.

Figura 16

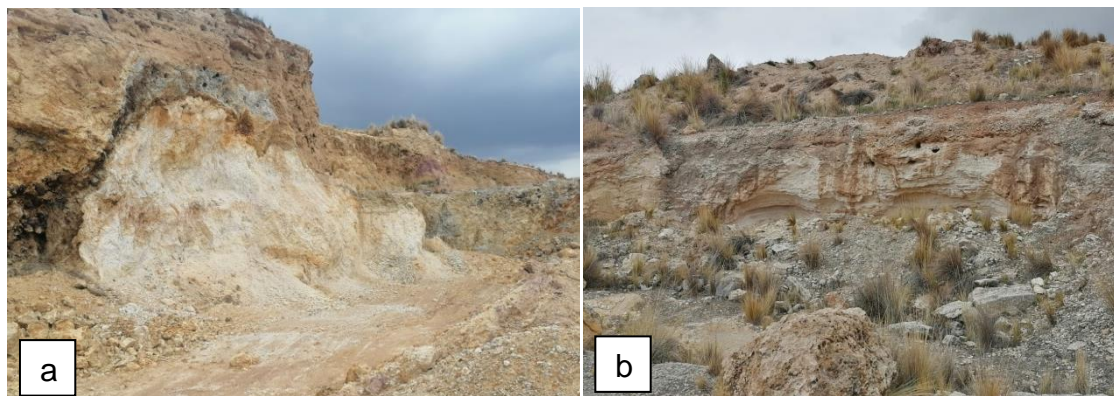
Diagrama para la recolección de muestras de material zeolítico

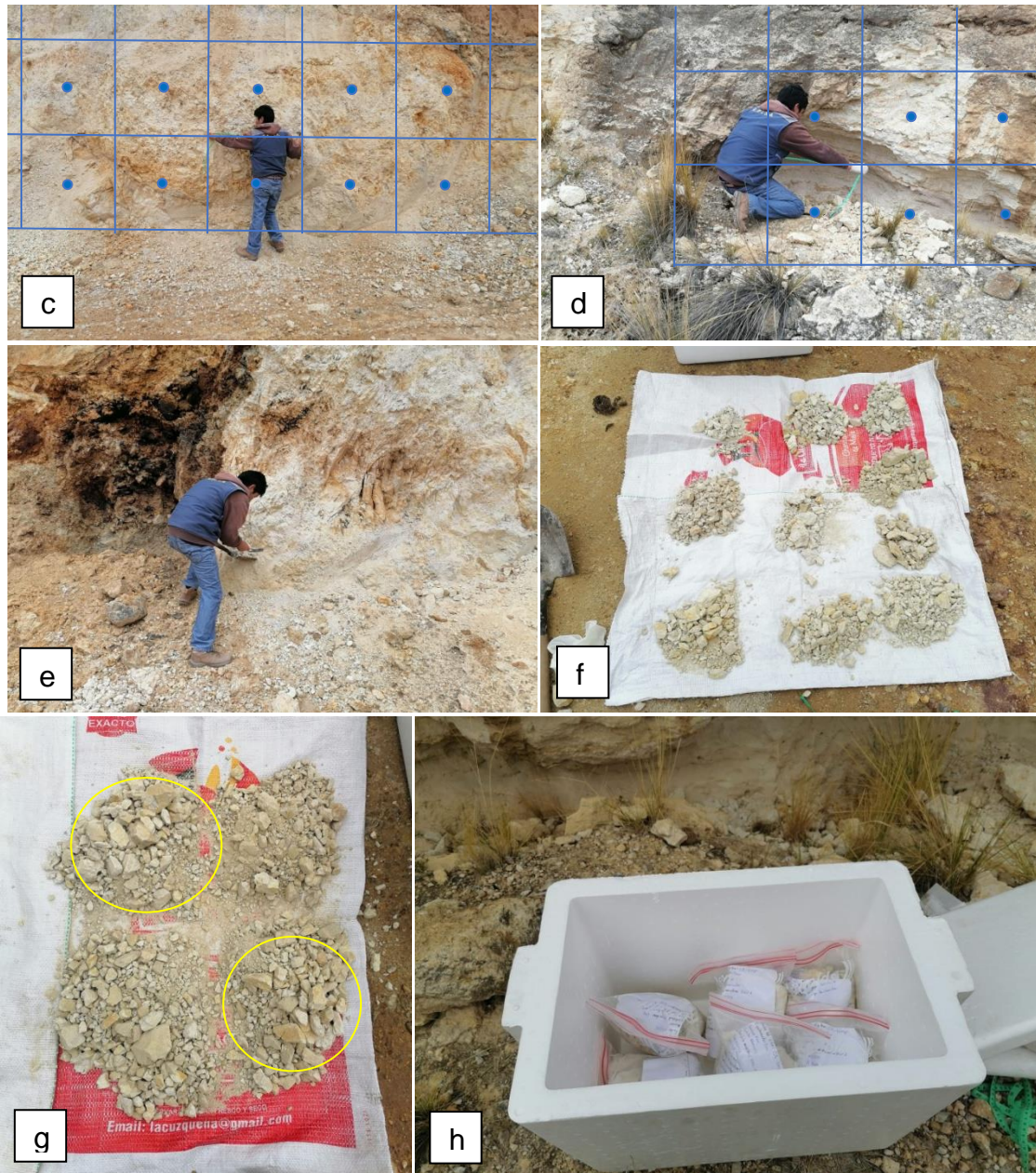


Nota. La recolección del material zeolítico se realiza el 14 de Diciembre del año 2024, inicialmente presentándonos ante las autoridades del C.P. de Llungo; explicando el motivo de la visita y pidiendo la autorización pertinente.

Figura 17

Afloramientos de material zeolítico y su recolección





Nota. a) Primer afloramiento codificado como Zeo-01; b) Segundo afloramiento codificado como Zeo-02; c) y d) Trazado de rejillas con líneas paralelas y perpendiculares equidistantes de 1 m para una mejor suministro de las muestras; e) Muestreo a una profundidad de 0-10 cm del centro de cada celda trazada, con un peso aprox. de 1 kg con ayuda de la pala y picota de geólogo; f) Colección de muestras puntuales de las celdas; g) Cuarteo hasta reducir y obtener 03 muestras compuestas representativas de 1 kg de peso aprox. por afloramiento; h) Etiquetado de las muestras compuestas con información sugerida por la Guía para muestreos de suelos y guardado en bolsas ziploc en un cooler de tecnopor, para su análisis y tratamientos pertinentes en los laboratorios.

3.9.2. Análisis en laboratorio del material zeolítico

Una vez recolectadas las muestras en campo del material zeolítico, se procede con la segunda etapa que es la de laboratorio; en la que es necesaria recurrir nuevamente a la técnica de cuarteo para reducir y obtener 02 muestras representativas. Una para el análisis de composición mineralógica y la otra para los tratamientos a realizar con el agua del canal principal de Irrigación Canal N del sector Sucre del distrito de Llalli.

El laboratorio elegido para el análisis de composición mineralógica es la de Yacimientos Minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (EPIG) de la Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica (FIGIM), de la Universidad Nacional del Altiplano. Donde se efectuó todo el procedimiento, a excepción del cuarteo.

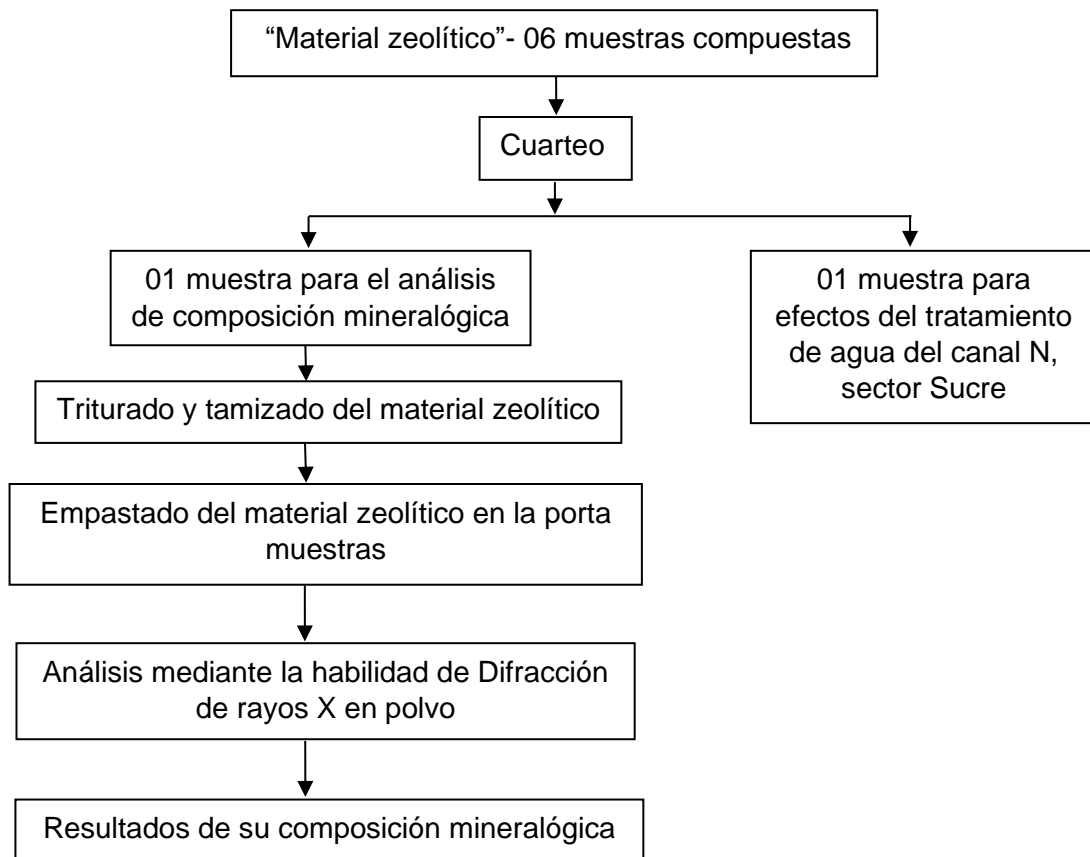
Pasos del análisis por Difracción de Rayos X en polvo:

- Elaboración de la muestra: Debe estar fina (tamiz N° 200) y seca, posteriormente ponerlo en un portamuestras, cerciorando una superficie homogénea y lisa.
- Montaje del difractómetro: Se inserta la muestra en el equipo, a continuación se adecuan los parámetros de ángulo inicial y final (2θ), velocidad de escaneo, voltaje y corriente del tubo de rayos X.
- Irradiación con rayos X: La muestra se exhibe a un haz de rayos X monocromático, para interactuar con los planos atómicos.
- Registro del difractograma : Se registra un grafico de intensidad vs. ángulo de difracción (2θ). Cada pico es un mineral específico.

- Comparación con bases de datos: El difractograma conseguido se contrasta con una base de datos cristalográfica, identificándose las fases minerales/cristalinas presentes.
- Informe de interpretación: Se realiza la estimación cuantitativamente la proporcionalidad relativa de cada fase (software especializado).

Figura 18

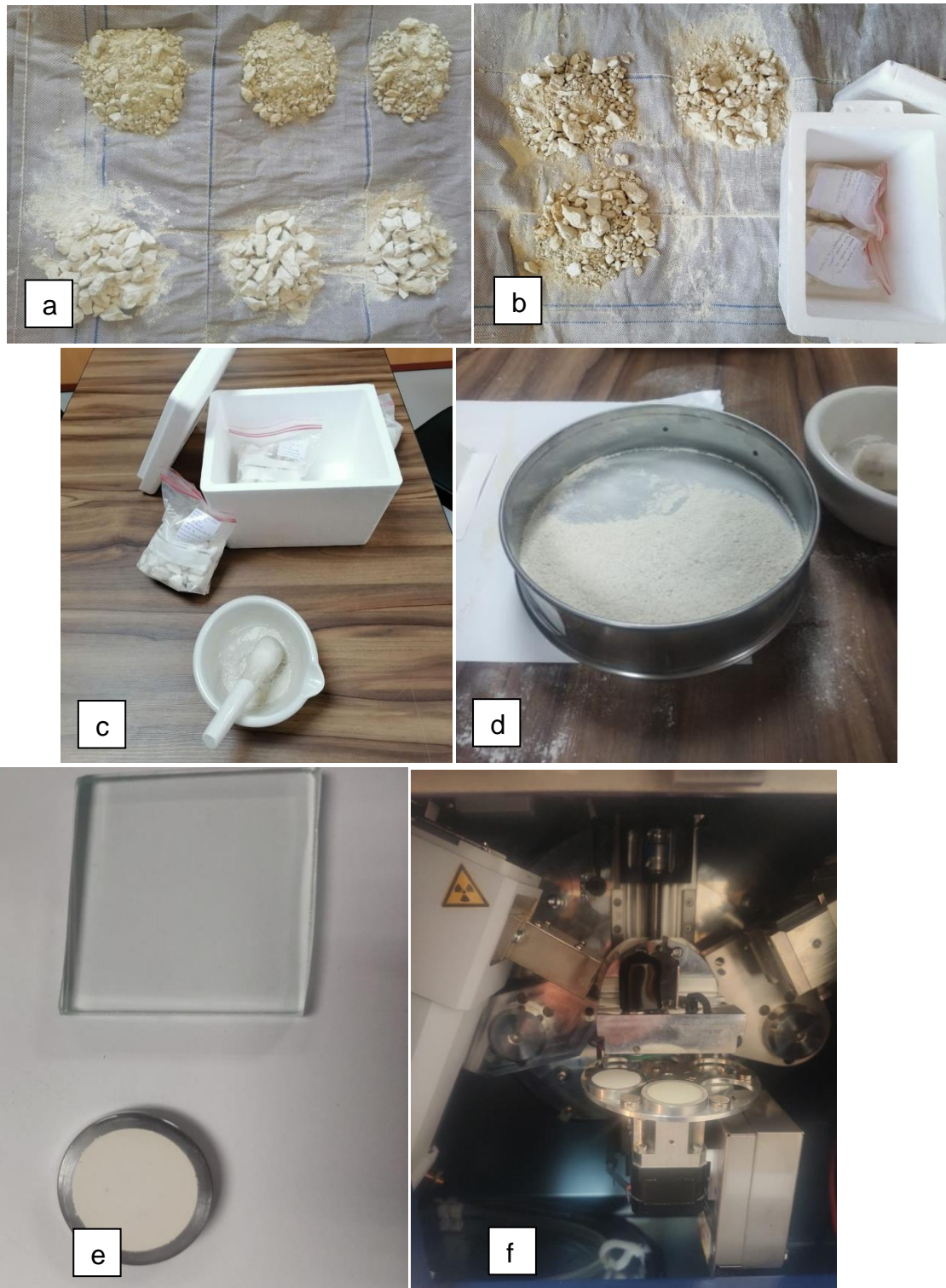
Diagrama para el análisis mineralógico del material zeolítico



Nota. El análisis e interpretación de los resultados de Difracción de rayos X, lo realizaron los laboratoristas encargados del laboratorio de Yacimientos Minerales de la EPIG.

Figura 19

Análisis de la composición mineralógica en laboratorio



*Nota. a) Cuarteo de las 06 muestras de los 2 afloramientos (los 03 superiores corresponden al primer afloramiento y los 03 inferiores al segundo afloramiento);
b) Etiquetado de las 02 muestras compuestas de 1 kg de peso aprox.;*



codificadas como (ZNL-7 “destinado para el análisis de composición mineralógica en el laboratorio de Yacimientos Minerales de la EPIG”, y ZNL-8 “destinado para el tratamiento de agua del canal principal de Irrigación Canal N en el laboratorio de Calidad Ambiental de la EPISA”), guardado en bolsas ziploc en un cooler de tecnopor;c) Triturado del material zeolítico con ayuda del mortero y pistilo; d) Tamizado del material zeolítico a malla N° 200; e) Empastado del material zeolítico hasta obtener una superficie lisa y uniforme; f) Análisis de Difracción de rayos X en polvo del material zeolítico “ZNL-7” de las muestras compuestas de los afloramientos del centro poblado de LLungo.

Metodología para la comparación mineralógica mediante Difracción de rayos X:

Teniendo como objetivo comparar la composición mineralógica de una muestra de zeolita natural recolectada en campo con una muestra patrón de clinoptilolita u otros, utilizando la técnica de DRX como método comparativo indirecto.

- a) Identificación de las fases minerales
 - Se compara cada difractograma con el banco de datos (ICDD) para identificar las fases minerales presentes.
 - Se registra la presencia, ausencia o intensidad relativa de picos asociados a clinoptilolita y otras fases (cuarzo, feldespatos, carbonatos, etc.).
- b) Comparación cualitativa de picos
 - Se comparan los principales picos de clinoptilolita con los de la muestra de campo.
 - Se analiza la coincidencia de posiciones y formas de los picos.
- c) Validación indirecta de similitud



- Se evalúa si la muestra de campo presenta una difracción compatible con la estructura de la clinoptilolita.
- Se determina si es una zeolita clinoptilolita o una mezcla de fases zeolíticas diferentes.

Así estableciendo el grado de similitud mineralógica entre ambas muestras, infiriendo la pureza y tipo de zeolita presente en la muestra de campo de forma indirecta mediante comparación estructural.

Objetivo Específico 2: Determinar la concentración de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre

3.9.3. Recolección de muestras de agua del río Llallimayo sector Sucre

Para la ejecución del segundo objetivo solo es necesaria la etapa de campo. En la que se visita el distrito de Llalli de la jurisdicción de Melgar con la intención de muestrear agua de la irrigación Canal N, pues una parte de las aguas del río Llallimayo es represada por una bocatoma y utilizada para riego mediante el canal en mención durante los meses de setiembre a diciembre por la menor frecuencia e intensidad de lluvias (Cano & Atajo, 2019).

Las muestras de agua se recogieron teniendo en cuenta el "PROTOCOLO NACIONAL PARA EL MONITOREO DE LA CALIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES" admitido mediante la Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA, donde normaliza los criterios e instrucciones técnicas para la toma de muestras de aguas continentales y marino costeros. Permitiendo minimizar errores y tomar datos confiables; para que los diferentes niveles de gobierno tomen decisiones de manera informada (ANA, 2016).

Tabla 14

Manejo de las muestras de agua según del parámetro a evaluarse

Parámetro	Tipo de recipiente	Condiciones de preservación y / o almacenamiento	Tiempo almacenamiento máximo
Químico-físicos			
pH	Plástico y/ o vidrio	Determinar preferentemente en el lugar	24 horas
Temperatura	Plástico y/ o vidrio	Determinar preferentemente en el lugar	Inmediatamente
Turbiedad	Plástico y/ o vidrio	Determinar preferentemente in-situ. Almacenar muestras a oscuras o usar botellas oscuras	24 horas
Metales y metaloides			
Mercurio	Plástico y / o vidrio	Acidificar a pH 1-2 con HNO ₃	6 meses

Nota. Parámetros de interés para esta investigación, extraídos del Anexo VII del Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales. Fuente: (ANA, 2016).

Pasos del empleo de la técnica de espectrofotometría de adsorción

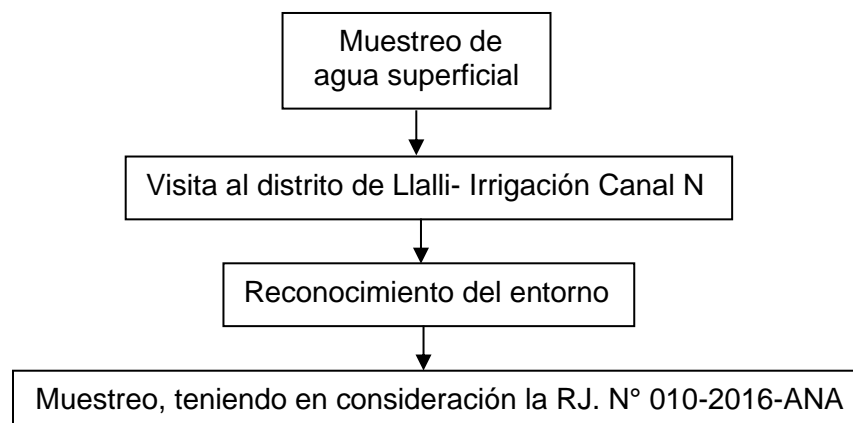
atómica:

- Preparación de la muestra : Inicialmente se filtra la muestra para prescindir sólidos suspendidos y acondicionarlo a un pH ácido.
- Preparación de estándares : Se preparan soluciones patrón con concentraciones destacadas del metal a examinar, estas son útiles para calibrar el equipo (curva de calibración).

- Ajuste del espectrofotómetro: Se opta por la lámpara de cátodo hueco del metal particular a evaluar, de seguida se adecuan también la longitud de onda óptima, como los parámetros de: corriente de la lámpara, ancho de la banda y gas de la llama.
- Atomización: La muestra líquida se nebuliza (aerosol) y entra a la llama, convirtiéndose en átomos libres en fase gaseosa.
- Medición de la absorción: Un haz de luz monocromática (de la lámpara de cátodo hueco) transita a través de la nube de átomos en llama y esos atraen la luz a una longitud de onda específica. Y esta cantidad de luz adsorbida es proporcional a la concentración del metal.
- Lectura y comparación: Se calcula la absorbancia de la muestra, comparándolo con la curva de calibración
- Informe de resultados: Se adquiere la concentración del metal usualmente en unidades de mg/L o ug/L.

Figura 20

Diagrama para el muestreo de agua del río Llallimayo, sector Sucre



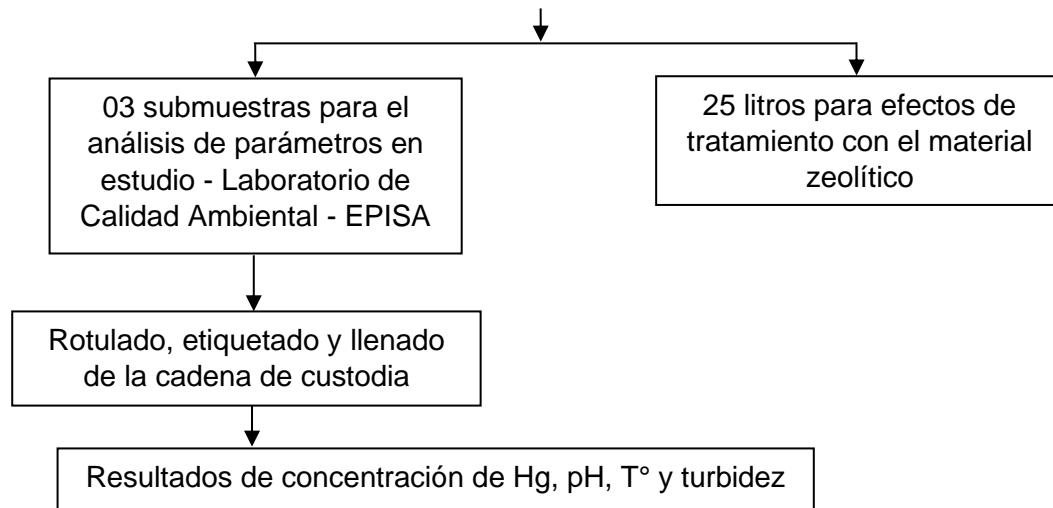


Figura 21

Muestreo de agua del río Llallimayo, sector Sucre





Nota. a) Recolección de agua en un lavador a una profundidad de 15 cm para soslayar la contaminación de las muestras por remoción de sedimentaciones de lo profundo; b) Muestreo de 03 submuestras en envases de plástico enjuagados 03 veces con el agua recolectada para el análisis de los parámetros en estudio (01 envase para el Hg considerando un espacio de 1% del total del envase para su preservación con HNO₃, 01 envase para pH y 01 envase para turbiedad y temperatura); c) Rotulado, etiquetado de las 03 submuestras; d) Llenado de la cadena de custodia; e) Recolección de 25 litros de agua restante del lavador para efectos de tratamiento con el material zeolítico (02 envases de plástico de 10 litros de capacidad y 02 envases de plástico de 2.5 litros de capacidad (embaces enjuagados 03 veces con el agua recolectada y considerando un espacio de 1% del total del envase para su preservación con HNO₃); f) Muestras recolocadas del canal principal Irrigación Canal N. (Se recolecta agua en un solo recipiente para tener uniformidad de resultados tanto del análisis de Hg y efectos de tratamiento con el material zeolítico)

Para alcanzar el objetivo general el parámetro de prioridad es la concentración de mercurio en agua, pero también siendo necesarias contar con parámetros como la temperatura, turbidez y en particular el pH para una mejor interpretación de los resultados. Así entregándose 03 submuestras al laboratorio de Calidad Ambiental de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambienta (EPISA) de la UANCV-Juliaca.

Donde los resultados se obtuvieron mediante los siguientes métodos:

Tabla 15*Metodologías de análisis para los parámetros de interés*

Parámetro	Método de análisis
Temperatura	Multiparámetro
pH	Multiparámetro
Turbidez	Turbidímetro
Mercurio	Espectrofotometría de adsorción atómica

Nota. El muestreo se realizó el 16 de Diciembre de 2024, teniendo un solo punto de muestreo con código P1; con coordenadas E: 299117 y N: 8346873.

Tanto la muestra del material zeolítico y del agua, se recolectaron mediante un discernimiento no probabilístico por provecho; puesto que la elección de las muestras no dependen de la probabilidad, sino que la elección está orientado por las características específicas de la investigación en lugar de buscar una representatividad estadística rigurosa (Hernández Sampieri et al., 2014).

En cuanto a la muestra de agua cruda se muestrea debido a que, en la parte alta donde se ubica esta empresa extractiva a tajo abierto; viene provocando la contaminación del río Azufrini con óxidos y sedimentos de carbonato de calcio por encima de los estándares de calidad; para contrarrestar As, Hg, Pb y otros (Soloisolo, 2019; Velarde, 2022). Que van a parar al cauce del río Llallimayo, dado que ese río Azufrini juntamente con el río Pataqueña dan origen al río Chacapalca, que al juntarse con el río Vilcamarca conforman al río Ocuvi, y este aguas más abajo toma el nombre de río Llallimayo, puesto que está de paso por el distrito de Llalli (Cano & Atajo, 2019); llegando así a la zona Sucre, que es parte de este ultimo distrito en mención.



Objetivo Especifico 3: Determinar la cantidad de remoción de mercurio después de realizar el tratamiento con zeolita, con la influencia de 3 factores (tiempo de contacto, pH y tamaño de partícula)

Para la ejecución del tercer objetivo nos apoyaremos del diseño factorial 2^3 , pues en este tipo de metodológica el investigador puede examinar tanto los efectos principales (efecto de las variables independientes sobre la variable dependiente), como las interacciones (efecto de la interacción entre las variables independientes sobre la variable dependiente) asociados con factores categóricos y continuos (Natoli & Oimoen, 2019).

Tabla 16

Matriz del diseño experimental

Tratamiento	Factores		
	Tamaño de partícula	pH	Tiempo de contacto
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Nota. Se muestra el diseño factorial 2^k con 3 factores, cada uno con dos niveles; codificados como bajo (-) y al alto (+) (Natoli & Oimoen, 2019). Que para esta investigación los niveles bajos serían (tamiz N° 50, pH 2.5 y tiempo de contacto 30 min.) y los niveles altos serían (tamiz N° 80, pH 7.5 y tiempo de contacto 120min.).



Tabla 17

Diseño factorial 2³ con interacciones

Run	Etiqueta	Effects						
		A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	(1)	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	a	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	b	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	ab	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	c	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	ac	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	bc	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	abc	1	1	1	1	1	1	1

Nota. Al utilizar un diseño factorial, el experimento examina todas las combinaciones posibles de niveles para cada factor. Fuente: (Natoli & Oimoen, 2019).

a) Estimación de efectos principales

$$A = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - b - c - bc - (1)]$$

$$B = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - a - c - ac - (1)]$$

$$C = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - a - b - ab - (1)]$$

Donde:

n: Número de replicas

b) Estimación de las interacciones

$$AB = \frac{1}{4n} [(1) + ab + c + abc - a - b - ac - bc]$$



$$AC = \frac{1}{4n} [(1) + b + ac + abc - a - c - ab - bc]$$

$$BC = \frac{1}{4n} [(1) + a + bc + abc - b - c - ab - ac]$$

$$ABC = \frac{1}{4n} [a + b + c + abc - (1) - ab - ac - bc]$$

Donde:

n : Número de replicas

c) Sumatoria de cuadrados para el análisis de varianza

$$SS_A = \frac{1}{8n} [a + ab + ac + abc - b - c - bc - (1)]^2$$

$$SS_B = \frac{1}{8n} [b + ab + bc + abc - a - c - ac - (1)]^2$$

$$SS_C = \frac{1}{8n} [c + ac + bc + abc - a - b - ab - (1)]^2$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{8n} [(1) + ab + c + abc - a - b - ac - bc]^2$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{8n} [(1) + b + ac + abc - a - c - ab - bc]^2$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{8n} [(1) + a + bc + abc - b - c - ab - ac]^2$$

$$SS_{ABC} = \frac{1}{8n} [a + b + c + abc - (1) - ab - ac - bc]^2$$

Donde:

n : Número de replicas

d) Sumatoria de cuadrados totales para el análisis de varianza

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC} + SS_E$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n (y_{ijkl} - \bar{y} \dots)^2$$

Donde:

a, b, c : Son los niveles de cada tratamiento

n : Número de replicas

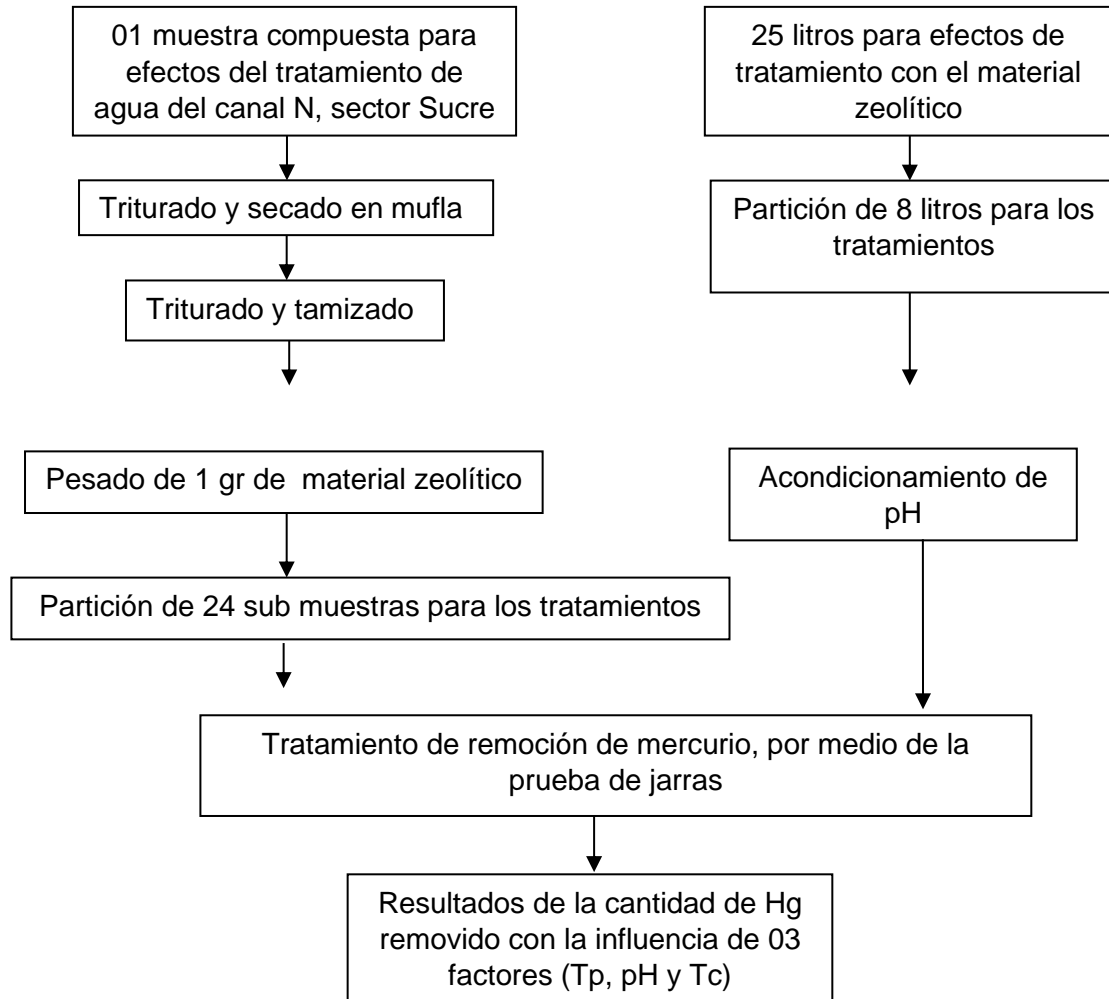
y, \bar{y} : Diferencia de la medida de las medias

Tabla 18*Tabla del análisis de varianza*

Fuente	SS	GL	MS	Fo
A	SS_A	1	MS_A	MS_A/MS_E
B	SS_B	1	MS_B	MS_B/MS_E
C	SS_C	1	MS_C	MS_C/MS_E
AB	SS_{AB}	1	MS_{AB}	MS_{AB}/MS_E
AC	SS_{AC}	1	MS_{AC}	MS_{AC}/MS_E
ABC	SS_{ABC}	1	MS_{ABC}	MS_{ABC}/MS_E
Error	SS_E	N-8	MS_E	
Total	SS_T	N-1		

Figura 22

Diagrama para la determinación de la remoción de Hg

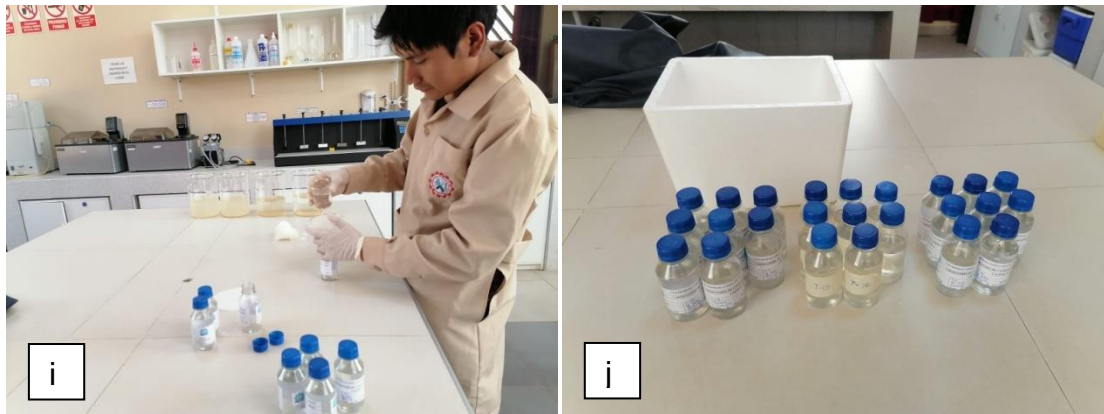


Nota. Para obtener los resultados ordenadamente, el tratamiento se realizó en 04 vasos precipitados de 1 L a un primer tiempo de 30 min. y otro 04 vasos precipitados de 1L a un segundo tiempo de 120 min. Así realizándose la primera corrida, repitiéndola 2 veces más para la investigación planteada.

Figura 23

Determinación de la cantidad de remoción de Hg





Nota. a) Triturado de la muestra de material zeolítico codificado como ZNL-8; b) Secado en la mufla durante 8 hrs a 100 °C para reducir al máximo la humedad por estar expuesto al clima local; c) Tamizado a malla N° 80 y 50 “material retenido después del triturado manual”; d) Pesado de 1 gr. de material zeolítico, tanto de la malla N° 80 (12 submuestras) y 50 (12 submuestras) en la balanza analítica; e) Las 24 submuestras de material zeolítico de 1 gr. de peso para los tratamientos en la prueba de jarras, utilizados solo 8 por repetición según la tabla N° 16; f) Partición de 8 litros de muestra de agua para la primera repetición en 4 vasos precipitados de 2 litros de capacidad, pues el experimento se realizó en un litro de agua por tratamiento; g) Acondicionamiento de pH con ayuda del multiparámetro, pipeta digital y reactivos (NaOH para subir el pH y H₂SO₄ para bajar el pH), por vaso precipitado según la tabla N° 16; h) Tratamiento de agua del río Llallimayo sector Sucre a diferentes condiciones de acuerdo con la tabla N° 16 a 150 RPM; i) Filtrado de los tratamientos con ayuda de un embudo, papel filtro y un vaso precipitado para coleccionar las muestras de los tratamientos; j) Los 24 tratamientos realizados en el laboratorio de Calidad Ambiental de la EPISA, listos para sus análisis de contenido de mercurio mediante la técnica de espectrofotometría de adsorción atómica.

Para conocer la cantidad en la remoción de mercurio, será necesario utilizar la concentración inicial registrado en el informe de resultados del laboratorio de Calidad Ambiental de la EPISA, sustituyéndolos en la siguiente fórmula:

$$R = C_{in} - C_{out}$$



Donde:

R : Remoción.

C_{in} : Concentración de entrada.

C_{out} : Concentración de salida.

Ya que la remoción es una cantidad que expresa cuanto se logra sacar o eliminar en un proceso.

Objetivo General: Analizar la eficiencia de la zeolita como material adsorbente en la remoción de mercurio en agua del río Llallimayosector

Sucre

3.9.4. Determinación de la eficiencia en la remoción de mercurio

Para la ejecución del objetivo general es necesario utilizar los resultados del objetivo específico 3, reemplazándolos en la siguiente fórmula:

$$E(\%) = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}}$$

Donde:

$E(\%)$: Porcentaje de eficiencia en la remoción.

C_{in} : Concentración de entrada.

C_{out} : Concentración de salida.

Ya que la eficiencia es un porcentaje, que expresa que tan efectivo fue el proceso para sacar el contaminante. En este caso el uso de zeolita como material adsorbente en la remoción de mercurio. Para las observaciones se empleó el análisis de varianza y tukey con respecto a la eficiencia de los 24 tratamientos.



3.9.5. Estadísticos utilizados en el análisis de datos

Para la evaluación de los datos se utilizó los softwares estadísticos Minitab 18, Statgraphics, Excel y para la validación de las hipótesis formuladas se usó el estadístico paramétrico "distribución T de Student"; con un nivel de significancia del 5.0% y 95.0% de confianza.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados

Objetivo Específico 1: Determinar la composición mineralógica del material zeolítico localizado al NW del C.P. de Llungo

4.1.1. Análisis mineralógico por medio del método de difracción de Rayos

X

La composición mineralógica del material zeolítico realizado en el laboratorio de Yacimiento Minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la UNA-Puno; por el método de difracción de Rayos X en polvo, muestra el siguiente resultado:

Tabla 19

Composición mineralógico del material zeolítico

Nombre del mineral	Formula general	Resultado aproximado (%)
Carbonato de calcio	CaCO_3	81.34
Cuarzo	SiO_2	7.47
Serandita	$\text{Mn}_{1.924}\text{Na}(\text{HSi}_3\text{O}_9)$	2.13
Silicato de magnesio	MgSiO_3	4.79
Selanato de potasio	$\text{K}_2\text{O}_4\text{Se}$	1.69
Labradorita	$\text{Al}_{0.824}\text{Ca}_{0.317}\text{Na}_{0.183}\text{O}_4\text{Si}_{1.174}$	2.58

Nota. Resultados correspondientes a la muestra ZNL-7, analizadas en el laboratorio de Yacimientos Minerales de la EPIG.

Podemos notar que la composición mineralógica de la muestra ZNL-7, está conformada por una cuantiosa cantidad de carbonatos (CaCO_3), además de en menor proporción de tectosilicatos (SiO_2 y $\text{Al}_{0.824}\text{Ca}_{0.317}\text{Na}_{0.183}\text{O}_4\text{Si}_{1.174}$), inosilicatos ($\text{Mn}_{1.924}\text{Na}(\text{HSi}_3\text{O}_9)$ y MgSiO_3) (Klein & Hurlbut, 1997) y selanato de potasio.

Objetivo Específico 2: Determinar la concentración de mercurio en agua del río Llallimayo, sector Sucre

4.1.2. Determinación de la concentración de mercurio y otros parámetros

Los aguas del río Llallimayo, sector Sucre analizadas en el laboratorio de Calidad Ambiental de la EPISA-UANCV, muestra los siguientes resultados:

Tabla 20

Concentración de mercurio y otros parámetros

Parámetro	Unidad	P1
Temperatura en laboratorio	°C	13.7
Potencial de hidrógeno	Unid. de pH	7.44
Turbidez	NTU	35.7
Mercurio	mg/L	0.00342

Nota. Resultados correspondientes a las 03 submuestras tomadas en el canal principal de irrigación "Canal N"; aguas que pertenecen a la categoría 3 según la Autoridad Nacional del Agua (Figuroa, 2022).

A partir de los resultados obtenidos podemos inferir que las aguas del río Llallimayo sector Sucre del distrito de Llalli; que la concentración de mercurio sobrepasa en 3.42 veces más a lo estipulado en el Estándar de Calidad Ambiental para agua "categoría 3-D1", establecido en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. En cuanto a la temperatura y pH está entre los rangos normales según la normativa, sin embargo el parámetro de turbidez para la "categoría 3-D1" no está considerado en esa categoría.

Objetivo Específico 3: Determinar la capacidad de remoción de mercurio después de realizar el tratamiento con zeolita, con la influencia de 3 factores (tiempo de contacto, pH y tamaño de partícula)

4.1.3. Determinación de la remoción de mercurio con el material zeolítico

Los tratamientos realizados con el agua del río Llallimayo, sector Sucre del distrito de Llalli y el material zeolítico ubicado al NW del centro poblado de Llungo; según la Tabla N° 16 con 3 repeticiones por tratamiento, muestra los siguientes resultados:

Tabla 21

Porcentaje de remoción por tratamiento

Código	C _{in} (Hg) mg/L	C _{out} (Hg) mg/L	Cantidad de Remoción (mg/L)
T – 1	0.00342	0.00302	0.00040
T – 2	0.00342	0.00299	0.00043
T – 3	0.00342	0.00283	0.00059
T – 4	0.00342	0.00272	0.00070
T – 5	0.00342	0.00234	0.00108
T – 6	0.00342	0.00193	0.00149
T – 7	0.00342	0.00171	0.00171
T – 8	0.00342	0.00177	0.00165
T – 9	0.00342	0.00144	0.00198
T – 10	0.00342	0.00166	0.00176



T – 11	0.00342	0.00165	0.00177
T – 12	0.00342	0.00122	0.00220
T – 13	0.00342	0.00150	0.00192
T – 14	0.00342	0.00107	0.00235
T – 15	0.00342	0.00113	0.00229
T – 16	0.00342	0.00092	0.00250
T – 17	0.00342	0.00110	0.00232
T – 18	0.00342	0.00085	0.00257
T – 19	0.00342	0.00074	0.00268
T – 20	0.00342	0.00067	0.00275
T – 21	0.00342	0.00100	0.00242
T – 22	0.00342	0.00123	0.00219
T – 23	0.00342	0.00100	0.00242
T – 24	0.00342	0.00135	0.00207

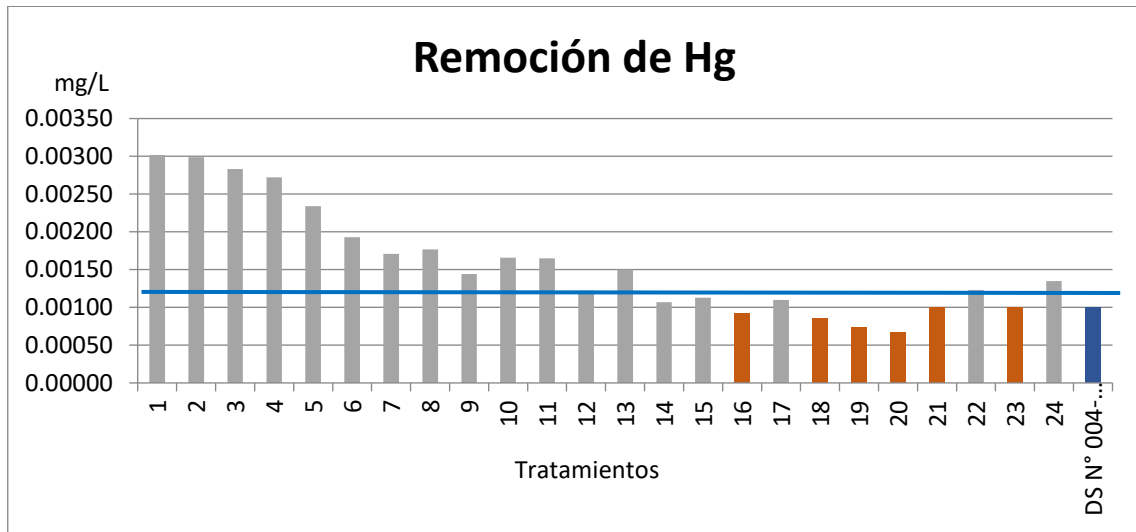
Nota. Tratamientos realizados en el laboratorio de Calidad Ambiental de la EPISA con la muestra de material zeolítico “ZNL-8” y agua del canal principal irrigación “Canal N”. Los tratamientos del 1 al 8 corresponden a la primera repetición, del 9 al 16 la segunda y 17 al 24 la tercera.

Podemos notar que en la primera repetición, la cantidad de remoción más alto lo tiene el tratamiento N° 7 con un 0.00171 mg/L. En la segunda repetición el tratamiento N° 16 con un 0.00250 mg/L de remoción y en la última repetición el tratamiento N° 20 con un 0.00275 mg/L de remoción; siendo esta la cantidad más alta, no obstante como valor mínimo de remoción se tiene el tratamiento N° 1 con un 0.00040 mg/L.

Luego de realizar los tratamientos con el material zeolítico y el agua del río Llallimayo sector Sucre del distrito de Llali; solo los valores de los tratamientos N° 16, 18, 19, 20, 21 y 23 estarían cumpliendo el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM/ condición 3-D1 (riego de vegetales/agua para riego restringido).

Figura 24

Remoción de mercurio



Nota. Resultados comparados con el DS N° 004-2017-MINAM/ Categoría 3-D1, pues las aguas en estudio son destinadas para riego por medio de la irrigación Canal N.

Tabla 22

Matriz de efectos principales

Tratamiento	Efectos		
	A	B	C
1	0.00302	0.00144	0.00110
2	0.00299	0.00166	0.00085
3	0.00283	0.00165	0.00074
4	0.00272	0.00122	0.00067
5	0.00234	0.00150	0.00100
6	0.00193	0.00107	0.00123
7	0.00171	0.00113	0.00100
8	0.00177	0.00092	0.00135

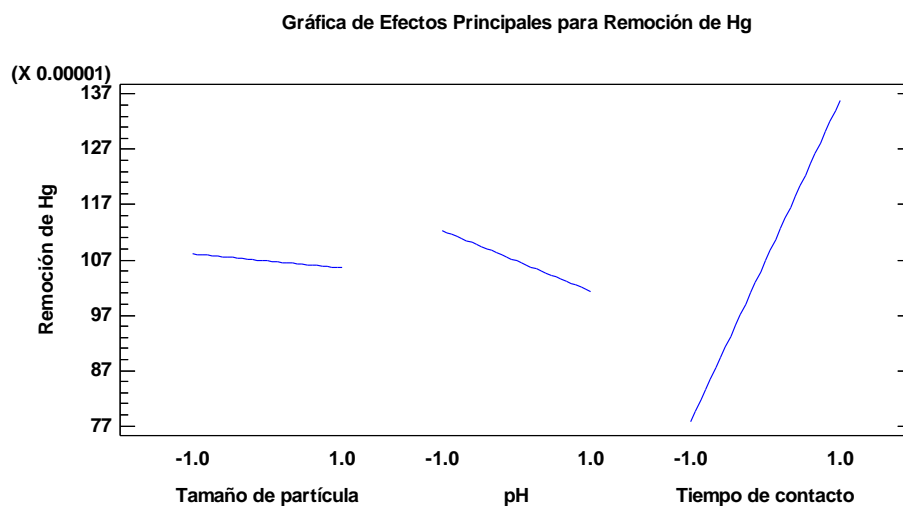
Nota. Se tiene como efectos principales "A" (tratamientos 1-8), "B" (tratamientos 9-16) y "C" (tratamientos 17-24).

Podemos notar que en la primera repetición las concentraciones de mercurio están por encima al 0.001 mg/L; en la segunda repetición solo el

tratamiento N° 16 (tamiz N° 80, pH 7.5 y Tc 120 min.) está por debajo del 0.001 mg/L. En la tercera repetición los tratamientos N° 18 (tamiz N° 80, pH 2.5 y Tc 30 min.), N° 19 (tamiz N° 50, pH 7.5 y Tc 30 min.), N° 20 (tamiz N° 80, pH 7.5 y Tc 30 min.), N° 21 (tamiz N° 50, pH 2.5 y Tc 120 min.) y N° 23 (tamiz N° 50, pH 7.5 y Tc 120 min.) están por debajo del 0.001 mg/L, en cambio el resto está por encima del 0.001 mg/L (comparando con el DS N° 004-2017-MINAM/riego de vegetales-agua para riego restringido).

Figura 25

Gráfica de efectos más relevantes para la remoción de mercurio



Nota. Datos procesados de la Tabla N°20 en Statgraphics, de manera aleatoria para reducir el error experimental

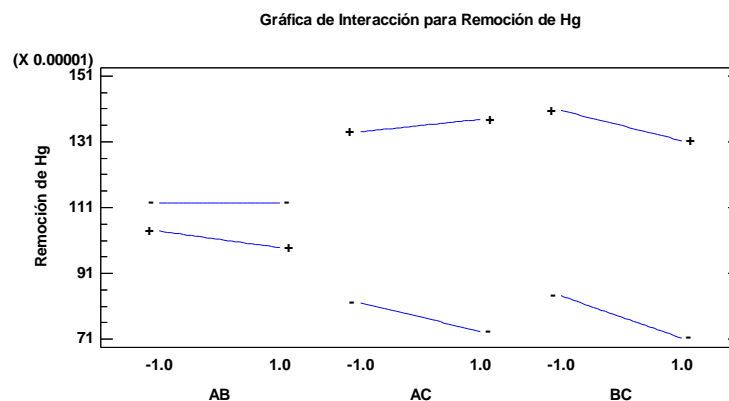
Se observa, que para el efecto principal del factor “tamaño de partícula”, la línea correspondiente a este factor es prácticamente casi horizontal, indicando que el tamaño de partícula tiene un efecto mínimo sobre la remoción de mercurio; pero con resultados más favorables el uso del Tamiz N° 50 con un diámetro equivalente a 0.300 mm de tamaño de partícula. Esto sugiere que variar el tamaño de partícula entre los niveles bajo (Tamiz N°50) y alto (Tamiz N°80) no produce un cambio significativo estadísticamente en la remoción.

Para el efecto principal del factor “pH”, la línea tiene una ligera pendiente descendente; sugiriendo que a un pH de 7.5 (nivel alto del factor) tiene un efecto ligeramente negativo sobre la remoción de mercurio en comparación a un pH de 2.5 (nivel bajo del factor) que muestra resultados más favorables en la remoción de mercurio en los tratamientos.

Para el efecto principal del factor “tiempo de contacto”, la línea muestra una pendiente pronunciada ascendente, indicando que el tiempo de contacto tiene un efecto positivo significativo estadísticamente sobre la remoción de mercurio. Esto sugiere que a mayor tiempo de contacto (120 min <nivel alto del factor>), la remoción de mercurio es mucho más en comparación con un tiempo de contacto corto (30min <nivel bajo del factor>).

Figura 26

Gráfica de interacciones para la remoción de mercurio



Nota. Datos procesados de la Tabla N°20 en Statgraphics, de manera aleatoria para reducir el error experimental.

Podemos observar que, en la interacción AB (tamaño de partícula*pH), tiene una interacción sinérgica casi visible, pues las líneas casi paralelas indican que no hay una interacción fuerte entre el tamaño de partícula y el pH; pero visiblemente que la interacción del nivel alto (7.5) del factor “pH” con los niveles



bajo (Tamiz N°50) y alto (Tamiz N°80) del factor "tamaño de partícula", la línea es descendente. Indicando que los tratamientos que han sido acondicionados a un medio neutro presentan una disminución en la remoción de mercurio. Estadísticamente sugiriendo que en esta investigación el efecto del tamaño de partícula sobre la remoción de mercurio no cambia significativamente con el pH.

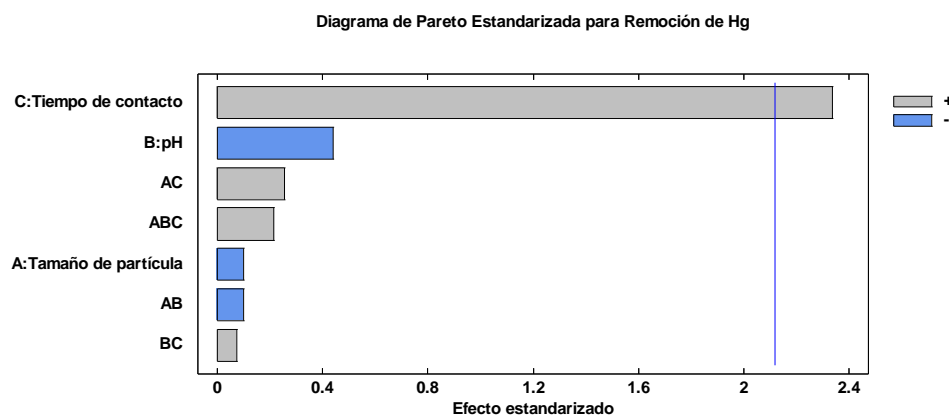
En la interacción AC (tamaño de partícula*tiempo de contacto), tiene una interacción sinérgica marcada; pues las líneas no son paralelas, lo que indica una interacción moderada entre el cuerpo de partícula y el tiempo de empalme. Vale decir que el corolario del tamaño de partícula en la remoción de mercurio depende del tiempo de contacto con una relación casi directa en la variable de respuesta. Puesto que la interacción del nivel alto (120 min) del factor "tiempo de contacto" con los niveles bajo (Tamiz N°50) y alto (Tamiz N°80) del factor "tamaño de partícula" es positiva, mostrando un aumento en la remoción de mercurio con el tiempo. En cambio en la interacción del nivel bajo (30 min) del factor "tiempo de contacto" con los niveles bajo (Tamiz N°50) y alto (Tamiz N°80) del factor "tamaño de partícula" es negativa, reduciéndose la remoción de mercurio

No obstante en la interacción BC (pH*tiempo de contacto), presenta una interacción sinérgica negativa pero más marcada, pues las líneas inclinadas y con poca paralelidad indican una interacción significativa entre el pH y el turno de empalme. Denotando que el fruto del pH sobre la remoción de mercurio varía dependiendo del tiempo de contacto con una relación inversa en la variable de respuesta con la interacción del nivel alto del factor "pH", pero directa en la variable de respuesta con la interacción del nivel bajo del factor. Puesto que la

interacción del nivel alto (120 min) del factor “tiempo de contacto” con los niveles bajo (2.5) y alto (7.5) del factor “pH” es negativa, mostrando una disminución en la remoción de mercurio con el tiempo. Así mismo en la interacción del nivel bajo (30 min) del factor “tiempo de contacto” con los niveles bajo (2.5) y alto (7.5) del factor “pH” la pendiente negativa se mantiene, reduciéndose también la remoción de mercurio.

Figura 27

Grafica de Pareto para la remoción de mercurio



Nota. Datos procesados de la Tabla N°20 en Statgraphics, de manera aleatoria para reducir el error experimental.

La grafica de Pareto Estandarizada muestra que el factor principal más significativo es el de “tiempo de contacto”, puesto que supera el nivel crítico; esto indicando que el tiempo de contacto influye significativamente en la remoción de mercurio. En cuanto al factor principal de “pH” muestra un efecto visible pero no supera el umbral crítico, pero sin embargo sus efectos podrían considerarse moderado en comparación con los demás factores.

Por otra parte el efecto principal de “tamaño de partícula” tiene un efecto menor y no es estadísticamente significativo según el diagrama de Pareto Estandarizada, siendo su contribución relativamente baja en comparación con

los otros factores principales. En cuanto a las interacciones (AB, AC, BC y ABC), de igual modo no muestran un efecto significativo; sugiriendo que los factores principales actúan de manera más independiente en la respuesta (remoción de mercurio).

Tabla 23*Análisis de varianza de la remoción de mercurio*

Fuente	Suma de Cuadrado	Gl	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P
A:Tamaño de partícula	3.75E-9	1	3.75E-9	0.01	0.9213
B:pH	7.26E-8	1	7.26E-8	0.20	0.6645
C:Tiempo de contacto	0.00000203002	1	0.00000203002	5.46	0.0328
AB	3.75E-9	1	3.75E-9	0.01	0.9213
AC	2.40667E-8	1	2.40667E-8	0.06	0.8024
BC	2.01667E-9	1	2.01667E-9	0.01	0.9422
ABC	1.70667E-8	1	1.70667E-8	0.05	0.8331
Error total	0.00000594927	16	3.71829E-7		
Total (corr.)	0.00000810253	23			

Nota. Datos procesados de la Tabla N°20 en Statgraphics, de manera aleatoria para reducir el error experimental.

En la tabla de análisis de varianza podemos notar la configuración numérica de la gráfica de Pareto Estandarizada. Pues para el efecto principal “tiempo de contacto” el Valor-P=0.0328, que estadísticamente es significativo (menor al 0.05); en cambio en el factor principal “pH” el Valor-P=0.6645 siendo mayor al 0.05 sugiriendo que tiene un efecto estadísticamente significativo de manera individual. Además, tanto el factor principal “tamaño de partícula” y las interacciones no son estadísticamente significativos para la remoción de mercurio coincidiendo así sus efectos visualizados en la gráfica de Pareto Estandarizada.



Objetivo General: Analizar la eficiencia de la zeolita como material adsorbente en la remoción de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre

4.1.4. Determinación de la eficiencia en la remoción de mercurio con el material zeolítico

Una vez conocidos la cantidad de remoción podemos determinar la eficiencia en la remoción de mercurio utilizando zeolita como material adsorbente.

Tabla 24

Porcentaje de remoción por tratamiento

Código	C _{in} (Hg) mg/L	C _{out} (Hg) mg/L	% de Eficiencia en la remoción
T – 1	0.00342	0.00302	11.70
T – 2	0.00342	0.00299	12.57
T – 3	0.00342	0.00283	17.25
T – 4	0.00342	0.00272	20.47
T – 5	0.00342	0.00234	31.58
T – 6	0.00342	0.00193	43.57
T – 7	0.00342	0.00171	50.00
T – 8	0.00342	0.00177	48.25
T – 9	0.00342	0.00144	57.89
T – 10	0.00342	0.00166	51.46
T – 11	0.00342	0.00165	51.75
T – 12	0.00342	0.00122	64.33
T – 13	0.00342	0.00150	56.14
T – 14	0.00342	0.00107	68.71
T – 15	0.00342	0.00113	66.96
T – 16	0.00342	0.00092	73.10
T – 17	0.00342	0.00110	67.84
T – 18	0.00342	0.00085	75.15
T – 19	0.00342	0.00074	78.36
T – 20	0.00342	0.00067	80.41
T – 21	0.00342	0.00100	70.46
T – 22	0.00342	0.00123	64.04

T – 23	0.00342	0.00100	70.76
T – 24	0.00342	0.00135	60.53

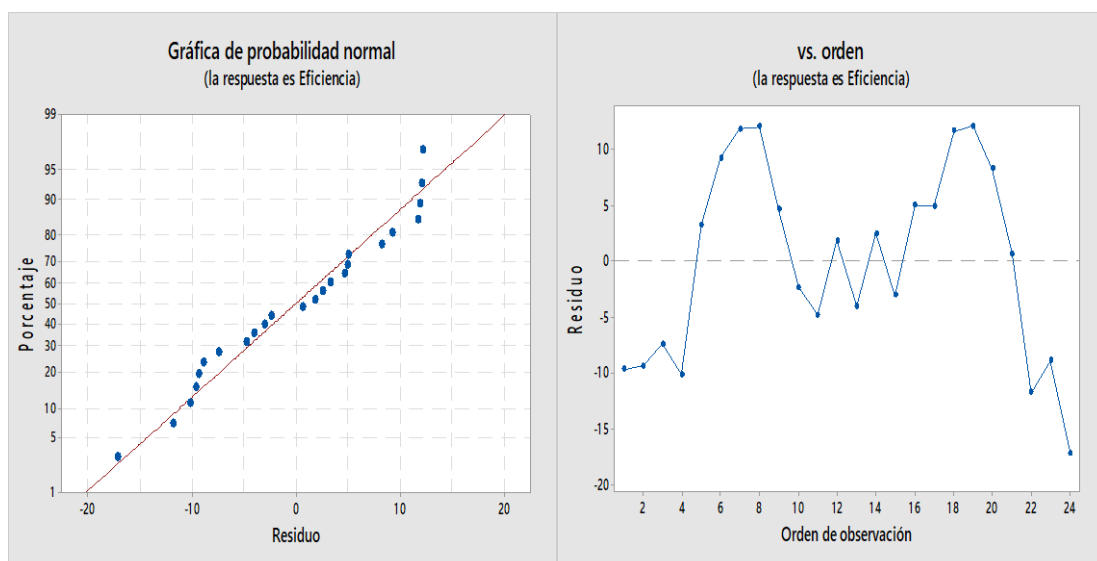
Nota. Tratamientos realizados en el laboratorio de Calidad Ambiental de la EPISA con la muestra de material zeolítico “ZNL-8” y agua del canal principal irrigación “Canal N”. Los tratamientos del 1 al 8 corresponden a la primera repetición, del 9 al 16 la segunda y 17 al 24 la tercera.

Podemos observar que en la primera repetición, la eficiencia de remoción más alto lo tiene el tratamiento N° 7 con un 50.00%. En la segunda repetición el tratamiento n N° 16 con un 73.10% y en la última repetición el tratamiento N° 20 con un 80.41%; siendo esta la eficiencia más alta, no obstante como valor mínimo de remoción se tiene el tratamiento N° 1 con un 11.70%.

Haciendo uso del paquete estadístico Minitab 18, podemos analizar la eficiencia en la remoción de mercurio. Siendo necesarios los datos de la Tabla 24, la columna de eficiencia de remoción.

Figura 28

Grafica de suministro normal y tendencia de datos



Nota. Datos procesados de la Tabla N°24 en Minitab 18, de manera aleatoria para reducir el error experimental.

Podemos notar que los valores de eficiencia de remoción en la mercurio se ajustan a una suministro normal, como también que estos valores no existe una tendencia fija por tanto los datos procesados en Minitab 18 son independientes.

Tabla 25*Información del factor*

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Tratamiento	Fijo	8	1,2,3,4,5,6,7,8
Réplica	Fijo	3	1, 2, 3

Nota. Minitab 18

Para el análisis de varianza (ANOVA), se tiene 08 tratamientos con 03 replicando; dando como resultado 24 valores de eficiencia de remoción de mercurio.

Tabla 26*Análisis de varianza para la eficiencia en la remoción de mercurio*

Fuente	GL	SC Sec,	Contribución	SC Ajust	MC Ajust	Valor F	Valor p
Tratamiento	7	874.8	8.62%	874.8	125.0	1.01	0.462
Réplica	2	7553.8	74.40%	7553.8	3776.9	30.67	0.000
Error	14	1724.2	16.98%	1724.2	123.2		
Total	23	10152.9	100.00%				

Nota. Fuente: Minitab 18

Podemos notar que no se observan diferencias reveladoras o significativas entre los tratamientos pues el valor $p > 0.05$, esto nos dice que la eficiencia de remoción entre los tratamientos ya sea usando diferente tamaño de partícula, pH y tiempo de contacto; no hay diferencias notables (esto reflejado en el análisis realizado para el objetivo específico 3). En cambio si hay diferencia



significativa entre repeticiones, pues el valor $p < 0.05$, indicando que la eficiencia de remoción de mercurio es diferente en las 03 repeticiones.

Tabla 27

Pruebas simultáneas de Tukey para incompatibilidades de las medias

Diferencia de Réplica niveles	Diferencia de medias	EE-de diferencia	IC simultáneo de 95%	Valor T	Valor p ajustado
2 - 1	31.87	5.55	(17.35, 46.39)	5.74	0.000
3 - 1	41.52	5.55	(27.00, 56.04)	7.48	0.000
3 - 2	9.65	5.55	(-4.87, 24.17)	1.74	0.226

Nota. Nivel de confianza individual = 97.97%. Fuente: Minitab 18

Podemos observar que si hay diferencia significativa entre la segunda y primera réplica; como entre tercera y primera réplica, puesto que el valor $p < 0.05$. Indicando que la eficiencia de remoción de mercurio entre estas replicas es diferente y significativa. En cambio no se encuentra diferencias entre la tercera y segunda replica, puesto que el valor de $p > 0.05$.

4.2. Análisis estadístico

4.2.1. Prueba de hipótesis general

Hipótesis

H₀: El empleo de la zeolita como material adsorbente no es eficaz para la remoción de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre

H_a: El empleo de la zeolita como material adsorbente es eficaz para la remoción de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre

Regla de decisión

- En la cuestión de que el valor "p" sea inferior a 0.05, se excluye H_0 y se admite la H_a .
- En la cuestión de que el valor "p" sea igual o por encima a 0.05, se admite la H_0 y se excluye la H_a .

Tabla 28*Estadísticas descriptivas de la prueba de hipótesis general*

N	Media	Desv.Est	Error estandar de la media	Límite inferior de 95% para μ
24	63.65	9.96	2.03	60.17

*Nota. μ : media de Eficiencia. Fuente: Minitab 18***Tabla 29***Prueba de T-student para la hipótesis general*

Hipótesis nula	$H_0: \mu = 60$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu > 60$
Valor T	Valor p
1.80	0.043

Nota. Minitab 18

Los resultados estadísticos muestran que el p-valor es 0.043, siendo este inferior que el nivel de significancia 0.05. Resultado que alude diferencias significativas entre la media hipotética (la eficiencia de remoción de mercurio es mayor al 60%) y las eficiencias de remoción de los tratamientos. Por tanto con un nivel de significancia del 5.0% y un nivel de confianza del 95.0% se admite H_a y se excluye H_0 . Concluyendo que "El empleo de la zeolita como material

adsorbentes es eficaz hacia la remoción de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre”.

4.2.2. Prueba de hipótesis específico 1

Este objeto está estrechamente vinculado con el objetivo específico 3, puesto que la composición mineralógica de un material adsorbente está emparentada a la cuantía de remoción de un contaminante.

Hipótesis

Ho: La composición mineralógica del material zeolítico del centro poblado de Llungo no incide en la remoción de mercurio en agua.

Ha: La composición mineralógica del material zeolítico del centro poblado de Llungo incide en la remoción de mercurio en agua.

Regla de decisión

- En la cuestión de que valor “p” sea inferior a 0.05, se excluye *Ho* y se admite la *Ha*.
- En la cuestión de que el valor “p” sea igual o superior a 0.05, se admite la *Ho* y se excluye la *Ha*.

Tabla 30

Estadísticas descriptivas de la prueba de hipótesis específico 1

N	Media	Desv.Est	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ
24	0.002170	0.000334	0.000068	0.002053

Nota. μ : media de Remoción .Fuente: Minitab 18

**Tabla 31***Prueba de T-student para la hipótesis específico 1*

Hipótesis-nula	$H_0: \mu = 0.002052$
Hipótesis-alterna	$H_1: \mu > 0.002052$
Valor T	Valor p
1.73	0.048

Nota. Minitab 18

Los resultados estadísticos revelan que el p-valor es 0.048, siendo este menor que el nivel de significancia 0.05. Resultado que alude diferencias significativas entre la media hipotética (la remoción de mercurio es mayor a 0.002052 mg/L) y las remociones de los tratamientos. Por tanto con un nivel de significancia del 5.0% y un nivel de confianza del 95.0% se admite H_a y se excluye H_o . Concluyendo que “La composición mineralógica del material zeolítico del centro poblado de Llungo incide en la remoción de mercurio en agua”.

4.2.3. Prueba de hipótesis específico 2

El resultado que se observa en la Tabla 20, nos exterioriza que la concentración de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre es superior al 0.001 mg/L. Por tanto según la normativa peruana vigente, evidencia contaminación de estas aguas; es así que se acepta la H_a “La concentración de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre, supera los Estándares de Calidad Ambiental para agua”.

Tabla 32*Concentración de mercurio y la comparación con el ECA para agua*

Muestra	Concentración de Hg en agua superficial (mg/L)	ECA Categoría 3 Subcategoría D1 (mg/L)	
P1	0.00342	0.001	No cumple

Nota. (MINAM, 2017).

4.2.4. Prueba de hipótesis específico 3

Hipótesis

Ho: La cantidad de remoción de mercurio después de realizar el tratamiento con zeolita no es influenciada por 3 factores (tiempo de contacto, pH y tamaño de partícula).

Ha: La cantidad de remoción de mercurio después de realizar el tratamiento con zeolita es influenciada por 3 factores (tiempo de contacto, pH y tamaño de partícula).

Regla de decisión

- En la cuestión de que el valor "p" sea inferior a 0.05, se excluye *Ho* y se admite la *Ha*.
- En la cuestión de que el valor "p" sea igual o superior a 0.05, se admite la *Ho* y se excluye la *Ha*.

Tabla 33*Estadísticas descriptivas de la prueba de hipótesis específico 3*

N	Media	Desv.Est	Error estándar de la media	Límite inferior de 95%-para μ
24	0.002170	0.000334	0.000068	0.002053

Nota. μ : media de Remoción .Fuente: Minitab 18

Tabla 34*Prueba de T-student para la hipótesis específico 3*

Hipótesis nula	$H_0: \mu = 0.002052$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu > 0.002052$
Valor T	Valor p
1.73	0.048

Nota.Fuente: Minitab 18

Los resultados estadísticos muestran que el p-valor es 0.048, siendo esta inferior que el nivel de significancia 0.05. Resultado que insinúa diferencias significativas entre la media hipotética (la remoción de mercurio es mayor a 0.002052 mg/L) y las remociones de los tratamientos. Por tanto con un nivel de significancia del 5.0% y un nivel de confianza del 95.0% se admite H_a y se excluye H_o . Concluyendo que "La cantidad de remoción de mercurio después de realizar el tratamiento con zeolita es influenciada por 3 factores (tiempo de contacto, pH y tamaño de partícula)".

4.3. Discusiones

Los resultados obtenidos en el objetivo general, revelan que la eficiencia máxima en la remoción de mercurio es del 80.41% en un medio neutro (pH 7.5), un tiempo de contacto de 120 min., concentración inicial de mercurio de 0.00342 mg/L y 1 gramo de zeolita por litro. Este teniendo afinidad con lo encontrado por (Barrera & Granda, 2020) donde, utilizando una zeolita A sintética logra obtener una eficiencia en la remoción del 88.91% de mercurio y 80.4% de plomo para un tiempo de 8h, pH 7, concentración inicial de cada contaminante de 10 mg/L y 1 gramo de zeolita por litro.



Aunque se observó una tendencia favorable en la remoción en un medio ácido (mayor solubilidad del contaminante), esta no fue lo suficientemente marcada para alcanzar una significancia estadística. Posiblemente por las características físico-químicas del agua del río Llallimayo y a la especie de mercurio existente en su forma específica en el acondicionamiento realizado en los tratamientos en laboratorio. Puesto que los procesos en la eficiencia de remoción realizados por (Barrera & Granda, 2020; Ita, 2017; Ugrina et al., 2020); emplearon reactivos como: cloruro de mercurio, soluciones stock de mercurio II y nitrato de mercurio respectivamente para preparar soluciones madre de mercurio con concentraciones bajas en agua ultra pura. Obteniendo resultados significativos en comparación con los encontrados en esta investigación y por (De La Puente & Tello, 2022), en la que utilizaron 100 gr. de zeolita para 1 L de muestra del río Condebamba-Cajamarca; obteniendo una eficiencia en la remoción entre el 49.15 y 56.739 % de los metales pesados presentes (Bario, Boro, Cobre, Cromo, Hierro, Plomo y Zinc), utilizando inclusive una zeolita comercial del tipo clinoptilolita los tratamientos no cumplieron con el Estándar de Calidad Ambiental para agua.

Observándose que, entre las condiciones controladas en laboratorio y el contexto ambiental real hay una diferencia en la eficiencia de la remoción de contaminantes disueltos o en solución claramente menor en muestras de agua de ríos. Situación apreciada en esta investigación, pues las aguas del río Llallimayo sector Sucre del distrito de Llalli presentan una mezcla de contaminantes que podrían interferir en la capacidad de adsorción del material zeolítico; como la existencia de otros metales pesados (As, Hg, Cd, Cu, Cr, Pb,



Mn y Al) hallados por (Cano, 2022) en la misma zona de estudio (03 muestras aguas a lo alto<río> y 03 muestras aguas abajo “red de suministro de la Irrigación Canal N”) a un pH promedio de 8.29 y una Temperatura promedio de 11.47 °C. Valores similares a los encontrados en esta investigación (pH 7.44 y T° 13.7 °C).

En cuanto al resultado obtenido en el objetivo específico 1, la composición mineralógica del material zeolítico del Centro Poblado de Llungo, muestra una similitud en la composición con la zeolita natural del yacimiento Zlatopkop; puesto que presenta cuarzo, feldespato y carbonatos como minerales acompañantes según lo determinado por (Ugrina et al., 2020) mediante el análisis XRD, evidentemente en diferentes proporciones a la muestra natural llevada al laboratorio de Yacimientos Minerales de la EPIG. Donde se nota la cuantiosa cantidad de carbonato de calcio (calcita), además de cuarzo y en menor medida feldespatos (químicamente son silicatos complejos de aluminio con Na, K, Ca y cantidades pequeñas de óxidos de Mg y Fe (Klein & Hurlbut, 1997)); resultado semejante a los hallados por (Ordoño & Mendoza, 2020; Turpo et al., 2022) del misma zona de estudio donde se colectaron las muestras. Tanto como (Ordoño & Mendoza, 2020; Turpo et al., 2022; Ugrina et al., 2020) reconocen que el principal catión intercambiable es el calcio (Ca) para las muestras naturales, seguido de un aumento en el proporción de adsorción de manera paulatina acorde se esté agregando una cantidad mayor de adsorbente. Así mismo (Turpo et al., 2022) resalta que la calcita “carbonato de calcio” (del adsorbente proveniente de Atuncolla-C.P. de Llungo), es un factor determinante en la movilidad del arsénico que en entornos de oxidación, el As existente estando como una especie de arseniato que se adsorbe en la calcita.



Posiblemente esta cuantiosa cantidad de carbonato de calcio en la muestra se debería a los organismos encontrados que forman su esqueleto con carbonato de calcio y al morir, sus restos minerales quedaron enterrados por los sedimentos; y esto explicaría la composición mineralógica del material zeolítico del C.P. de Llungo. Teniendo en consideración que los afloramientos se encuentran dentro de cerros aislados de rocas detríticas y volcánicas, conformadas estratigráficamente por areniscas del Gp. Puno y las secuencias volcánicas del Gp. Mitu (Rodríguez et al., 2020); el material zeolítico habría tenido la contribución de material detrítico de origen volcánico pues la muestra analizada se encuentran minerales volcánicos en menor proporción.

Agregando a lo anterior podemos decir que en la formación del material zeolítico natural hubo un periodo en la que estaba sumergido en agua alcalinas (presencia de carbonatos en solución), donde los sedimentos finos llegaron a depositarse y en la que se desarrollaron estos organismos con exoesqueleto de carbonato de calcio y aragonito, seguidamente un periodo de regresión de estas aguas por el levantamiento tectónico Andino; que durante este sería cubierto por diferentes materiales y así llegar a su posición actual.

En cuanto al resultado obtenido en el objetivo específico 2, se infiere que las agua del río Llallimayo sector Sucre discurre en un medio neutro a ligeramente alcalino, este favoreciendo la precipitación de los contaminantes; fenómeno físico-químico reflejado en el resultado de contenido de mercurio de la muestra "P1" (0.00342 mg/L). Siendo una concentración baja que puede atribuirse al ciclo del mercurio en el ambiente, ya que (García, 2015) observó de muestras recolectadas en las quebradas próximas a una zona minera y el cauce



del río Yaguará la mayoría de las muestras no reportaron valores de mercurio, pero sí en los sedimentos (valor más alto encontrado fue de 1497 $\mu\text{g Hg/Kg}$). Infiriendo que el mercurio una vez que es emitido o soltado al medio acuático presenta fuerte atracción por la materia orgánica y por los sedimentos finos (fracción fina en suspensión), siendo atrapados para posteriormente presentar procesos de descomposición producto de bacterias (pseudomonas) y así llegar nuevamente al ambiente llegando a ser más peligrosas que los compuestos originales. Además, que con el transcurso del tiempo por mínimo que sea el contenido de estos metales en el agua o suelo pueden ser perjudiciales, provocando intoxicaciones y patologías en la salubridad humana y sobre todo en los animales que están expuestos de forma directa al ser alimentados con forrajes regados frecuentemente con aguas influenciadas de la actividad minera (caso del departamento de Puno).

Situación totalmente distinta a lo reportado por (Soloisolo, 2022), que en encontró valores de Plomo y Mercurio en la subcuenca Llallimayo (distritos de Ocuwiri, Lampa, Llalli, Melgar y Umachiri) por encima de los Límites Máximos Permisibles y los Estándares de Calidad Ambiental para agua. De los 5 puntos muestreados, el N° 4 (Llalli) presentó concentraciones de 1.124 mg de Pb/L y 0.2600 mg Hg/L; siendo la concentración de mercurio 76 veces más a lo encontrado en esta investigación en la misma zona y en el mismo mes muestreado ("P1" 0.00342 mg/L). Estas diferencias se debería a que durante ese tiempo todavía se realizaba el plan de cierre de la Mina Arasi, que según (Soloisolo, 2022) la minera estaría incumpliendo lo establecido durante el proceso de cierre definitivo, llegando a la conclusión de que el riesgo ambiental aumentaría por la demora de cierre de la mina.



Asimismo (Soloisolo, 2022) vio que las diferenciaciones en las concentraciones de Plomo y Mercurio en la subcuenca del río Llallimayo se deberían al relieve, ya que zonas como Jatun Ayllu (Pto.1) y Pukachupa (Pto. 2) presentan una pendiente apreciable; que por lo contrario Koripuna (Pto. 3), Llalli (Pto.4) y Chuquibambilla (Pto.5) son planicies con pendientes más suaves. Posibilitando estos tres últimos puntos a la precipitación de las partículas en suspensión (fracción fina de los sedimentos) por la disminución de la pendiente y la velocidad de las aguas; predominando la sedimentación y el transporte de materiales muy finos. Fenómeno observado en el lugar de muestreo pues se apreciaba una capa de sedimentos sobre los cantos rodados y arenas del río Llallimayo sector Sucre del distrito de Llalli; además de turbiedad, siendo esta de 35.7 NTU según el resultado emitido de las submuestras enviadas al laboratorio de Calidad Ambiental de la EPISA.

En cuanto al resultado obtenido en el objetivo específico 3, podemos observar que el tiempo de contacto es el factor más significativo en el proceso de remoción de mercurio en las aguas del río Llallimayo sector Sucre del distrito de Llalli; con el uso de material zeolítico natural del C.P. de Llungo. Efecto también sobresaliente en la comparación de sorción entre una zeolita natural del yacimiento Zlatokop y otra modificada con hierro realizadas por (Ugrina et al., 2020), notando que la sorción de Hg(II) en ambas zeolitas tiene lugar en dos etapas; la primera donde la sorción es presuroso (rápido) por la presencia de sitios activos de fácil acceso o disponibilidad y la segunda con un aumento gradual más lenta a consecuencia de sitios menos disponibles. Escenario observado en el gráfico de efectos principales, en la que a mayor tiempo de



contacto (factor alto-120min) se obtuvo resultados más favorables en la variable de respuesta.

Resultados similares encontrados por (Ita, 2017), logrando una eficiencia en la remoción de mercurio en un 80.79% a una temperatura de 15°C con un tiempo de exposición de 180 min (factor alto); pero con una zeolita sintetizada a partir de una arcilla del tipo Bentonita. Notándose que la capacidad de la zeolita sintetizada para retener iones metálicos incrementa con el tiempo, debido a la mayor oportunidad de interacción entre las superficies activas de la zeolita y los iones del contaminante en el agua.

Por otro lado los resultados también indican que el pH y el tamaño de partícula, aunque relevantes en otros contextos; no mostraron un impacto estadísticamente significativo en las condiciones experimentales empleadas. El pH como variable crítica en muchos procesos de adsorción tiende a regular la especiación del mercurio en solución y la carga superficial de zeolita. Fenómeno observado por (Ugrina et al., 2020), pues en un ambiente ácido la competencia de las especies Hg^{2+} y $HgOH^+$ con los iones H^+ ; resulta en también en la protonación de los sitios activos de la zeolita. Notándose que el principal mecanismo de sorción es el intercambio iónico de especies de $Hg(II)$ con cationes intercambiables de la zeolita, seguido de la adsorción y precipitación de Hg , muy probablemente en forma de HgO . Este apreciado en los tratamientos, pues al haber terminado los ensayos en la prueba de jarras 15 min después se observa la precipitación del material zeolítico con el mercurio; este atrapado mediante el intercambio iónico y adsorbido durante el agitado de la muestra en la prueba de jarras (figuras de los anexos).



CONCLUSIONES

- Primera:** La composición mineralógica del material zeolítico del C.P. de Llungo presenta una cuantiosa cantidad de carbonato de calcio (81.34%) y en menor medida de feldespatos; ciertamente tiene un origen sedimentario con la presencia de restos órgano-minerales, siendo así un material zeolítico arcilloso; con características similares a los adsorbentes naturales como las zeolitas.
- Segunda:** La concentración de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre del distrito de Llalli, muestra un valor de 0.00342mg/L, siendo 3.42 veces más a lo estipulado en el Estándar de Calidad Ambiental para agua "(categoría 3-D1)", establecido en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Lo que indicaría que continúa la contaminación en la subcuenca del río Llallimayo.
- Tercera:** La cantidad de remoción de mercurio es aceptable en agua del río Llallimayo sector Sucre del distrito de LLalli, puesto que se logra remover más de la mitad de este contaminante. Destacándose el factor de tiempo de contacto como el factor más influyente seguido del pH y tamaño de partícula, así teniendo como máxima remoción de 0.00275 mg/L de Hg.
- General:** Se concluye que si es eficiente la remoción de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre utilizando zeolita del C.P. de Llungo como material adsorbente, logrando una eficiencia máxima de 80.41%. Cumpliendo así el Estándar de Calidad Ambiental para agua "categoría 3-D1" después de realizar los tratamientos.



RECOMENDACIONES

- Primera:** Se aconseja que para futuras investigaciones efectuar estudios de los sedimentos que se encuentran en la subcuenca del río Llallimayo sector Sucre.
- Segunda:** Se sugiere para investigaciones posteriores utilizar el material natural del C.P. de Llungo, para remover otros metales pesados en aguas con influencia de actividades mineras.
- Tercera:** Se recomienda para futuras investigaciones acondicionar el material natural del C.P. de Llungo, para obtener mayores resultados en la remoción de metales pesados del agua.
- Cuarto:** Se sugiere para investigaciones efectuadas en lo posterior hacer uso la técnica de Fluorescencia de rayos X y la Microscopía Electrónica de Barrido para estudiar a fondo el material zeolítico del C.P. de Llungo.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Academia Nacional de Medicina. (2006). *Seminario Internacional Sobre Clínica del Mercurio*.
https://books.google.com.pe/books?id=oQ4Z6cQ1E0oC&pg=PA54&hl=es&source=gbs_selected_pages&cad=1#v=onepage&q&f=false
- Agudelo, R. M. (2005). El agua, recurso estratégico del siglo XXI. *Facultad Nacional de Salud Pública.*, 23(1), 91–102.
<http://www.scielo.org.co/pdf/rfnsp/v23n1/v23n1a09.pdf>
- Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). X-Ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions. *Minerals*, 12(2).
<https://doi.org/10.3390/min12020205>
- Alvarado Ibarra, J. (2003). *Remoción de Cr III de agua residual industrial con zeolitas naturales (Tesis de maestría)* [Universidad Autónoma Metropolitana]. <http://zaloamati.azc.uam.mx/discover>
- ANA. (2013). *Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú*.
<file:///C:/Users/hp/Downloads/ANA0000040.pdf>
- ANA. (2016). Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales. In *Autoridad Nacional del Agua* (p. 92).
<http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/209>
- Angamarca, D. J., & Valarezo, L. A. (2020). *Determinación de la contaminación del recurso hídrico provocado por la actividad minera en la cuenca alta del Río Santa Rosa, provincia de El Oro*. 1–110.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19334/1/UPS-CT008839.pdf>
- Barrera, C. J., & Granda, R. A. (2020). *Evaluación de la remoción de plomo y mercurio de aguas sintéticas utilizando zeolitas hidrotermales sintetizadas en pruebas de laboratorio y propuesta de diseño de sistemas de adsorción industriales* [Escuela Politécnica Nacional].



<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21387>

- Beaty, R. D., & Kerber, J. D. (1997). Concepts, Instrumentation and Techniques in Atomic Absorption Spectrophotometry. In *THE PERKIN-ELMER CORPORATION* (2.^a ed.). https://www.iitk.ac.in/che/PG_research_lab/pdf/resources/AAS-GTA-reading-material.pdf
- Cancino, N., Dammert, J., Valle, E., & Monge, C. (2022). *Reforma tributaria en el sector minero Perú 2022*. <https://justiciafiscal.pe/wp-content/uploads/2022/06/Reforma-tributaria-en-el-sector-minero.-Perú-2022.pdf>
- Cano Ojeda, J., & Atajo Condori, J. (2019). Water quality of the irrigation channel N of the Llallimayo river and agricultural aptitude distrito Cupi-Melgar 2018. *Revista de Investigaciones de La Escuela de Posgrado*, 8(2), 1069–1081. <http://dx.doi.org/10.26788/riepg.2019.2.127>
- Cano Ojeda, J. W. (2022). METALES PESADOS Y APTITUD AGROPECUARIA DEL AGUA EN UNA IRRIGACIÓN. *Revista de Investigaciones de La Escuela de Posgrado*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.26788/riepg.v11i1.2831>
- Castro, S. A. (2011). *Pobreza y conflictos socioambientales, el caso de la minería en el Perú*.
- Caviedes, D. I., Muñoz, R. A., Perdomo, A., Rodríguez, D., & Sandoval, I. J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Ingeniería y Región*, 13(1), 73. <https://doi.org/10.25054/22161325.710>
- Cervantes Macedo, A. H. (2014). Caracterización del drenaje ácido y de las rocas asociadas a una mina para evaluar su posible aplicación en un sistema de tratamiento pasivo. In *Universidad Nacional Autónoma de México*. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/3014>
- Charre Gonzales, K. (2018). *“La Ineficacia Del Sistema Penal Peruano Para Tipificar El Delito De Contaminación Ambiental.”*



<https://repositorio.unheval.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13080/6316/TDr.D00076Ch525.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Clifton, R. A. (1987). *Natural and synthetic zeolites* (Vol. 9140). US Department of the Interior, Bureau of Mines. <https://archive.org/details/naturalsynthetic00clif/page/8/mode/2up>

Coaquira Taboada, J. N., Chaupis Pajuelo, D. A., & Burgos Zavaleta, V. F. J. (2022). Ingresos tributarios provenientes del sector minero y su relación con la recuperación económica del Perú. *Quipukamayoc*, 30(63), 59–68. <https://doi.org/10.15381/quipu.v30i63.23327>

Curi, A., Granda, W. J. V, Lima, H. M., & Sousa, W. T. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. *Información Tecnológica*, 17(6), 111–118. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642006000600017>

De La Puente, L. G., & Tello, K. E. (2022). *Eficiencia de la zeolita en la remoción de metales pesados en el río Condebamba en relación con los estándares de calidad del agua-Categoría 3, Cajamarca 2022* [Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/33611>

Englert, A. H., & Rubio, J. (2005). Characterization and environmental application of a Chilean natural zeolite. *International Journal of Mineral Processing*, 75(1–2), 21–29. <https://doi.org/10.1016/J.MINPRO.2004.01.003>

Environmental Protection Agency (EPA). (2024). *PART 131—WATER QUALITY STANDARDS* (Vol. 131).

Erdem, E., Karapinar, N., & Donat, R. (2004). The removal of heavy metal cations by natural zeolites. *Journal of Colloid and Interface Science*, 280(2), 309–314. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.028>

Fernández, J. M., Manzanares, D., Velázquez, F., & Taya, E. (2013). Agua, Minería Y Comunidades Campesinas En La Región Tacna Water, Mining and Rural Communities in the Región Tacna. *Ciencia & Desarrollo*, 13, 73–80.



- Figuroa, E. (2022). Comunicación y participación pública en el espacio de diálogo sobre la contaminación ambiental de la cuenca Llallimayo en la provincia de Melgar, en Puno (2017-2020) [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)]. In *Repositorio académico UPC*. <http://hdl.handle.net/10757/661059>
- Gaioli, M., Amoedo, D., & González, D. (2012). Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente. *Impacto Del Mercurio Sobre La Salud Humana y El Ambiente*, 110(3), 259–264.
- García Gómez, A. G. (2015). Evaluación de la contaminación por vertimiento de mercurio en la zona minera, Pacarní - San Luis departamento del Huila. *Revista de Tecnología*, 12(1), 91–98. <https://doi.org/10.18270/rt.v12i1.653>
- Glave, M. A., & Kuramoto, J. (2002). Minería , Minerales y Desarrollo Sustentable en Perú. In *International Institute for Environment and development, minería, minerales y desarrollo sustentable en américa del sur* (pp. 529–591).
- Guevara Gil, A. (2008). Derechos y conflictos de agua en el Perú. In *Concertación*. <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/175364/derechos-y-conflictos-de-agua-en-el-peru.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Babtista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigacion* (S. A. D. C. V. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES (ed.); Sexta ed.).
- IPE. (2011). *La tributación minera en el Perú: Contribución, carga tributaria y fundamentos conceptuales*.
- Ita Balta, Y. A. (2017). *Evaluación De La Capacidad De Remoción De Mercurio (Ii) En Solución Utilizando Una Zeolita Sintética Tipo Clinoptilolita*. (Issue Ii) [Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/7096>
- Jiménez Gómez, A. M. (2005). *Interacción del mercurio con los componentes de las aguas residuales* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2754>



- Kaczorowska, M. A., & Bożejewicz, D. (2024). The Application of Chitosan-Based Adsorbents for the Removal of Hazardous Pollutants from Aqueous Solutions—A Review. *Sustainability (Switzerland)* , 16(7). <https://doi.org/10.3390/su16072615>
- Klein, C., & Hurlbut, C. S. (1997). *Manual de mineralogía Volumen 2: Basado en la obra de J. D. Dana: Vol. Vol. 2* (Cuarta edición.) [Book]. REVERTÉ.
- Lescano Vega, C. D., & Reinoso Aguilar, M. J. (2023). “ *Estudio de absorción de arsénico y plomo con zeolita cálcica en la relavera de la planta de beneficio Playitas , Portovelo - El Oro* ” [Universidad de Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/12979>
- Ley N°29338. (2009). Ley de Recursos Hídricos. In *El Peruano*. <https://leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/29338.pdf>
- Loya Ramírez, J. D. (2022). *Remocion de arsénico y cadmio en agua usando zeolitas como material adsorbente*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
- Lupa, L., & Coheci, L. (2023). Heavy Metals Removal from Water and Wastewater. In *Heavy Metals - Recent Advances*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110228>
- Martínez, P. (2021). *Contaminación del agua en la minería*. Observatorio Económico Latinoamericano. <https://obela.org/analisis/la-contaminacion-del-agua-en-la-mineria>
- Medina, G. (2016). Estudio de la concentración de mercurio (Hg) en el material particulado sedimentado y en los suelos adyacentes a la zona industrial de la ciudad de Valencia, estado Carabobo-Venezuela. In *Universidad Central de Venezuela*.
- Menéndez, J., & Muñoz, S. (2021). Contaminación Del Agua Y Suelo Por Los Relaves Mineros. *Paideia XXI*, 11(1), 141–154. <https://doi.org/10.31381/paideia.v11i1.3622>
- MINAM. (2014). Guía para el Muestreo de Suelos. In *Ministerio del*



- Ambiente. Dirección General de Calidad Ambiental.*
<http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/07/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELO.pdf>
- MINAM. (2017). DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM.- Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias. In *El Peruano*.
<https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica (MAATE). (2015). Acuerdo N° 97/A - Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua. In *Registro Oficial* No. 387.
<https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC155128/>
- Muñoz-Duque, L. A., Pérez Osorno, M. M., & Vargas, A. B. (2020). Spoliation, socio-environmental conflicts and human rights violation Implications of large scale mining in Latin America. *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Cientifica*, 23(1), 1–10. <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n1.2020.988>
- Natoli, C., & Oimoen, S. (2019). Classical Designs: Full Factorial Designs. In *STAT Center of Excellence: Dayton, OH, USA*.
- Ofosu, G., Dittmann, A., Sarpong, D., & Botchie, D. (2020). Socio-economic and environmental implications of Artisanal and Small-scale Mining (ASM) on agriculture and livelihoods. *Environmental Science and Policy*, 106(April 2019), 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.005>
- Orbe, L. (2021). *Caracterización del riego en la salud por exposición de metales pesados en la Cuenca del Río Napo*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Ordoño Bellido, J. A., & Mendoza Ancori, A. (2020). *REMOCIÓN DE COBRE Cu (II) Y ARSENICO As (V) DE AGUAS RESIDUALES DE MINA, POR ADSORCIÓN CON ZEOLITA NATURAL EN PROCESO BATCH* [Universidad Nacional del Altiplano].
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/14311>
- Pabón Guerrero, S. E., Benítez Benítez, R., Sarria Villa, R. A., & Gallo Corredor,



- J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18. <https://doi.org/10.31908/19098367.1734>
- Pacco Choquepata, D. (2018). Determinación De Metales Pesados en Leche y Pelo De Vacas De La Cuenca Del Rio Llallimayo Melgar – Puno [Universidad Nacional del Altiplano]. In *Repositorio Institucional UNA-PUNO*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/9269>
- Paredes, R., & Escobar, F. (2018). The role of livestock and poverty in the rural area of Puno. *Revista Investigaciones Altoandinas-Journal of High Andean Research*, 20(1), 39–60. <http://www.scielo.org.pe/pdf/ria/v20n1/a05v20n1.pdf>
- Patterson, J., & Stein, L. (1997). Capsule Report: Aqueous Mercury Treatment. *U. S. Environmental Protection Agency, July*.
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & Gonzáles, E. E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66–77. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096110>
- Rodriguez, R., Sánchez, E., Choquehuanca, S., Fabian, C., & Castillo, B. (2020). Geología de los cuadrángulos de Puno (hojas 32v1, 32v2, 32v3, 32v4) y Ácora (hojas 32x1, 32x2, 32x3 y 32x4). *INGEMMET, Boletín, Serie L: Actualización Carta Geológica Nacional(Escala 1: 50 000), 2, 109 p., 8 Mapas*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2883>
- Rojas Núñez, A. E. (2012). *Dirección de estructuras en la síntesis de zeolitas usando cationes orgánicos imidazolios* [Universidad Autónoma de Madrid]. <http://hdl.handle.net/10486/11265>
- Sanjiv, K. (2022). Unidad 14 Espectrometría de absorción atómica de llama. In Universidad Nacional Abierta Indira Gandhi (Ed.), *BCHET 141 Spectroscopic Methods of Analysis* (pp. 73–82). <http://egyankosh.ac.in//handle/123456789/81746>
- Sarmiento, G., Lawson, F., Uhlherr, P. H. T., & Uhlherr, P. (1980). Control de la



- Contaminación de Aguas en la Industria Minera. *Revista de La Universidad de La Salle*, 2(6), 44–46. <https://ciencia.lasalle.edu.co/ruls>
- Sharma, R., Bisen, D. P., Shukla, U., & Sharma, B. G. (2012). X-ray diffraction: a powerful method of characterizing nanomaterials. *Recent Research in Science and Technology*, 4(8), 77–79. <https://core.ac.uk/download/pdf/236010365.pdf>
- Soloisolo Cutipa, D. (2022). Niveles de plomo y mercurio en agua de la cuenca Llallimayo durante el proceso de cierre de la mina Arasi S.A.C. – Región Puno. In *Universidad Nacional Del Altiplano De Puno*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/17747>
- Soloisolo Cutipa, H. (2019). Actividad minera de la empresa Aruntani S.A.C. y su influencia en los conflictos sociales de la provincia de Lampa, región Puno-2019. In *Repositorio - UNAP*. http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/13626/Ramos_Roger_Mamani_Clipsania.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Takeno, N. (2005). Atlas of Eh-pH diagrams Intercomparison of thermodynamic databases. In *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Tokyo* (Issue 419). <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Atlas+of+Eh-pH+diagrams+Intercomparison+of+thermodynamic+databases#0>
- Turpo Turpo, R. E., Ccama Vilca, J. W., & Quispe Diaz, I. K. (2022). *Filtración de arsénico de aguas subterráneas con zeolitas naturales de la región de Puno-Perú* [Universidad Peruana Unión]. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/5461>
- Turpo Turpo, R. E., Ccama Vilca, J. W., Quispe Díaz, I. K., Vigo Rivera, J. E., Lozada Vilca, R. A., Argota Pérez, G., & Prada Vega, S. P. L. (2022). Ingeniería de tratamiento para la filtración y remoción del arsénico en las aguas subterráneas mediante zeolitas naturales. *Campus*, 27(33), 43–56. <https://doi.org/10.24265/campus.2022.v27n33.03>
- Ugrina, M., Čeru, T., Nuić, I., & Trgo, M. (2020). Comparative study of mercury(II)



- removal from aqueous solutions onto natural and iron-modified clinoptilolite rich zeolite. *Processes*, 8(11), 1–21. <https://doi.org/10.3390/pr8111523>
- Väänänen, K., Leppänen, M. T., Chen, X. P., & Akkanen, J. (2018). Metal bioavailability in ecological risk assessment of freshwater ecosystems: From science to environmental management. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147(June 2017), 430–446. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.064>
- Velarde, A. (2022). Inaplicabilidad de la consulta previa y la vulnerabilidad social por minería en los pobladores de la cuenca del río Llallimayo provincia de Melgar, 2019-2021. In *Universidad Privada San Carlos-Puno*. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/4523>
- Vera Arévalo, H. (2009). El Niño y los caudales en la vertiente del Titicaca. *Revista Peruana Geo-Atmosfera RPGA*, 1(1), 35–47. https://web2.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2009_vol01/art4.pdf
- Vílchez Vargas, R. (2005). *Eliminación de Metales Pesados de Aguas Subterráneas Mediante Sistemas de Lechos Sumergidos: Estudio Microbiológico de las Biopelículas*. Universidad de Granada.
- Villarejo, A. (2004). Ecotoxicología y acción toxicológica del mercurio. *Anales de La Real Academia Nacional de Farmacia*, 70, 933–959. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1126361>
- Villena, J. (2018). Water quality and sustainable development. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 35(2), 304–308. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>
- von Sperling, M., Verbyla, M. E., & Oliveira, S. M. A. C. (2020). Assessment of Treatment Plant Performance and Water Quality Data: A Guide for Students, Researchers and Practitioners. In *IWA Publishing*. <https://doi.org/10.2166/9781780409320>
- Weinberg, J. (2007). Introducción a La Contaminación Las Ong. In *Red Internacional de Eliminación de los Contaminantes Orgánicos Persistentes (IPEN)* (Vol. 42, Issue 1).



- Zamzow, M. J., Eichbaum, B. R., Sandgren, K. R., & Shanks, D. E. (1990). Removal of Heavy Metals and Other Cations from Wastewater Using Zeolites. *Separation Science and Technology*, 25(13–15), 1555–1569. <http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=lsst20%0Ahttps://doi.org/10.1080/01496399008050409>
- Zhou, Y., Zeng, Z., Guo, Y., & Zheng, X. (2022). Selective adsorption of Hg(ii) with diatomite-based mesoporous materials functionalized by pyrrole-thiophene copolymers: condition optimization, application and mechanism. *RSC Advances*, 12(51), 33160–33174. <https://doi.org/10.1039/d2ra05938j>



ANEXOS

121

Anexo 1. Panel Fotográfico



Río Llallimayo, fotografía tomada desde el puente de Llalli. Notándose la turbiedad del agua además de los sedimentos finos depositados sobre los cantos rodados y arenas.



Bocatoma ubicada en el Sector Sucre del distrito de Llalli, que desvía una parte del agua del río Llallimayo, para la irrigación de parcelas de alfalfa y otros; para la alimentación de ganado en la producción de leche.



Alrededores del centro poblado de Llungo del distrito de Atuncolla, fotografía tomada desde un cerro. Notándose las geoformas de cerros y valles.



Afloramiento de material zeolítico correspondiente a "Zeo-02". Notándose estratos bien diferenciados, una superior de materiales detríticos con flora local, una intermedia con arenas y cantos del Gp. Puno no consolidados y una tercera donde se encuentra el material zeolítico como tal.



Parte de las muestras compuestas del material zeolítico muestreado del C.P. de Lluno. Notándose la presencia de esqueletos minerales compuestos de CaCO_3 .



Diferencia de tamaño de partícula empleada para la remoción de Hg en la prueba de jarras.



Diferencia entre los tratamientos T-13, T-14 (acondicionamiento a un medio ácido), T-15 y T-16 (acondicionamiento a un medio neutro); después de 18 Hrs. de haber realizado el proceso de remoción de mercurio.



Diferencia entre los tratamientos T-21, T-22 (acondicionamiento a un medio ácido), T-23 y T-24 (acondicionamiento a un medio neutro); después de 15 min. de haber realizado el proceso de remoción de mercurio. Notándose una precipitación del material zeolítico y el contaminante.



Diferencia entre los tratamientos T-6, T-7 (acondionamiento a un medio ácido) con la muestra de agua del río Llallimayo sector Sucre del distrito de Llalli; después de 18 Hrs. de haber realizado el proceso de remoción de mercurio. Notándose que el agua cruda no baja su turbiedad por precipitación natural durante las 18 Hrs.



Anexo 2. Matriz de consistencia de la investigación

Título: EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	OPERACIÓN DE VARIABLES				METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIÓN	INDICADORES	ÍNDICE	INSTRUMENTO	
¿Cuál la eficiencia de la zeolita como material adsorbente en la remoción de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre?	Analizar la eficiencia de la zeolita como adsorbente en la remoción de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre.	El empleo de la zeolita como material adsorbente es eficaz para la remoción de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre.	Zeolita como material adsorbente	Tiempo de contacto	Tiempo	Minutos	DS N° 002-2013-MINAM	
				Acidez del agua	pH	pH	RJ N° 010-2016-ANA	
				Tamaño de partícula (ZN)	Tamaño	mm	Cadena de custodia	
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIÓN	INDICADORES	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN: Experimental TIPO DE INVESTIGACIÓN: Aplicada ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN: Cuantitativo NIVEL DE INVESTIGACIÓN: Explicativo		
¿Cuál es la composición mineralógica del material zeolítico localizado al NW del C.P. de Llungo?	Determinar la composición mineralógica del material zeolítico localizado al NW del C.P. de Llungo	La composición mineralógica del material zeolítico del centro poblado de Llungo, incide en la remoción de mercurio en agua.	Remoción de mercurio	Cantidad de remoción de mercurio	Concentración de mercurio			mg/L
¿Cuál será la concentración de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre?	Determinar la concentración de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre	La concentración de mercurio en agua del río Llallimayo sector Sucre, supera los Estándares de Calidad Ambiental para agua.						
¿Qué tanto es la remoción de mercurio después de realizar el tratamiento con zeolita, con la influencia de 03 factores: tiempo de contacto, pH y tamaño de partícula?	Determinar la cantidad de remoción de mercurio después de realizar el tratamiento con zeolita, con la influencia de 03 factores (tiempo de contacto, pH y tamaño de partícula)	La cantidad de remoción de mercurio después de realizar el tratamiento con zeolita es influenciada por 03 factores (tiempo de contacto, pH y tamaño de partícula).						

Nota. (ZN) es zeolita natural



Anexo 3. Resultado del análisis de composición mineralógica del material zeolítico del C.P. de Llungo

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y METALÚRGICA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
 LABORATORIO DE YACIMIENTOS MINERALES

INFORME N°:	002 - LYM - FIGIM - EPIG	FECHA
CLIENTE/EMPRESA:	Diego Alexander Chaucha Chata	06/02/2025
JEFE DE LABORATORIO:	Ing. Roberto Florentino Zegarra Ponce	
LABORATORISTA:	Ing. Roxana Nila Medrano Pari Ing. Adonai Julinho Pacompia Quispe	

INFORME DE ENSAYO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X
MUESTRA: ZNL-7

COLOR	VISIBLE	JOB ID	SCAN TYPE	SCAN MODE	UNIT	VALUES
Black	Checked	109	Coupled TwoTheta/Theta	Continuous PSD fast	2Theta(°)	ScanCounter

RANGE END	RANGE START	STEP SIZE	Total, Time / Step	Tube	Detector
49.99234	5.002342	0.02030298	57	Co 10 mA 30 kV	SSD160_2 (1D mode)

Commander Sample ID (Coupled TwoTheta/Theta)

2Theta (Coupled TwoTheta/Theta) WL=1.78897

Roxana Nila Medrano Pari
 Ing. CIP 250127



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
LABORATORIO DE YACIMIENTOS MINERALES



RESULTADOS

Identificación de Minerales

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Carbonato de calcio	$CaCO_3$	81.34
Cuarzo	SiO_2	7.47
Serandita	$Mn_{1.924}Na(HSi_3O_9)$	2.13
Silicato de magnesio	$MgSiO_3$	4.79
Selenato de potasio	K_2O_4Se	1.69
Labradorita	$Al_{0.824}Ca_{0.317}Na_{0.183}O_4Si_{1.174}$	2.58

CONCLUSIONES

El análisis por difracción de rayos X proporciona información valiosa sobre la composición mineralógica. La presencia carbonato de calcio es cuantiosa en la muestra analizada.

RECOMENDACIONES

Se sugiere realizar estudios adicionales, como análisis químicos detallados por el método de Absorción atómica, ICP -OES (Espectroscopía de Emisión Óptica con Plasma de Acoplamiento Inductivo), ICP MS (Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo) y microscopía electrónica de barrido, para obtener una comprensión más completa de la mineralogía y la posible presencia de minerales estratégicos.

OBSERVACIONES DE ANÁLISIS DRX:

- ✓ Los resultados aproximados han sido redondeados a su menor valor entero, por lo que la sumatoria de los resultados no siempre suma el 100%.
- ✓ El presente informe no puede ser utilizado como certificado.
- ✓ Los resultados corresponden a las muestras proporcionadas por el cliente, las cuales han sido entregadas en las instalaciones del laboratorio.
- ✓ Está prohibida la reproducción total o parcial de este documento.
- ✓ %: Porcentaje masa relativa (g/g).


< L. D.: Mineral identificado cuya cuantificación está por debajo del 1%.



Roxana Nila Medrano Pati
INGENIERO QUÍMICO
CIP: 250127



Anexo 4. Resultado del análisis de agua del río Llallimayo sector Sucre



UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL

RESULTADO DE ANALISIS - AGUAS

INFORME N° LCA0013 - 2025

I. DATOS DEL SERVICIO

1.1. **Solicitante** : Diego Alexander Chaucha Chata

1.2. **Proyecto** : EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE

II. DATOS DEL ENSAYO

2.1. **Producto** : Aguas

2.2. **Numero de muestras** : 01

2.3. **Muestreado por** : Diego Alexander Chaucha Chata

2.4. **Fecha de ensayo** : 19 /12/2024

2.5. **Departamento** : Puno

2.6. **Provincia** : Melgar

2.7. **Distrito** : Llalli

2.8. **Código, fecha y hora de muestreo**

Código	Ubicación	Fecha	Hora
P1	E: 299117 N: 8346873	16/12/2024	11:14

III. RESULTADOS

Parámetro	Unidad	PI
Temperatura en laboratorio	°C	13.7
Potencial de hidrogeno	Unid. de pH	7.44
Turbidez	NTU	35.7
Mercurio	mg/L	0.00342

IV. MÉTODO DE ENSAYO

Los parámetros fueron analizados de acuerdo a las recomendaciones de los Métodos normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales APHA, AWW.WEF.21th ed. 2005

Juliaca, 26 de enero del 2025


UNIVERSIDAD ANDINA
"NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"

Mgr. Ing. Milthon Quispe Huanca
CIP. 47790
JEFE LABORATORIO CALIDAD AMBIENTAL FICP

N.B.: 00281577



Anexo 5. Resultado del análisis de agua después de realizar el tratamiento con el material zeolítico del C.P. de LLungo

 UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELASQUEZ
FACULTAD DE INGENIERIAS Y CIENCIAS PURAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL

RESULTADO DE ANALISIS - AGUAS
INFORME N° LCA0014 - 2025

I. DATOS DEL SERVICIO


1.1. **Solicitante** : Diego Alexander Chaucha Chata
1.2. **Proyecto** : EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE

II. DATOS DEL ENSAYO

2.1. **Producto** : Aguas
2.2. **Numero de muestras** : 24
2.3. **Muestreado por** : Diego Alexander Chaucha Chata
2.4. **Fecha de ensayo** : 22 /01/2025
2.5. **Departamento** : Puno
2.6. **Provincia** : San Román
2.7. **Distrito** : Juliaca
2.8. **Código, fecha y hora de muestreo**

Código	Ubicación	Fecha	Hora
T - 1	E: 380117.93 N: 8282287.07	17/01/2025	10:12 a.m.
T - 2	E: 380117.93 N: 8282287.07	17/01/2025	10:09 a.m.
T - 3	E: 380117.93 N: 8282287.07	17/01/2025	10:06 a.m.
T - 4	E: 380117.93 N: 8282287.07	17/01/2025	10:05 a.m.
T - 5	E: 380117.93 N: 8282287.07	17/01/2025	2:05 p.m.
T - 6	E: 380117.93 N: 8282287.07	17/01/2025	2:02 p.m.
T - 7	E: 380117.93 N: 8282287.07	17/01/2025	2:01 p.m.
T - 8	E: 380117.93 N: 8282287.07	17/01/2025	2:10 p.m.
T - 9	E: 380117.93 N: 8282287.07	18/01/2025	9:45 a.m.
T - 10	E: 380117.93 N: 8282287.07	18/01/2025	9:47 a.m.
T - 11	E: 380117.93 N: 8282287.07	18/01/2025	9:50 a.m.
T - 12	E: 380117.93 N: 8282287.07	18/01/2025	9:52 a.m.
T - 13	E: 380117.93 N: 8282287.07	18/01/2025	1:05 p.m.
T - 14	E: 380117.93 N: 8282287.07	18/01/2025	1:07 p.m.
T - 15	E: 380117.93 N: 8282287.07	18/01/2025	1:11 p.m.
T - 16	E: 380117.93 N: 8282287.07	18/01/2025	1:13 p.m.
T - 17	E: 380117.93 N: 8282287.07	19/01/2025	10:55 a.m.
T - 18	E: 380117.93 N: 8282287.07	19/01/2025	10:37 a.m.
T - 19	E: 380117.93 N: 8282287.07	19/01/2025	10:39 a.m.
T - 20	E: 380117.93 N: 8282287.07	19/01/2025	10:40 a.m.
T - 21	E: 380117.93 N: 8282287.07	19/01/2025	1:07 p.m.
T - 22	E: 380117.93 N: 8282287.07	19/01/2025	1:09 p.m.
T - 23	E: 380117.93 N: 8282287.07	19/01/2025	1:10 p.m.
T - 24	E: 380117.93 N: 8282287.07	19/01/2025	1:05p.m.

N.B.: 00281577





UNIVERSIDAD ANDINA NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL
LABORATORIO DE CALIDAD AMBIENTAL

III. RESULTADOS

Código	pH	Turbidez (NTU)	Mercurio (mg/L)
T-1	2.5	10.45	0.00302
T-2	2.5	10.94	0.00299
T-3	7.5	27.6	0.00283
T-4	7.5	3.69	0.00272
T-5	2.5	0.86	0.00234
T-6	2.5	3.58	0.00193
T-7	7.5	2.11	0.00171
T-8	7.5	1.62	0.00177
T-9	2.5	4.75	0.00144
T-10	2.5	15.96	0.00166
T-11	7.5	2.33	0.00165
T-12	7.5	9.32	0.00122
T-13	2.5	1.58	0.00150
T-14	2.5	18.0	0.00107
T-15	7.5	1.13	0.00113
T-16	7.5	2.26	0.00092
T-17	2.5	1.35	0.00110
T-18	2.5	6.03	0.00085
T-19	7.5	2.67	0.00074
T-20	7.5	3.84	0.00067
T-21	2.5	1.39	0.00100
T-22	2.5	2.71	0.00123
T-23	7.5	2.30	0.00100
T-24	7.5	13.35	0.00135

IV. MÉTODO DE ENSAYO

Los parámetros fueron analizados de acuerdo a las recomendaciones de los Métodos normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales APHA, AWW.WEF.21th ed. 2005


UNIVERSIDAD ANDINA
"NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"
Mgtr. Ing. Milton Quispe Huanca
CIP: 47790
JEFE LABORATORIO CALIDAD AMBIENTAL FICP

Juliaca, 26 de enero del 2025

N.B.: 00281577



ANEXO 1
FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS
TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN
EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UANCV

Formato digital

Fecha de entrega: 04/07/2025

1. Datos del autor (es):

Nombres y Apellidos: DIEGO ALEXANDER CHAUCHA CHATA
Dirección: COMUNID. CAMPESINA SUCAPAYA - CAMINACA - AZANGARO - PUNO
DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: 75929891
Teléfono: 970394785 email: chaucha.kt21@gmail.com

Nombres y Apellidos: _____
Dirección: _____
DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: _____
Teléfono: _____ email: _____

Facultad y/o Escuela de Posgrado: INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS
Escuela Profesional o Mención: INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
Título o Grado Académico a optar: INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL
Asesor: Dr. ARNALDO YANA TORRES

Esta obra se encuentra dentro de las siguientes denominaciones:
Trabajo de Investigación Tesis Trabajo de Suficiencia Profesional Trabajo Académico

Título: EFICIENCIA DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL ADSORBENTE EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN AGUA DEL RÍO LLALLIMAYO SECTOR SUCRE

Palabras claves, (3 a 5 términos): ADSORCIÓN, ZEOLITA NATURAL, REMOCIÓN, MERCURIO

¿Esta obra se desarrolló en la UANCV ^{1, 2}?
2

¹ Indicar si su producción intelectual ha empleado recursos tales como, instalaciones, laboratorios, insumos, equipos, bases de datos, asesoría técnica por parte del personal de la UANCV, financiamiento, entré otros relacionados.
² Si su producción intelectual se desarrolló en la UANCV totalmente o parcialmente, deberá autorizar el depósito en el Repositorio de manera obligatoria.



2. Referencia de tesis:

Bachiller Título 2da Especialidad Maestría Doctorado

3. Licencias:

a) Licencia estándar:

Bajo siguientes términos, autorizo el depósito de mi tesis en el Repositorio Digital de la UANCV.

Con la autorización de depósito de mi producción Intelectual, otorgo a la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" una licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi producción intelectual (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de tesis UANCV, colección de producción intelectual, entre otros, en el Perú y en el extranjero por el tiempo y veces que considere necesarias, y libres de remuneraciones.

En virtud de dicha licencia, la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" podrá reproducir mi producción intelectual en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que la producción intelectual es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha producción intelectual no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" consignará el nombre del y/o los autor(es) de la producción intelectual, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la licencia.

Autorizo su publicación (marque con una X)

- Sí, autorizo que se deposite inmediatamente.
- Sí, autorizo que se deposite a partir de la fecha (d/m/a): _____
- No autorizo.

b) Licencia CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNACIONAL:

Si usted concede una licencia CREATIVE COMMONS sobre su producción intelectual, mantiene la titularidad de los derechos de autor de esta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de esta, bajo las condiciones siguientes:

¿Quiere permitir usos comerciales de su producción intelectual?

Sí: significa que usted permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la producción intelectual incluso con fines comerciales.

No: significa que usted permite la reproducción, y comunicación pública de la producción intelectual, pero sin fines comerciales.

- Sí autorizo
- No autorizo



Jurisdicción de su Licencia

Todas las licencias CREATIVE COMMONS son de ámbito mundial, sin embargo, usted puede elegir entre la opción “internacional” o una adaptada a su jurisdicción, como para el caso peruano.

La opción “internacional” emplea el lenguaje y la terminología de los tratados internacionales; en cambio, la adaptada a su jurisdicción, recoge las particularidades de la legislación peruana.

En consecuencia, **la opción “internacional” goza de una mayor eficacia a nivel mundial, gracias a que tiene jurisdicción neutral.** Mientras que la opción adaptada a la jurisdicción del Perú goza de una mayor eficacia ante los tribunales peruanos.

Internacional

Nacional

Línea de investigación: SANEAMIENTO AMBIENTAL - P22

Firma de Autor



huella digital

04 DE JULIO DEL 2025

Fecha