

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**Elementos tóxicos en aguas y sedimentos de dos fuentes  
termales en la región Ayacucho: As, Hg, Pb, Cd, Al y Fe**

**Tesis para obtener el título profesional de Licenciado en Química**

**AUTOR:**

Carlos Andrés Hoyos Fiorentini

**ASESOR:**

Dra. Nadia Rosa Gamboa Fuentes

Lima, noviembre, 2023

### Informe de Similitud

Yo, NADIA ROSA GAMBOA FUENTES, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesora de la tesis titulada "Elementos tóxicos en aguas y sedimentos de dos fuentes termales en la región Ayacucho: As, Hg, Pb, Cd, Al y Fe", del autor CARLOS ANDRÉS HOYOS FIORENTINI, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de **17%** (aplicando los filtros de exclusión de bibliografía y entre comillas). Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 06/11/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, lunes 6 de noviembre de 2023

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora:	
<u>Gamboa Fuentes, Nadia Rosa</u>	
DNI: 06450653	Firma 
ORCID: 0000-0003-0511-267X	

## RESUMEN

Las fuentes termales Pachapupum y Cceronta se ubican en la región de Ayacucho. Pachapupum es una formación concéntrica de material calcáreo, ubicada en la provincia de Huanca Sancos, y las fuentes termales se formaron naturalmente. Las aguas termales de Cceronta son un atractivo turístico abandonado, ubicado en el distrito y provincia de Lucanas. Los pobladores locales y los visitantes suelen aprovechar estas fuentes termales como balneario y se aplican emplastos de lodo, una práctica tradicional pero que representa un peligro latente relacionado a la exposición a elementos tóxicos tales como As, Hg, Cd y Pb, comunes en ese tipo de ambientes. Independientemente de la vía de absorción, pueden conllevar a problemas de salud debido a la imposibilidad del cuerpo humano de metabolizar elevadas concentraciones de dichos elementos químicos.

Bajo las condiciones existentes en ambas fuentes termales y buscando contribuir con el bienestar de la población ayacuchana, se analizaron los niveles de As, Hg, Pb, Cd, Al y Fe ambientalmente disponibles en agua y sedimento por espectrometría de absorción atómica (AAS), tanto por el método de llamas (Pb, Cd, Al y Fe) como por el método de generación de hidruros (As y Hg). Se implementó el método de extracción ácida para las muestras de sedimentos. Se buscó determinar si los niveles de dichos elementos en las pozas termales implican un potencial riesgo para la salud de los usuarios de estos recursos naturales. Asimismo, se dispone a entregar esta información química a los pobladores de ambas localidades para que puedan considerar una mejor gestión sobre el uso de las termas por los bañistas.

De los resultados obtenidos, aquel de mayor relevancia fue la elevada concentración de arsénico en ambas fuentes termales. La más contaminada es Cceronta con concentración de  $4,185 \pm 0,056$  mg As/L de agua y  $252,130 \pm 4,498$  mg As/kg de sedimento seco, mientras que para Pachapupum se determinó una concentración de  $0,890 \pm 0,012$  mg As/L de agua y  $273,552 \pm 4,693$  mg As/kg de sedimento seco. Estos valores superan los estándares establecidos por la ATSDR ya que a partir de valores de  $0,014$  mg As/kg se reportan problemas cardiovasculares y hepáticos, por lo que se recomienda a las autoridades encargadas de la localidad implementar un sistema de gestión, estableciendo el tiempo y la frecuencia del contacto de los usuarios con el agua y el sedimento de las fuentes termales con la finalidad de evitar peligros a la salud de las personas que hacen uso de las fuentes termales.

En cuanto a los niveles de Pb, se detectaron niveles superiores a los estándares nacionales de calidad ambiental para agua (Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM) en las aguas termales de Pachapupum ( $0,127 \pm 0,005$  mg/L), mientras que en Cceronta los valores estuvieron por debajo de los límites de detección y estándares nacionales ( $<0,048$  mg/L). Se detectó niveles elevados de mercurio en el sedimento de Cceronta ( $0,698 \pm 0,021$  mg/kg de sedimento seco) según el marco legal canadiense, normativa que se toma como referencia debido a los niveles más estrictos que expresa en comparación con otras normativas internacionales y por su especificidad respecto a los efectos límites y efectos probables. Se encontraron concentraciones de cadmio por debajo de los límites de detección en las aguas termales de Pachapupum ( $<0,032$  mg/L) y Cceronta ( $<0,032$  mg/L). En cuanto a los niveles en el sedimento, tanto de Pachapupum ( $4,052 \pm 0,058$  mg/kg) como de Cceronta ( $1,828 \pm 0,045$  mg/kg de sedimento seco), sugieren la posibilidad de efectos adversos según la normativa de calidad de Canadá.

Por último, se detectaron niveles muy elevados de Fe y Al tanto en Pachapupum como en Cceronta, siendo las concentraciones superiores en la matriz de sedimento, lo cual se explica por la misma geología del terreno. En Cceronta se detectaron  $1701,096 \pm 6,385$  mg/kg de sedimento seco de Fe y  $1052,015 \pm 32,890$  mg/kg de Al en el sedimento seco, mientras que en Pachapupum se detectaron  $5249,216 \pm 14,199$  mg/kg de Fe y  $5612,616 \pm 130,405$  mg/kg de Al en el sedimento seco.

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se recomienda no emplear para uso recreativo, y menos aún para ingesta, los recursos de las fuentes termales estudiadas debido a los niveles elevados de arsénico.

## ABSTRACT

The Pachapupum and Cceronta hot springs are located in the Ayacucho region. Pachapupum is a concentric formation of calcareous material, located in the province of Huanca Sancos, and the hot springs were formed naturally. The Cceronta hot springs are an abandoned tourist attraction, located in the district and province of Lucanas. Local residents and visitors often take advantage of these hot springs as a spa and apply mud plasters, a traditional practice that represents a latent danger related to exposure to toxic elements such as As, Hg, Cd and Pb, common in this type of environments. Regardless of the route of absorption, they can lead to health problems due to the inability of the human body to metabolize high concentrations of these chemical elements.

Under the existing conditions in both hot springs and seeking to contribute to the well-being of the Ayacucho population, the levels of As, Hg, Pb, Cd, Al and Fe environmentally available in water and sediment were analyzed by atomic absorption spectrometry (AAS), both by the flame method (Pb, Cd, Al and Fe) and by the hydride generation method (As and Hg). The acid extraction method was implemented for the sediment samples. It was sought to determine if the levels of these elements in the thermal pools imply a potential risk to the health of the users of these natural resources. Likewise, it is expected to deliver this chemical information to the residents of both towns so that they can consider a better management of the use of the hot springs by bathers.

From the results obtained, the most relevant finding was the high concentration of arsenic in both hot springs. The most contaminated one is Cceronta, with a concentration of  $4,185 \pm 0,056$  mg As/L of water and  $252,130 \pm 4,498$  mg As/kg of dry sediment, whereas for Pachapupum, a concentration of  $0,890 \pm 0,012$  mg As/L of water and  $273,552 \pm 4,693$  mg As/kg of dry sediment was determined. These values exceed the standards established by ATSDR, as cardiovascular and hepatic problems are reported from values of 0,014 mg As/kg. Hence, it is recommended that the local authorities responsible implement a management system, establishing the duration and frequency of users' contact with the water and sediment of the hot springs to prevent health hazards for those using them.

Regarding Pb levels, higher levels than the national environmental quality standards for water (Supreme Decree No. 004-2017-MINAM) were detected in the Pachapupum hot spring waters ( $0,127 \pm 0,005$  mg/L), whereas in Cceronta, values were below detection

limits and national standards ( $<0,048$  mg/L). Elevated levels of mercury were detected in Cceronta's sediment ( $0,698 \pm 0,021$  mg/kg) according to Canadian legal framework, which is used as a reference due to its stricter levels compared to other international standards and its specificity regarding limit effects and probable effects. Cadmium concentrations were found below detection limits in both Pachapupum ( $<0,032$  mg/L) and Cceronta ( $<0,032$  mg/L) hot spring waters. Concerning sediment levels, both in Pachapupum ( $4,052 \pm 0,058$  mg/kg) and Cceronta ( $1,828 \pm 0,045$  mg/kg), they suggest the possibility of adverse effects according to Canadian quality standards.

Lastly, very high levels of Fe and Al were detected in both Pachapupum and Cceronta, with higher concentrations in the sediment matrix, explained by the terrain's geology. In Cceronta,  $1701,096 \pm 6,385$  mg/kg of Fe and  $1052,015 \pm 32,890$  mg/kg of Al were detected in the sediment, whereas in Pachapupum,  $5249,216 \pm 14,199$  mg/kg of Fe and  $5612,616 \pm 130,405$  mg/kg of Al were detected in the sediment.

Based on the results obtained in this research, it is recommended not to use these water resources for recreational use, and even less for ingestion, especially due to the high levels of arsenic which can generate problems to the user's health, such as skin, respiratory and digestive conditions.

## AGRADECIMIENTO

Deseo comenzar agradeciendo a mis padres por el esfuerzo y apoyo que me han brindado durante mi etapa de estudiante, sin ellos nada de esto hubiera sido posible. Agradecer a todos mis familiares, en especial a mi abuela Augustita, abuela Lila, abuelo Alfonso, tía Ale, tío Cesar, tía Marina y todos los que me apoyaron en esta etapa tan importante de mi vida y confiaron en mí. Agradezco a Deborah Gonzales, que fue mi apoyo durante toda la etapa y que siempre me daba palabras de aliento cuando más lo necesitaba.

Un agradecimiento especial a mi asesora de tesis, la doctora Nadia Gamboa, por toda la dedicación y apoyo brindados en la elaboración de este trabajo tan importante de mi carrera profesional.

Agradezco a mis compañeros del Laboratorio de Química Ambiental quienes me enseñaron y apoyaron durante el desarrollo de este trabajo de investigación, especialmente a mi compañero David Grados por el apoyo otorgado en la realización de los análisis.

Agradezco a la Dirección Académica de Responsabilidad Social de la PUCP (DARS-PUCP) por el apoyo brindado para el Fondo Concursable Docente 2017 de Sensibilización y Capacitación en Contaminación Ambiental y Gestión de Recursos Sólidos Domésticos para los pobladores del distrito de Sacsamarca, en la región Ayacucho, que permitió el desarrollo de este trabajo de investigación, así como al Grupo GRIDES-PUCP por el acceso a materiales de monitoreo en campo.

De igual manera, deseo expresar mi gratitud hacia los pobladores de Sacsamarca, Puquio y Cceronta, así como a las autoridades de Sacsamarca, quienes me permitieron el acceso y guiaron hacia las zonas de muestreo. Además de haberme mostrado en todo momento su hospitalidad durante las estadías que tuve en sus localidades.

Agradezco al doctor Carlos Tavares de la Sección Geografía y Medio Ambiente de la PUCP por el apoyo y acompañamiento brindado en la toma de muestras en Pachapupum.

Gracias especiales a todos los estimados trabajadores de la Sección Química: Milka, Pancho, Humberto, Nicolas y Gilmer, que me apoyaron durante toda la carrera universitaria y me siguieron ayudando en la realización de la tesis.

A todas las personas mencionadas, reitero mi más profundo agradecimiento; sin su apoyo, este trabajo no podría haberse logrado.

## ÍNDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS.....	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Problema de investigación.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo general.....	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Ambientes termales.....	5
2.1.1. Aguas termales, termo-minerales y mineromedicinales.....	5
2.1.2. Influencia geológica en la composición química de aguas termales.....	6
2.1.3. Fuentes de agua termal a nivel mundial.....	7
2.1.4. Fuentes de agua termal en el Perú.....	8
2.2. Toxicología de metales pesados.....	10
2.2.1. Arsénico.....	11
2.2.2. Mercurio.....	14
2.2.3. Plomo.....	16
2.2.4. Cadmio.....	18
2.2.5. Hierro.....	20
2.2.6. Aluminio.....	21
2.3. Marco legal peruano.....	22
2.4. Marco legal canadiense de sedimentos.....	23
3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	25
3.1. Aspectos geológicos y geográficos de la zona de estudio.....	25
3.1.1. Aspectos geológicos de las fuentes termales de Pachapupum.....	27
3.1.2. Aspectos geológicos de Cceronta.....	27
3.2. Situación socioeconómica de Sacsamarca.....	28
3.3. Situación socioeconómica de Cceronta.....	28
4. PARTE EXPERIMENTAL.....	30
4.1. Materiales, reactivos y equipos.....	30
4.2. Distribución de las estaciones de muestreo.....	32
4.2.1. Estaciones de muestreo en Pachapupum.....	32
4.2.2. Estaciones de muestreo de Cceronta.....	34
4.2.3. Compilación de estaciones y subestaciones de muestreo.....	36
4.3. Procedimiento de colecta de muestras.....	37
4.4. Condiciones de almacenamiento de muestras.....	38
4.5. Parámetro medidos “ <i>in situ</i> ”.....	39



4.5.1.	Temperatura .....	39
4.6.	Tratamiento de las muestras.....	39
4.6.1.	Muestras de agua .....	39
4.6.2.	Muestras de sedimento.....	40
4.7.	Análisis espectroscópico de las muestras .....	41
4.8.	Preparación y tratamiento de muestras líquidas para análisis espectroscópico.....	42
4.8.1.	Arsénico.....	42
4.8.2.	Mercurio.....	43
4.8.3.	Plomo, cadmio, aluminio y hierro.....	43
4.9.	Lavado de materiales .....	44
4.10.	Disposición de residuos .....	44
5.	<b>RESULTADOS</b> .....	45
5.1.	Resultados de parámetros fisicoquímicos.....	45
5.1.1.	Temperatura y pH .....	45
5.2.	Resultados de análisis espectroscópicos.....	45
5.2.1.	Arsénico.....	48
5.2.2.	Mercurio.....	49
5.2.3.	Plomo.....	49
5.2.4.	Cadmio .....	51
5.2.5.	Hierro .....	51
5.2.6.	Aluminio.....	52
6.	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	60
6.1.1.	Temperatura de las aguas termales.....	60
6.1.2.	Análisis de metales pesados.....	60
6.1.2.1.	Arsénico .....	60
6.1.2.2.	Hierro y aluminio .....	61
6.1.2.3.	Mercurio.....	61
6.1.2.3.1.	Plomo.....	62
6.1.2.4.	Cadmio .....	62
6.1.2.5.	Resultados del Laboratorio ALS vs Resultados PUCP .....	63
7.	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	64
7.1.	Conclusiones .....	64
7.2.	Recomendaciones .....	66
8.	<b>REFERENCIAS</b> .....	67
9.	<b>ANEXOS</b> .....	74
	Anexo 1: Entrevista a pobladores de Ayacucho .....	74
9.1.1.	Percepción de los pobladores con respecto a las fuentes termales .....	74

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Toxicología de los metales .....	11
Figura 2. Ciclo biogeoquímico del arsénico .....	14
Figura 3. Ciclo biogeoquímico del mercurio .....	15
Figura 4. Ciclo biogeoquímico del plomo .....	18
Figura 5. Ciclo biogeoquímico del cadmio .....	19
Figura 6. Ciclo biogeoquímico del hierro .....	21
Figura 7. (A) Ubicación geográfica las aguas termales de Cceronta con respecto al distrito de Puquio de la provincia de Lucanas .....	25
Figura 8. A) Cavernas de disolución observadas desde la cima de Pachapupum .....	26
Figura 9. Vista principal de Pachapupum .....	27
Figura 10. Ubicación geográfica de fuente termal de Pachapupum respecto a Sacsamarca .....	33
Figura 11. Poza natural principal (~440 m <sup>2</sup> ) .....	33
Figura 12. Poza secundaria (Ojos) .....	34
Figura 13. Vista externa de baño termal .....	35
Figura 14. Baños termales .....	35
Figura 16. Origen de agua termal (a ~110 m de baño termal) .....	35
Figura 15. Riachuelo con destino a baños termales .....	35
Figura 17. Efecto climatológico sobre la ruta a Pachapupum .....	36
Figura 18. Diseño de muestreo estratificado y sistemático .....	37
Figura 19. Toma de temperatura en puntos de muestreo .....	39
Figura 20. Extracción ácida basada en la norma EPA 3050B .....	40
Figura 21. Preparación y tratamiento de soluciones estándar y muestras de As para análisis espectroscópicos .....	42
Figura 22. Preparación y tratamiento de soluciones estándar y muestras de Hg para análisis espectroscópicos .....	43
Figura 23. Procedimiento de lavado de materiales .....	44
Figura 24. Curva de calibración para As por AAS-GH, Hg, Pb, Cd, Fe, Al .....	47
Figura 25. Gráfico de barras con resultados de concentración (mg/L) de analitos en muestras de agua de Pachapupum y de Cceronta .....	55
Figura 26. Gráfico de barras con resultados de concentración (mg/kg) de analitos en muestras de sedimento de Pachapupum y de Cceronta .....	56

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las fuentes de agua según su temperatura.....	5
Tabla 2. Niveles máximos permitidos de contaminantes en agua .....	9
Tabla 3. Principales minerales de arsénico.....	12
Tabla 4. Niveles de exposición a arsénico con efectos adversos en humanos.....	13
Tabla 5. Niveles de exposición a mercurio con efectos adversos en humanos.....	15
Tabla 6. Niveles de exposición a cadmio con efectos adversos en humanos .....	20
Tabla 7. Estándares nacionales de calidad ambiental (ECA) para agua - subcategoría B: Aguas superficiales destinadas a la recreación.....	23
Tabla 8. Niveles de efecto límite y efecto probable.....	24
Tabla 9. Ubicación geográfica en coordenadas UTM y altitud de los puntos registrados alrededor de la poza termal principal de Pachapupum (P1-P5) en el 2017 .....	32
Tabla 10. Asignación de estaciones y subestaciones de muestreo .....	37
Tabla 11. Condiciones de almacenamiento de muestras según analito a analizar .....	38
Tabla 12. Límite de detección y cuantificación y cuantificación .....	42
Tabla 13. Temperatura de los puntos de muestreo.....	45
Tabla 14. Valores empleados para la curva de calibración de cada analito.....	46
Tabla 15. Concentraciones de arsénico en agua en Pachapupum colectadas en marzo de 2020 .	48
Tabla 16. Concentraciones de arsénico en sedimento en Pachapupum y Cceronta .....	48
Tabla 17. Concentraciones de mercurio en agua en Pachapupum y Cceronta .....	49
Tabla 18. Concentraciones de mercurio en sedimento en Pachapupum y Cceronta .....	49
Tabla 19. Concentraciones de plomo en agua en Pachapupum y Cceronta .....	50
Tabla 20. Concentraciones de plomo en sedimento en Pachapupum y Cceronta .....	50
Tabla 21. Concentraciones de cadmio en agua en Pachapupum y Cceronta .....	51
Tabla 22. Concentraciones de cadmio en sedimento en Pachapupum y Cceronta .....	51
Tabla 23. Concentraciones de hierro en agua en Pachapupum y Cceronta .....	52
Tabla 24. Concentraciones de hierro en sedimento en Pachapupum y Cceronta.....	52
Tabla 25. Concentraciones de aluminio en agua en Pachapupum y Cceronta.....	53
Tabla 26. Concentraciones de aluminio en sedimento en Pachapupum y Cceronta .....	53
Tabla 27. Resumen de Concentraciones de agua y sedimento promedio*.....	54
Tabla 28. Resultados de agua mediante ICP-MS en colaboración con el Laboratorio ALS .....	57
Tabla 29. Resultados de sedimento mediante ICP-OES con el Laboratorio ALS.....	58
Tabla 30. Resultados de concentraciones de analitos según análisis en la PUCP y en ALS.....	59

## ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS

AAS	Espectroscopía de absorción atómica
APHA	Asociación Americana de Salud Pública
ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades
AWWA	American Water Works Association
CIMAV	Centro de Investigación en Materiales Avanzados de México
DARS	Dirección Académica de Responsabilidad Social de la PUCP
DMA	Ácido dimetilarlésnico
ECA	Estándares de calidad ambiental
FAAS	Espectroscopía de absorción atómica a la llama
FIAS	Análisis por inyección en flujo
IARC	Centro Internacional de Investigaciones para el Cáncer,
INGEMMET	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico
MINCETUR	Ministerio de Comercio Exterior y Turismo
MMA	Ácido metilarlésnico
OMS	Organización Mundial de la Salud
PEL	Niveles de efecto probable
TEL	Niveles de efecto límite
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
WPCF	Establecimiento de Control de Polución de Agua de los Estados Unidos
WRC	Water Research Commission

## 1. INTRODUCCIÓN

Los países referentes en turismo termal tienen políticas que aseguran la calidad de los servicios e instalaciones y, por ende, el uso seguro de aguas. En el Perú, recién en noviembre de 2011 se aprobó el reglamento de los servicios turísticos que prestan los centros de turismo termal y/o similares por la Ley N°29408-Ley General de Turismo, (MINCETUR, 2012) que estipula las obligaciones de los prestadores de estos servicios. Sin embargo, la falta de estudios y difusión de información en este tema a nivel nacional es una amenaza a la salud de la población que acude a los ambientes termales.

Existen más de 500 fuentes termales en Perú, y según el MINCETUR, aproximadamente 242 tienen capacidad para ser aprovechadas turísticamente. El desarrollo termal en el país no es prioridad para el sector público ni para el sector privado, a pesar de la vasta oferta termal en varias regiones. (MINCETUR, 2012) Por lo general, se aprovechan estos recursos termales bajo las condiciones existentes, con carencias en cuanto a infraestructura y servicios básicos. Se comienza como un servicio de bien local, mayormente recreativo y, conforme aumenta su aceptación, se invierte progresivamente en sus instalaciones sin una planificación previa.

En la cosmovisión andina, la tierra no solo es una porción de suelo por el cual caminan las personas, el agua no es simplemente una molécula compuesta por dos átomos de hidrógeno y una de oxígeno. La división entre lo vivo y lo inerte no existe, y los pobladores consideran que toda la materia del mundo está viva. (Vásquez, 2015) Dicha cosmovisión es compartida por la comunidad de Sacsamarca, una comunidad campesina de Ayacucho afectada por el terrorismo en la década de los años 80 que busca sobreponerse a los sucesos ocurridos y mejorar su calidad de vida con nuevas formas de ingreso económico. Sin embargo, el mismo respeto y admiración que le tienen a la naturaleza, envuelve un problema latente relacionado directamente con la salud humana por desconocimiento de aspectos científicos importantes.

El turismo en Sacsamarca es una potencial fuente de ingreso económico, tanto por los paisajes como por las fuentes termales. Pachapupum, conocido como el “ombligo de la tierra”, es una estructura calcárea considerada como un símbolo turístico de orgullo para la comunidad debido a sus escarpadas formaciones geológicas y la presencia de aguas termales. La estructura fue moldeada por un manantial principal de agua termal que fluye

por la parte central, además se formaron pozas termales de manera natural a su alrededor. (Steinmüller & Huamani Huaccán, 1997)

Debido a la reputación y libre acceso a Pachapupum, los pobladores y visitantes aprovechan las fuentes termales con baños prolongados en las pozas termales y aplicación de emplastos de lodo. Estas actividades se realizan sin tener conocimiento de los riesgos asociados. Uno de los peligros es la exposición vía dérmica, o por ingesta, a concentraciones elevadas de elementos tóxicos comúnmente presentes en ambientes termales, como arsénico, mercurio y plomo, que pueden ser fácilmente absorbidos por la piel debido a que las temperaturas del agua superan los 40°C. Esta exposición puede ocasionar problemas severos en la salud de las personas si ocurre de manera recurrente además de que la prolongada inmersión en aguas muy calientes puede provocar quemaduras en la piel.

A unas horas de Sacsamarca, en el distrito de Lucanas, cerca de la ciudad de Puquio fluyen las aguas termales de Cceronta que se almacenan en piscinas artificiales como oferta turística. Algunos estudios solicitados por las autoridades locales en 1998 reportaron altos contenidos de arsénico que excedían el valor límite establecido por la Ley General de Aguas, el cual es de 1 mg/L para zonas recreativas de contacto primario, es decir para el empleo como balnearios. (Steinmuller & Núñez Juárez, 1998)

Por lo anterior, es importante y necesario determinar los niveles de arsénico, mercurio, cadmio, plomo, aluminio y hierro en sus aguas termales y sedimentos en las fuentes termales de Pachapupum y Cceronta. Este último lugar será estudiado a modo de comparación con las fuentes de Pachapupum, ya que, al encontrarse cercanos, probablemente pertenezcan a la misma asociación geológica y compartan contaminantes naturales. Se espera que estos resultados sirvan a ambas comunidades locales y, con apoyo de la Dirección Académica de Responsabilidad Social de la PUCP, se comunicarán los resultados de modo que las poblaciones locales puedan hacer un uso responsable y seguro de las fuentes termales.

## 1.1. Problema de investigación

En Ayacucho hay mucha oferta termal poco conocida por la población ajena a esta región; las aguas termales de Pachapupum y Cceronta, ubicadas en las cercanías de Sacsamarca y Puquio, respectivamente, son ejemplos de esta oferta. En Pachapupum se formaron naturalmente pozas de agua termal cuyas temperaturas no superan los 40°C, pero que no tienen una infraestructura adecuada, ni servicios básicos. Las aguas de Cceronta, con temperaturas que superan los 60°C, son almacenadas en piscinas de cemento construidas a pocos metros de los ojos de agua termal. En este caso, existen algunos estudios químicos que advierten sobre los riesgos del uso de estas aguas, aunque los pobladores continúan acudiendo con fines terapéuticos.

El problema de investigación que se plantea aquí es una consecuencia de las experiencias y eventos vividos y observados en la ruta de Sacsamarca y Puquio, atestiguando su cosmovisión con respecto a la naturaleza, y al mismo tiempo, una contradicción en cuanto al uso y cuidado de estos recursos naturales, pues se encuentran residuos sólidos en los ojos de agua termal y en los alrededores. Este comportamiento claramente afecta la calidad de este ecosistema y puede explicarse en la baja calidad de vida de la población, poco conocimiento sobre el manejo responsable de los recursos naturales y sobre los peligros asociados a los mismos. La misma situación se da en Cceronta, sin embargo, ahí ya se cuenta con una advertencia de sus autoridades con respecto a la calidad de agua termal. De este modo, en el Anexo 1 de este documento se presentan extractos de entrevistas realizadas a algunos pobladores de Ayacucho sobre su percepción respecto al uso de las aguas termales locales.

Ante lo expuesto surgen las siguientes preguntas: ¿Cómo se puede orientar a la población para hacer un uso responsable de los recursos termales con el fin de preservarlos? ¿La población que asiste a las fuentes termales mencionadas es consciente de los peligros asociados a las mismas? ¿Qué actividades relacionadas a estas aguas termales ponen en peligro la salud de los visitantes? ¿Los peligros asociados a las fuentes termales en el Perú son debidamente informados a la población? ¿En qué concentración se encuentran algunos metales pesados en las aguas termales y sedimentos de Pachapupum y Cceronta?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

El objetivo principal de este trabajo de investigación es cuantificar los niveles de As, Hg, Pb, Cd, Al y Fe mediante análisis de espectrometría de absorción atómica a muestras de agua y sedimento de las fuentes termales de Pachapupum y de Cceronta para determinar si las concentraciones de estos elementos representan un peligro para la salud de los usuarios locales y visitantes de estos recursos naturales.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Implementar una metodología de extracción ácida para determinar las concentraciones de As, Hg, Pb, Cd, Al y Fe en el sedimento y agua de ambas fuentes termales.
- Determinar las concentraciones de As, Hg y Pb, Cd, Al y Fe en sedimentos y aguas en Cceronta y Pachapupum y contrastarlos con la normativa nacional e internacional aplicable.
- Informar sobre potenciales peligros en el uso inadecuado de ambas fuentes termales para las poblaciones involucradas.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Ambientes termales

#### 2.1.1. Aguas termales, termominerales y mineromedicinales

Un aspecto importante que se debe tener en cuenta para esta investigación es la diferenciación entre aguas termales, termominerales y mineromedicinales. Por ello, a continuación, se presenta una breve descripción de las clases de fuentes de agua existentes que nos permita comprender mejor la diferencia entre estas.

Las aguas termales surgen de estratos acuíferos subterráneos y presentan temperaturas 5°C o más por encima de la temperatura ambiental media anual.(Acosta, 2015; Valle, 1973) Existe una clasificación de aguas termales que está basada en la temperatura indiferente del organismo (temperatura en la que el cuerpo humano no siente ni frío ni caliente ante el estímulo térmico), la cual es útil desde el punto de vista hidroterapéutico, mostrada en la Tabla 1. (Acosta, 2015)

Tabla 1. Clasificación de las fuentes de agua según su temperatura

Clasificación	Temperatura del agua (T)
Hipotermiales	$T < 35^{\circ}\text{C}$
Mesotermiales	$35^{\circ}\text{C} < T < 37^{\circ}\text{C}$
Hipertermiales	$T > 37^{\circ}\text{C}$

Las aguas termominerales se caracterizan por presentar las características de las aguas termales y también de las minerales, es decir la temperatura y la presencia de sales en sus aguas, y, por último, están las aguas mineromedicinales que, por su naturaleza química y física, tienen propiedades terapéuticas. No todas las aguas termales son aguas minerales, ni todas las aguas minerales (o termominerales) son necesariamente medicinales. (Vargas, 2010)

### **2.1.2. Influencia geológica en la composición química de aguas termales**

La mayoría de las rocas sedimentarias son materiales que se forman debido a procesos de meteorización o erosión de rocas preexistentes, los cuales fragmentan físicamente la roca en partículas de menor tamaño, llamadas sedimentos, y se acumulan en capas, depositándose en lagos, valles de ríos, mares e incluso fuentes termales. En este último caso, el desgaste continuo de las rocas subterráneas, originado por el flujo de agua termal, aporta naturalmente elementos y compuestos que son asimilados en el medio. El proceso de meteorización es continuo y se encuentran rastros de sedimentos en casi cualquier parte. (Lutgens & Tarbuck, 2005)

Si se tiene en cuenta que lo que determina las propiedades de las aguas presentes en una fuente es la naturaleza geológica del entorno, se puede establecer que existe una relación íntima entre las rocas, sedimentos y las aguas de fuentes termales. Esto se debe a que, en las regiones volcánicas, la actividad magmática genera la elevación de la temperatura del agua, el enriquecimiento de gases y mineralizaciones como ácido bórico, metales pesados, entre otros. (San Miguel de la Cámara, 1956)

La composición química de los sedimentos en la zona podría estar ligada en gran parte a la erosión y la meteorización de las rocas y a las aguas termales que arrastran compuestos naturales o antropogénicos de los acuíferos que las alimentan. En la mayoría de las aguas termales, el enfriamiento de las rocas ígneas genera un flujo del agua subterránea hacia la superficie donde el material que está en solución tiende a precipitar, causando una acumulación de sedimentos. (Lutgens & Tarbuck, 2005)

Las sustancias químicas asociadas a los sedimentos se pueden movilizar a la columna de agua termal, o viceversa, debido a cambios en las condiciones ambientales como acidez, temperatura, potencial redox, oxígeno disuelto o la presencia de quelatos orgánicos. (Galetovic Carabantes & De Fernicola, 2003)

La mineralización de las aguas termales se puede producir de tres maneras (San Miguel de la Cámara, 1956):

- Por disolución de sustancias directamente solubles en el agua ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ , entre otros).

- Por reacciones químicas sobre los minerales del terreno. Por ejemplo, la oxidación de piritas ( $\text{FeS}_2$ ) origina sulfatos fácilmente solubles; la acción del  $\text{CO}_2$  produce bicarbonatos solubles; la descomposición de feldespatos forma sales solubles.
- Por aporte gaseoso de origen profundo en regiones volcánicas.

### **2.1.3. Fuentes de agua termal a nivel mundial**

Las fuentes de agua termal se pueden encontrar en diferentes regiones del mundo, desde exclusivos centros de relajación y esparcimiento en Europa, donde se emplean para surtir spas, saunas y también como balnearios, hasta en Norteamérica y Sudamérica con amplias zonas de afloramientos termales donde se han desarrollado complejos turísticos con fines recreacionales y de relajación. (Steinmüller & Huamaní Huaccán, 1997) Debido a ello, se han realizado numerosos estudios del agua proveniente de estas termas con el propósito de determinar la composición química y parámetros fisicoquímicos.

En el 2009 se realizó en Estados Unidos una serie de estudios a las aguas termales del parque nacional Hot Springs, en el estado de Arkansas, ampliamente usadas para el tratamiento de enfermedades reumáticas. Esto debido a un caso reportado de presencia de agua caliente en un pozo que durante quince años había servido de fuente de agua de uso diario para una residencia, lo cual comenzó a desencadenar dudas acerca de si la causa eran filtraciones de agua termal provenientes de Hot Springs causadas por fracturas en los sistemas subterráneos de agua debido a trabajos de construcción en carreteras cercanas a la zona. El análisis estuvo a cargo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y consistió en la medición de pH, conductancia, temperaturas y análisis de diversos iones como sulfatos y carbonatos, y elementos como magnesio, arsénico, bario, plomo, hierro, entre otros, con lo cual se obtuvo que las aguas provenientes de los puntos de muestreo poseían concentraciones elevadas de los parámetros estudiados, pero que no se encontraban en el rango de valores que representan un potencial daño para la salud según la OMS. (Kresse & Hays, 2009)

En Sudáfrica, el Centro de Investigación del Agua (WRC por sus siglas en inglés) llevó a cabo un estudio en el año 2013 para identificar e inventariar las fuentes termales a lo largo de su territorio, y realizar un análisis de sus propiedades físicas y de su composición química. Algunos analitos analizados fueron: sulfatos, nitritos, cadmio, plomo, cromo,

mercurio y arsénico. Además, uno de los objetivos de este trabajo era determinar si las cantidades presentes de estas especies disueltas en el agua termal eran las adecuadas y necesarias para el establecimiento de actividades de extracción de los mismos con miras a su comercialización. (Olivier & Jonker, 2013)

Los resultados fueron comparados con las pautas establecidas por el Departamento de Agua y Saneamiento (DAAF) para uso doméstico en ese país, debido a que las que corresponden para uso recreacional se enfocan en la microbiología y los efectos que generan los cambios de pH en el agua. Se concluyó que solo dos de las fuentes termales estudiadas eran aptas para su uso como balnearios debido a que las demás presentaron niveles elevados de fluoruro, además de concentraciones altas de mercurio. (Olivier & Jonker, 2013)

En el año 2009 se realizó un estudio del agua de las fuentes termales de mayor afluencia en la ciudad de Chihuahua, México, con el objetivo de cuantificar el arsénico presente y determinar si eran aptas para el uso recreativo. También se realizó un análisis de muestras de sedimento provenientes de San Diego de Alcalá, lugar ampliamente conocido por afloramientos de agua termal. La investigación fue llevada a cabo por el Centro de Investigación en Materiales Avanzados y los resultados obtenidos fueron comparados con los valores máximos permitidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes aplicado a embalses naturales y artificiales. (NORMA Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, 1996)

Se encontró que las cantidades de arsénico en las muestras de agua de todas las termas estudiadas eran elevadas; lo mismo se obtuvo para las muestras de sedimento. Se concluyó que era de vital importancia realizar un seguimiento mediante estudios de este lugar, así como el establecimiento de medidas de remediación para estos niveles de contaminación. (López et al., 2011)

#### **2.1.4. Fuentes de agua termal en el Perú**

Se han realizado diversos estudios sobre las fuentes termales con el objetivo de levantar un inventario nacional, determinar las características fisicoquímicas de sus aguas y determinar su posible potencial turístico, en comparación a las normativas nacional e internacional considerando su uso recreativo. (Huamaní Huaccán, 2001) Los resultados

obtenidos se compararon con los valores máximos permitidos de contaminantes, los cuales se agrupan en la Tabla 2.

Tabla 2. Niveles máximos permitidos de contaminantes en agua

	<b>OMS (Guidelines for drinking-water quality: 4<sup>th</sup> edition)</b>	<b>MINSA (Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM)</b>
<b>Arsénico</b>	0.010 mg/L	0.010 mg/L
<b>Cadmio</b>	0.003 mg/L	0.003 mg/L
<b>Cromo</b>	0.05 mg/L	0.050 mg/L
<b>Mercurio</b>	0.006 mg/L	0.001 mg/L
<b>Plomo</b>	0.010 mg/L	0.01 mg/L

El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) estudió en el año 2001 la calidad del agua de fuentes termales, minerales y termominerales en las regiones de Apurímac, Cusco, Madre de Dios y Puno con la finalidad de estimar su potencial turístico. Se concluyó que una serie de las termas estudiadas sí cumplían con los requerimientos necesarios para ser desarrolladas como futuros complejos turísticos y que, adicionalmente a la calidad del agua, la cercanía de las fuentes termales a carreteras que facilitarían el acceso. Algunas de estas termas estudiadas fueron las de Ccolpani, Quellomayo, Chaqueylla y Ccocho. Según el trabajo presentado por Huamaní, se estudiaron fuentes termales agrupadas en cuatro secciones, y de un total de 100 fuentes de agua estudiadas, 44 fuentes se catalogaron como no recomendables para el uso recreativo de baño, según la Ley General de Aguas D.L.N° 17752 (Huamaní Huaccán, 2001)

En el 2006 se analizaron las aguas de fuentes termales en el Callejón de Huaylas en la región Áncash. Se determinaron la temperatura, olor, pH, niveles de litio, cadmio, plomo, manganeso y hierro, entre otros, usando métodos estandarizados de la Asociación Americana de Salud Pública (APHA), la Asociación Americana del Agua (AWWA) y la Federación de Control de Polución del Agua (WPCF). Los resultados mostraron que algunas de las fuentes excedían los niveles de cadmio en un 10%, manganeso en un 180% en base a la normativa de la OMS para aguas con fines de ingesta, plomo en un 20% en comparación a lo que estipula la NTP.(Yupanqui, 2006)

En el 2013 se llevó a cabo un estudio de las aguas termominerales de Cachicadan, Yanisara, baños Chimú y Huaransal en la región de La Libertad. Se escogieron estas fuentes debido a la mayor afluencia de público. Se monitorearon parámetros físicoquímicos y se cuantificaron metales como plomo, hierro y magnesio de acuerdo a métodos estandarizados APHA y AWWA. Los resultados mostraron que ninguna de estas fuentes termales se encuentra apta para la ingesta o actividades de riego, pero pueden ser empleadas para actividades recreativas debido a que las concentraciones de los metales estudiados no exceden los límites máximos permitidos por la OMS. (Espejo Reyes & Mantilla Villar, 2013)

En el año 2015, como en el caso anterior de La Libertad, se realizó una investigación para determinar la calidad del agua en las fuentes termales de los Baños del Inca en la región de Cajamarca. Se analizaron pH, conductividad, sólidos disueltos, dureza y temperatura; componentes inorgánicos como cloruros, sulfatos y bicarbonatos, y metales como magnesio, hierro, cobre, manganeso, calcio y sodio por espectroscopía de absorción atómica. Los resultados muestran que las cantidades de hierro, manganeso y sulfatos son mayores a los máximos permitidos por el Reglamento de la Calidad del Agua para el Consumo Humano del Ministerio de Salud. Por esto se concluyó que las aguas de esta terma no son aptas para la ingesta ni para actividades de riego, pero sí para actividades recreativas o de balneario. (Maxe Malca, 2015)

## **2.2. Toxicología de metales pesados**

Muchos iones metálicos, usualmente tóxicos, se asocian con minerales como carbonatos o sulfatos, o forman compuestos iónicos mediante fenómenos de intercambio iónico, adsorción o quelación en la fase sólida de los cuerpos acuáticos.

Las personas interactúan tanto con el agua como con el sedimento en las fuentes termales, por lo que es necesario tener en cuenta ciertos elementos químicos tóxicos para la salud humana presentes de manera natural, como arsénico, mercurio, plomo y cadmio. Estos elementos, según la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR), están considerados entre los más peligrosos debido a la prevalencia y la toxicidad relativa que genera su exposición en comunidades subatendidas y de escasos recursos. (ASTDR, 2019) En la figura 1 se esquematiza la toxicidad y ecotoxicidad de los compuestos químicos en el ambiente. Se puede ver que las fuentes de estas especies

son naturales y antropogénicas, y que ambas pasan por ciclos en los cuales se distribuyen, en algunos casos por diferentes ecosistemas, hasta eventualmente tener contacto con los seres humanos. En este punto, las especies metálicas pueden generar en el organismo estrés oxidativo o daños severos al ADN, lo cual desencadena patologías cuya severidad está conectada con el tipo de exposición a los metales. (Klaassen, 2019)

Debido a lo anterior, conocer la concentración de los elementos tóxicos en el sedimento y en el agua es importante para tomar las medidas de seguridad adecuadas si se desea clasificar las fuentes termales como aptas para el uso humano.

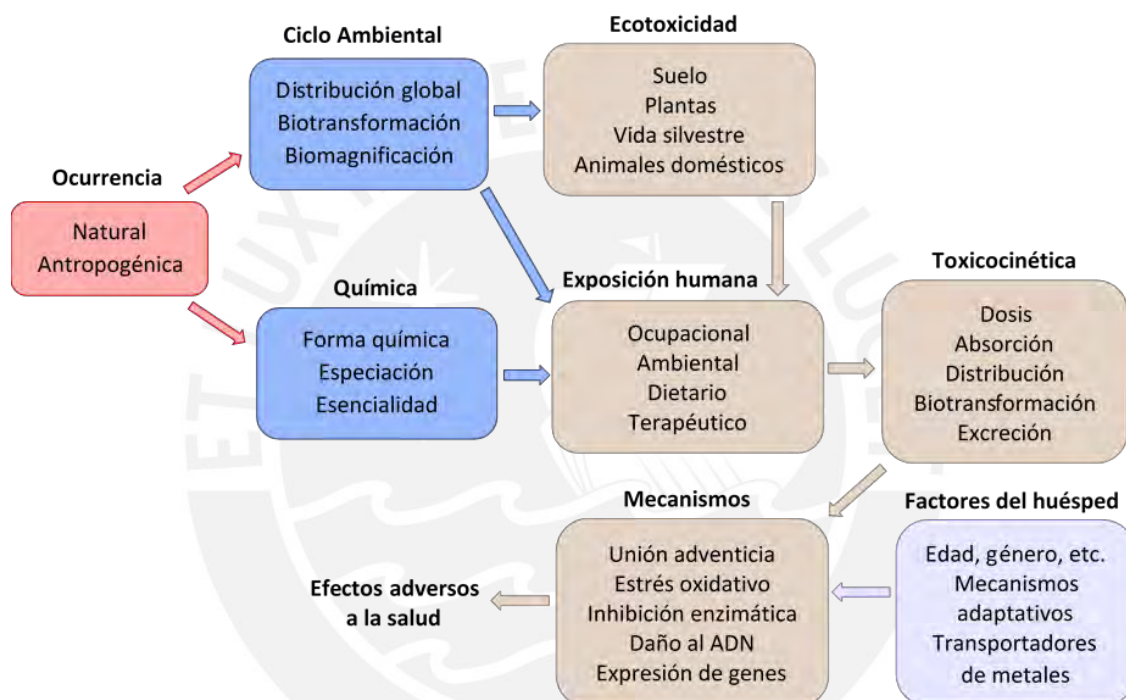


Figura 1. Toxicología de los metales (adaptado de Toxicology: The Basic Science of Poison de Klaassen (2019))

### 2.2.1. Arsénico

El arsénico está considerado entre los veinte elementos más abundantes sobre la Tierra. Las personas se encuentran expuestas a cantidades trazas de estos elementos de manera continua. (Kresse & Hays, 2009)

Está presente en minerales de oro, plata, zinc, hierro, cobre y plomo, y se le puede encontrar en forma de sulfuros de arsénico (III) como es el caso del oropimente, arseniatos, arseniuros, arsenitos, óxidos, silicatos y también en su estado elemental, como

se puede ver en la Tabla 3. (Valle, 1973) Los minerales de mayor importancia y extracción son la enargita, los depósitos de cobre de piritas arsenicales y rejalgar. (MINEM, n.d.)

Tabla 3. Principales minerales de arsénico (Valle, R. Z. (1973). *Agua minerales del Perú*. INGEMMET. Boletín, Serie D: Estudios Regionales; n° 2. Repositorio Institucional de INGEMMET. Acceso en: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/348>

Mineral	Composición	Ocurrencia
Arsénico nativo	As	Venas hidrotermales
Arsenopirita	FeAsS	Mineral de As más abundante
Oropimente	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Venas hidrotermales y producto de sublimación de emanaciones volcánicas
Rejalgar	AsS	Generalmente asociado con oropimente, arcillas y carbonatos
Nicolita	NiAs	Filones y noritas
Cobaltita	CoAsS	Depósitos de rocas metamórficas
Arsenolita	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mineral secundario formado por oxidación de arsenopirita, As nativo y otros minerales de As
Tennantita	(Cu,Fe) <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	Venas hidrotermales
Enargita	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub>	Venas hidrotermales
Escorodita	FeAsO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Mineral secundario

Los niveles de arsénico en el ambiente son variables debido a su alta movilidad y gran capacidad de transformación, como se presenta más adelante en la Figura 2. Puede sorberse o desorberse de partículas y además reacciona con moléculas en el aire, agua o suelo para cambiar su estado de oxidación. (Valle, 1973)

Las especies químicas de As inorgánico más frecuentes en la naturaleza están en forma de oxoaniones, en estados de oxidación As (III), como H<sub>3</sub>AsO<sub>3</sub> y As (V), como H<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub>, además de las especies orgánicas de As como ácido metilarsónico (MMA) y dimetilarsínico (DMA), ambas con As (V). Estas últimas suelen presentarse en menor concentración que las especies inorgánicas, sin embargo, sus concentraciones pueden incrementarse como producto de reacciones de metilación por acción bacteriana. (Lillo, 2008) Las especies inorgánicas de As son las que representan un mayor riesgo a la salud comparadas con las orgánicas. (Valle, 1973)

Las concentraciones en los fluidos de la mayoría de los sistemas geotérmicos en el mundo suelen ser de uno a tres órdenes de magnitud mayores que las de las aguas subterráneas no contaminadas. Uno de los principales riesgos relacionados es que la descarga de aguas geotérmicas ricas en arsénico puede contaminar otras fuentes de agua natural que en casos



son empleadas como agua para consumo, afectando la salud de la población. (Acosta, 2015)

El arsénico afecta a la mayoría de los sistemas en el cuerpo humano dependiendo del tipo de exposición, ya sea por ingesta, inhalación o contacto dérmico, y de la duración de la exposición, la cual puede ser aguda o crónica. (Vargas, 2010) Entre los principales efectos adversos se encuentran problemas gastrointestinales, hepáticos, renales, cardiovasculares, respiratorios y hematológicos; de igual manera, problemas reproductivos y desarrollo de cáncer de pulmón y de piel. El arsénico tiene afinidad por la piel y se excreta por la descamación de esta y mediante la sudoración. Normalmente, se concentra en el cabello, ligado a la queratina y en las uñas, formando las líneas de Mees, las cuales son características bandas blancas transversales a través de las uñas. (Klaassen, 2019)

El potencial carcinogénico del arsénico fue reconocido en 1888 por Hutchinson, quien observó una cantidad inusual de casos de cáncer de piel en pacientes tratados con medicinas arsenicales para el tratamiento de diversas afecciones como úlceras o problemas dérmicos como la psoriasis. (Adams, 2008) Según la ATSDR, la dosis letal en humanos para el trióxido de arsénico ingerido es de 70 a 180 mg, o aproximadamente 600 microgramos por kg/día. (ATSDR, 2009; Klaassen, 2019) En la Tabla 4 se muestran los valores de arsénico reportados por la ATSDR que pueden tener efectos adversos en la salud, o incluso causar la muerte de quienes entran en contacto con estas concentraciones. Estos valores se presentan en unidades de mg de As por cada kg de peso de una persona. (ATSDR, 2007).

Tabla 4. Niveles de exposición a arsénico con efectos adversos en humanos (ATSDR, 2007)

Efectos \ Exposición	Oral	
	Inorgánico	Orgánico
<b>Muerte</b>	22-121 mg As/kg	No reportado
<b>Problemas cardiovasculares</b>	0,014-0,065 mg As/kg	No reportado
<b>Problemas hepáticos</b>	Mayor a 0,006 mg As/kg	No reportado
<b>Problemas renales</b>	No se reportan daños mayores	No reportado
<b>Problemas neurológicos</b>	Mayor a 2 mg As/kg	No reportado
<b>Cancerígeno</b>	0,64 mg As/ L	No reportado

Existen varias hipótesis que proponen la existencia de una susceptibilidad a la toxicidad del arsénico, entre ellas se encuentran la desnutrición y los malos patrones dietéticos que

pueden incrementar la absorción de arsenitos en el hígado y posiblemente en otras células, aumentando el riesgo de enfermedades inducidas por arsénico. (ATSDR, 2009; Chung et al., 2006)

En la figura 2 se presenta el ciclo biogeoquímico del arsénico, en el cual se puede ver que las fuentes de este elemento son tanto naturales como antropogénicas. Asimismo, se visualiza su desplazamiento a lo largo de ecosistemas acuáticos y terrestres hasta su exposición al ser humano debido a lluvias contaminadas, o por ingesta de alimentos contaminados con arsénico, lo cual ocasiona problemas de salud de las personas expuestas. (Hasanuzzaman, Nahar, & Fujita, 2018)

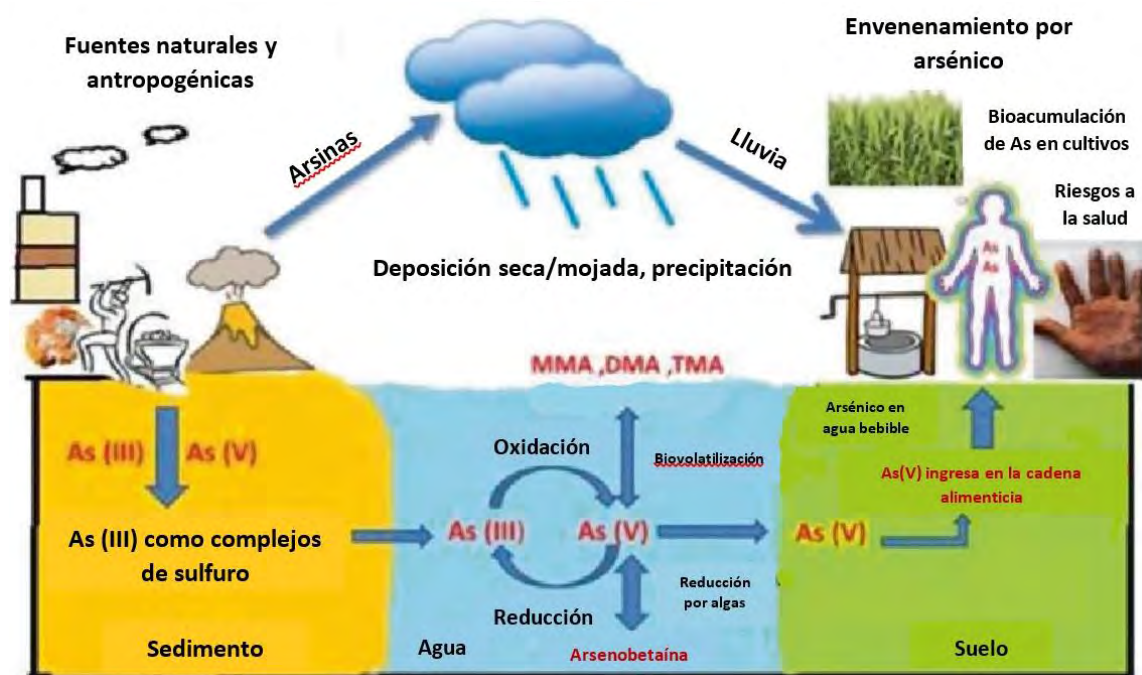


Figura 2. Ciclo biogeoquímico del arsénico (adaptado de Mechanisms of Arsenic Toxicity and Tolerance in Plants de Hasanuzzaman, Nahar, & Fujita (2018))

### 2.2.2. Mercurio

El mercurio es un elemento que puede encontrarse de manera natural en el ambiente. La forma predominante en suelos, fuentes de agua y sedimentos es la especie inorgánica de  $Hg(II)$ , mientras que el catión metilmercurio ( $CH_3Hg^+$ ) está presente en la biota y el vapor de mercurio ( $Hg^0$ ) en la atmósfera. (Liu, Cai, & O'Driscoll, 2012) En la figura 3 se presenta el ciclo biogeoquímico del mercurio; este elemento se introduce en el ecosistema de manera natural mediante la actividad geológica, por ejemplo a partir de emisiones volcánicas; (Ortiz, 2018) pero también existe liberación de mercurio por acción

antropogénica. Es producto de la quema de combustibles fósiles y minería, la cual representa dos tercios del total de mercurio presente en el ambiente. (Klaassen, 2019)

El mercurio atmosférico sufre oxidación formando Hg (II) que es soluble en agua, y de este modo ingresa a las fuentes de agua mediante la lluvia. Eventualmente, el Hg (II) puede reducirse y regresar a la atmósfera, o puede ser convertido a metilmercurio mediante un proceso de metilación efectuado por bacterias y microorganismos en los océanos. Esta especie de mercurio ingresa a la cadena trófica marina hasta llegar a los peces y mamíferos acuáticos, en los cuales se acumula. Finalmente, el consumo humano de frutos del mar contaminados con metilmercurio constituye la principal causa de intoxicación por mercurio. (Cosio & Renault, 2019; Klaassen, 2019). En la Tabla 5 se presentan los niveles mínimos de exposición a mercurio que desencadenan efectos adversos en la salud humana.

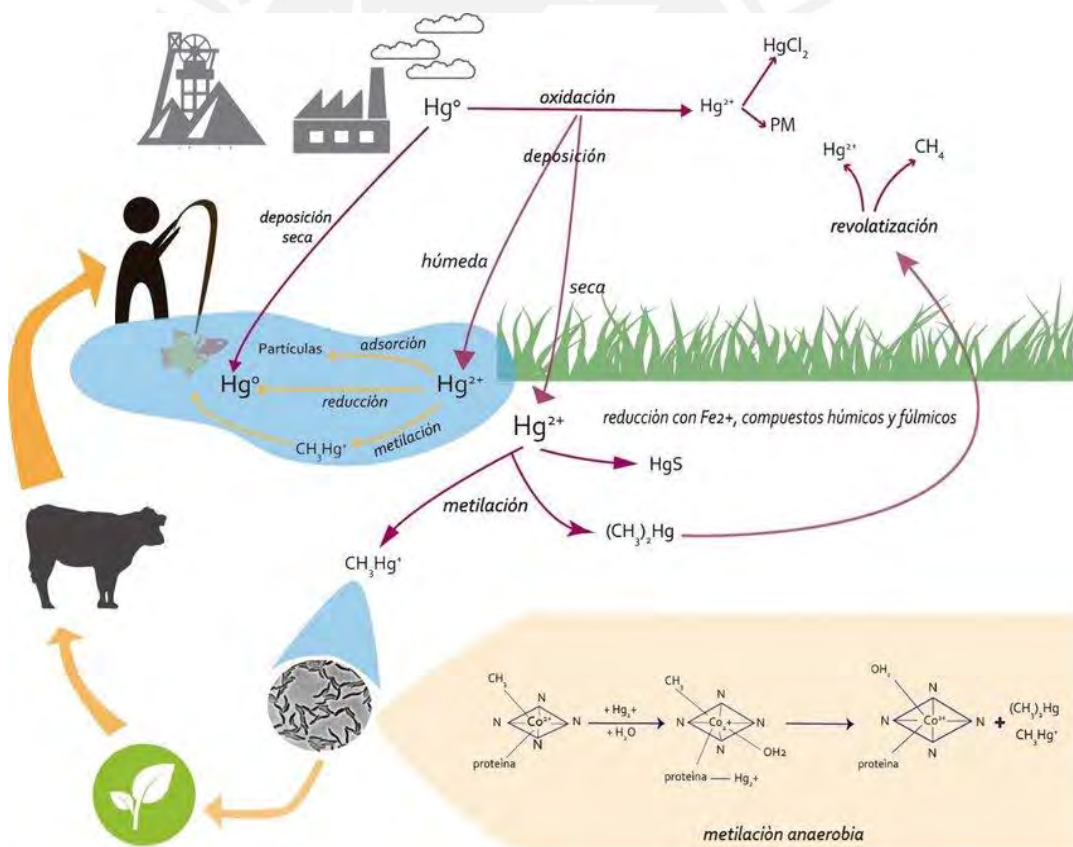


Figura 3. Ciclo biogeoquímico del mercurio. Recuperado de Determinación del contenido de mercurio (Hg) en sangre de niños en la zona minera/metalmúrgica de Cedral S.L.P. de Ortiz (2018).

Tabla 5. Niveles de exposición a mercurio con efectos adversos en humanos (Klaassen, C. D. (2019). Toxicology: The Basic Science of Poisons (Novena). Mc Graw Hill.)

Exposición Efectos	Oral		Dérmico	
	Inorgánico	Orgánico	Inorgánico	Orgánico
<b>Muerte</b>	10 - 42 mg Hg/kg	10 – 60 mg Hg/kg	No reportado	No reportado
<b>Problemas cardiovasculares</b>	0,014-0,065 mg As/kg	No reportado	No reportado	No reportado
<b>Problemas hepáticos</b>	Limitada	No reportado	No reportado	No reportado
<b>Problemas renales</b>	15,8 mg Hg/kg	40 mg Hg/kg	No reportado	No reportado
<b>Problemas neurológicos</b>	Despreciable	No reportado	No reportado	No reportado
<b>Cancerígeno</b>	No reportado	No reportado	No reportado	No reportado

Los efectos perjudiciales causados por la presencia de mercurio en el organismo son problemas pulmonares, renales y al sistema nervioso. Cuando los niveles son muy elevados, se producen daños muy graves e incluso puede conllevar a la muerte. Los bebés e infantes son particularmente más vulnerables ante la exposición a fuentes de mercurio. Los fetos, cuyas madres durante el embarazo consumen pescado contaminado con metilmercurio, nacen con diversas anomalías, entre las que destaca la deficiencia del desarrollo cerebral. Un caso conocido de esta situación fue la contaminación de agua con sales de mercurio liberadas por una industria alrededor de 1950 en la bahía de Minamata en Japón. (Cosio & Renault, 2019; Klaassen, 2019)

### 2.2.3. Plomo

El plomo se puede encontrar en la naturaleza mayoritariamente en minerales polimetálicos, el mineral de plomo más abundante es la galena o sulfuro de plomo (PbS). También existe por el decaimiento radiactivo de uranio y torio. (Acharya, 2013) Fuentes considerables de emisiones de este elemento son las emisiones volcánicas, incendios

naturales, brisa marina y tormentas de arena. En la Figura 4 se observa el ciclo biogeoquímico del plomo. (Hynek et al., 2011)

Una contribución a la contaminación por plomo es el minado de rocas que contienen este elemento, al igual que su empleo en la fabricación de baterías, municiones, aleaciones y en el revestimiento de cables. Su forma inorgánica se emplea en la preparación de tintes y pinturas; mientras que los compuestos orgánicos de plomo ( $Pb^{4+}$ ) fueron empleados como aditivos de combustible hasta finales de la década de los 80, lo cual tuvo como resultado un incremento de los niveles de plomo en la atmósfera. La presencia de plomo en el ambiente se ha ido reduciendo con el paso de los años a partir del cambio a combustibles sin plomo y de la disminución progresiva de cañerías y pinturas a base de este metal. (Klaassen, 2019)

Los efectos del plomo en la salud de las personas son variados, y dependen de la concentración y el tiempo de exposición en contacto con este elemento. Los niños e infantes pertenecen al grupo más vulnerable frente a la exposición descontrolada a fuentes de plomo, la cual desencadena encefalopatías y muerte neuronal a concentraciones mayores a  $70 \mu\text{g/dL}$ , además de la presencia de secuelas como epilepsia e incluso ceguera. Además, ocasiona déficit en las habilidades cognitivas y resultados de bajo coeficiente intelectual, incluso a concentraciones por debajo de  $5 \mu\text{g/dL}$ . La exposición de adultos al plomo genera encefalopatías a concentraciones mayores a  $100 \mu\text{g/dL}$ . (Klaassen, 2019)

Se han reportado estudios en los que se indica el potencial carcinógeno de este elemento, en particular las especies inorgánicas de plomo. En general, estas investigaciones concluyen que el plomo posee diversos mecanismos mediante los cuales desencadena carcinogénesis como en la inhibición de los procesos de reparación del ADN, generación de especies oxidativas de oxígeno o mediante la sustitución del zinc en los procesos de transcripción. (Klaassen, 2019)

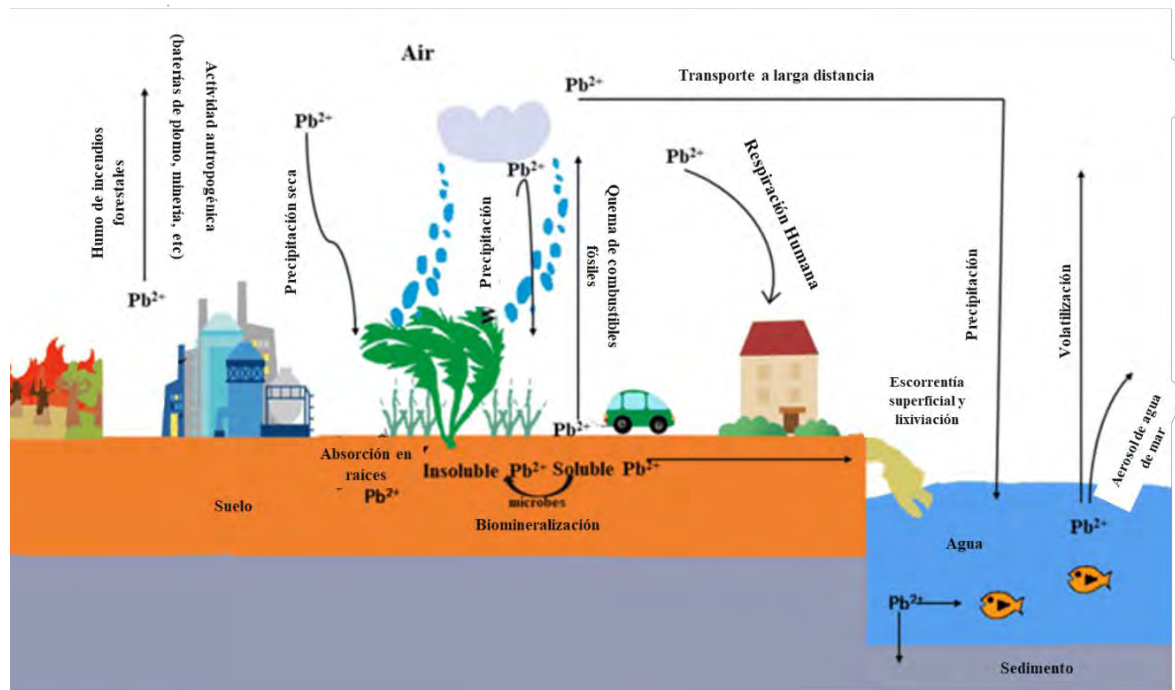


Figura 4. Ciclo biogeoquímico del plomo (Shan, Bing & Hao, Ruixia & Xu, Hui & Li, Jiani & Li, Yinhuang & Xu, Xiyang & Zhang, Junman. (2021). A review on mechanism of biomineralization using microbial-induced precipitation for immobilizing lead ions. *Environmental Science and Pollution Research*. 28. 1-13.)

El plomo no es biodegradable y es acumulado en los organismos de las personas expuestas lo cual provoca problemas de salud que dependen de la dosis y el periodo durante el cual se estuvo expuesto al metal. Algunos efectos dañinos que genera son la inhibición de la producción de hemoglobina, daños al sistema nervioso central y periférico, y en infantes obstaculiza el desarrollo de la materia gris cerebral generando bajos niveles de coeficiente intelectual en los niños. (Length, 2007)

#### 2.2.4. Cadmio

El cadmio es un elemento traza no esencial que posee una elevada toxicidad para animales y seres vivos. El cadmio se encuentra de manera natural en diferentes minerales, casi siempre acompañando al zinc, así como también en sedimentos y fuentes de agua subterránea, las cuales arrastran estos minerales hacia la superficie. También puede liberarse naturalmente a partir de las erupciones volcánicas, y luego ser arrastrado largas distancias por efectos de las corrientes de aire. (Friberg, Piscator, & Nordberg, 2018)

Como fuente artificial se encuentran las emisiones al medio ambiente de cadmio como subproducto de la obtención de zinc y de cobre, así como también del humo del cigarro y de la quema de combustibles fósiles. Cuando contamina áreas de cultivo, este es



adsorbido por las plantas a partir de las cuales ingresa en la cadena trófica hasta llegar a los seres humanos. (Barraza et al., 2017; Rahimzadeh et al., 2017; Tahir et al., 2017) Un esquema que muestra la movilización del cadmio en el medio ambiente se presenta en la

Figura 5.

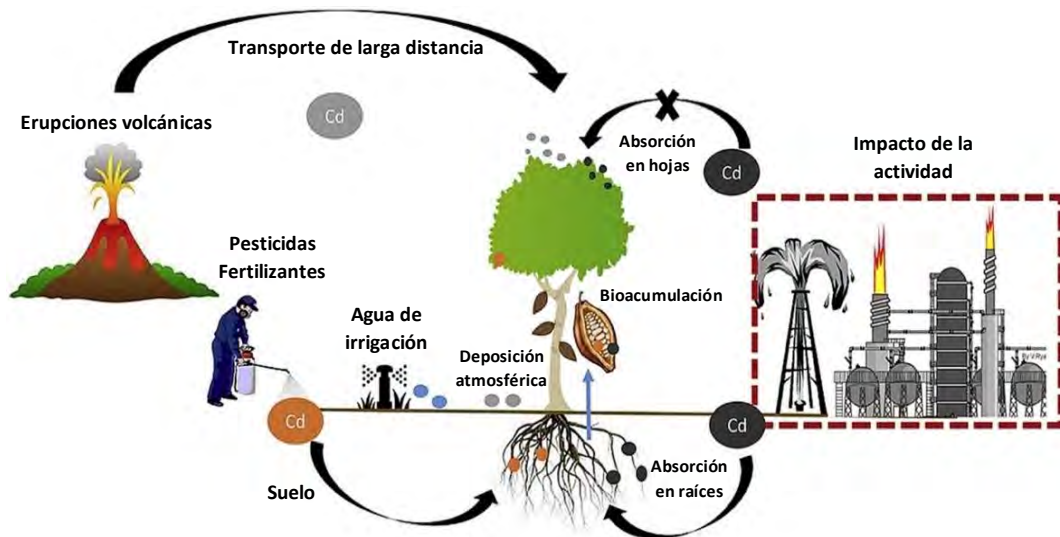


Figura 5. Ciclo biogeoquímico del cadmio (Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., López, F., Ruales, J., Prunier, J., Marquet, A., & Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution*, 229, 950–963. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.080>

La exposición a este metal afecta seriamente a los pulmones y a los huesos, como es el caso de la enfermedad de Itai-Itai reportada por primera vez en Japón, ocasionada por una contaminación masiva de cadmio en cultivos de arroz. (Rahimzadeh et al., 2017) Además, se ha reportado que las mujeres presentan niveles más altos de este metal en la sangre en comparación con los hombres, debido a que la absorción de cadmio es mayor cuando hay menores niveles de hierro almacenados en el organismo, como es el caso de las mujeres en edad fértil. (Klaassen, 2019)

También afecta a los sistemas renal y cardiovascular, y es considerado como carcinógeno por el Centro Internacional de Investigaciones para el Cáncer, IARC. (Rahimzadeh et al., 2017). La ASTDR reporta los niveles de exposición a cadmio a partir de los cuales se pueden desencadenar efectos adversos en los seres humanos, los cuales se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Niveles de exposición a cadmio con efectos adversos en humanos (ATSDR, 2012)

Efectos	Exposición	
	Oral	Dérmico
Muerte	25 mg Cd/kg	No reportado
Problemas renales	25 mg Cd/kg	No reportado
Problemas neurológicos	5-40 mg Cd/kg/día	No reportado
Cancerígeno	Valor no reportado	No reportado

### 2.2.5. Hierro

El hierro se encuentra en la naturaleza formando óxidos y carbonatos, algunos ejemplos de estos minerales son la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) (Greenwood & Earnshaw, 1997). Además, es un metal que en nuestro organismo se encuentra en forma de las especies  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ . Este elemento es esencial para la eritropoyesis, o producción de glóbulos rojos, así como también que se encuentra formando diversas biomoléculas como la hemoglobina, mioglobina, ferritina y otras enzimas responsables de procesos de transferencia de electrones y de óxido-reducción. (Abbaspour, Hurrell, & Kelishadi, 2014; Klaassen, 2019)

La ingesta de hierro en cantidades por debajo de los 20 mg de Fe/kg de peso de persona no posee toxicidad para los humanos; sin embargo, la ingesta de una cantidad mayor a la indicada genera efectos leves en la salud como malestar estomacal y mareos. Por encima de 60 mg de Fe/kg puede provocar convulsiones, falla de órganos e incluso la muerte. (Yuen & Becker, 2020)

La Figura 6 presenta el esquema general del ciclo del hierro en el medio ambiente. Este elemento llega a las fuentes de agua a partir del contacto del agua con minerales y rocas disolviéndolos y transportándolos hacia las aguas subterráneas. (Carbotecnia, 2013; Johnson & Beard, 2005) Este metal se caracteriza por otorgarle a las fuentes de agua un sabor y olor desagradable, y también le brinda una coloración anaranjado rojiza. Además, estas aguas generan manchas rojas en las tuberías que la transportan, y en las prendas o utensilios que se laven con esta agua. (Mark L. & Dozier, 2015) Asimismo, la presencia de hierro en el agua está relacionada con la presencia de bacterias que se alimentan de minerales, esto causa la aparición de capas espesas de color rojo sobre las fuentes de agua.



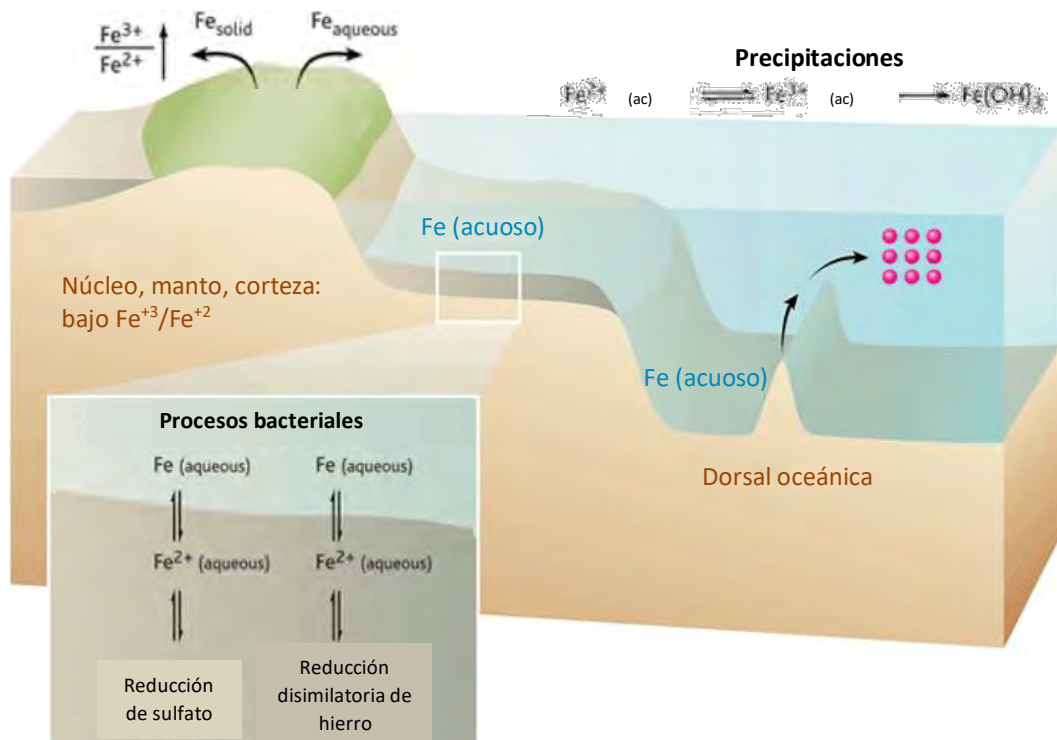


Figura 6. Ciclo biogeoquímico del hierro Johnson, C. M., & Beard, B. L. (2005). *Biogeochemical Cycling of Iron Isotopes. Science*, 309(5737), 1025 LP – 1027. <https://doi.org/10.1126/science.1112552>

## 2.2.6. Aluminio

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre, se le encuentra formando compuestos en los cuales está presente como la especie  $Al^{3+}$ . No se halla en su forma elemental debido a su elevada reactividad lo que genera que este elemento se encuentre como su especie oxidada; de esta manera, forma parte de una gran cantidad de minerales como los feldespastos, las micas, las caolinitas, entre muchos otros, pero el mineral de mayor importancia es la bauxita, que se encuentra como una arcilla arenosa de color rojizo. Este mineral sigue procesos de refinación y electrólisis para finalmente obtenerse la especie plateada que es ampliamente conocida. (Klaassen, 2019)(Association, 2019)

La toxicidad de este metal está asociada con problemas en el crecimiento de plantas en suelos con un pH moderadamente ácido, de hasta 5,5; esto se intensifica a partir del uso de fertilizantes nitrogenados que acidifican el suelo. Cuando existe una elevada cantidad de aluminio, se produce una reducción en el tamaño de las raíces de las plantas, así como dificultades para la absorción de agua y nutrientes del suelo.(DIGESA, 2008)

Las intoxicaciones severas por aluminio son raras, la mayoría de los casos reportados son de pacientes con fallas renales. Esto es debido a que este metal es removido de la sangre en la orina, y al no poder excretarse se acumula en los tejidos causando encefalopatía y osteomalacia. Se sospecha que el aluminio está asociado al desarrollo de la enfermedad de Alzheimer debido a los altos niveles del metal encontrados en muestras cerebrales de animales diagnosticados con esta enfermedad. (Klaassen, 2019) Sin embargo, la información obtenida no permite afirmar que el aluminio sea el agente causante del mal de Alzheimer, pero que sí podría contribuir en el desarrollo de la enfermedad al actuar como cofactor dentro del proceso de eventos patológicos. (ATSDR, 2008)

### **2.3. Marco legal peruano**

El empleo de fuentes de agua termal como recurso turístico está presente en distintas partes del mundo. Por ejemplo, en Alemania y Francia se genera la mayor cantidad de ingreso en todo el continente por esta actividad. En un documento emitido por el MINCETUR, en el 2012, se identificó que un aspecto clave para el establecimiento exitoso de las fuentes termales locales como destinos turísticos de importancia era la formulación de normas legales aplicadas a las pozas termales en las cuales se estipulen niveles máximos permitidos y parámetros que garanticen la calidad y salubridad de las fuentes de agua, de manera que no representen un peligro para los turistas usuarios. (MINCETUR, 2012)

En el 2017 se actualizó la ley para los parámetros y límites permisibles en fuentes de agua naturales según el uso para el que se destinen, como actividades de riego, consumo humano o para fines recreativos. En la tabla 7 se presentan los estándares de calidad ambiental actualmente vigentes para las aguas destinadas a recreación. (MINAM, 2017)

El empleo de las fuentes termales como herramienta terapéutica está relacionado también al uso del material sólido presente en forma de barro, arcilla y fango en algunos tipos de termas. Estos sedimentos son ampliamente usados por los usuarios como emplastos y aplicados sobre la piel para el tratamiento de diversas afecciones cutáneas, musculares o reumáticas.

Tabla 7. Estándares nacionales de calidad ambiental (ECA) para agua - subcategoría B: Aguas superficiales destinadas a la recreación (MINAM. (2017). Aprueban Estandares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen disposiciones complementarias. El Peruano, 6–9.

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>B1 (contacto primario)</b>
pH	Unidades de pH	6,0 - 9,0
Al	mg/L	0,200
As	mg/L	0,010
Cd	mg/L	0,010
Fe	mg/L	0,300
Hg	mg/L	0,001
Pb	mg/L	0,01

Debido a la interacción que existe entre estos sólidos y la piel de las personas que se aplican estos sedimentos, es importante conocer su composición química, especialmente la cuantificación de especies tóxicas, como los metales pesados.

Existen pocos estudios acerca de la composición química de los sedimentos y los límites máximos permitidos de sus componentes en el país. Actualmente, el Perú no cuenta con normas que regulen estos sedimentos, a diferencia de otras naciones.

#### **2.4. Marco legal canadiense de sedimentos**

Un ejemplo interesante es el de Canadá, que posee un conjunto de normas y pautas de calidad desarrolladas por el Consejo de ministros del Medio Ambiente y presentadas en el año 2001, a partir de las cuales se puede determinar la inocuidad de los sedimentos. Es importante mencionar que esta normativa se toma como referencia debido a los niveles más estrictos que expresa en comparación con otras normativas internacionales y por su especificidad respecto a los efectos límites y efectos probables. Debido a ello se emplean estos valores como referentes en el análisis de sedimentos de esta investigación. En la tabla 8 se muestran los niveles de efecto límite (TEL) y los niveles de efecto probable (PEL) de los metales de interés para esta tesis. Los valores que se encuentran por debajo de TEL corresponden al rango en el cual se generan efectos adversos con poca frecuencia, los que se ubican entre el TEL y el PEL corresponden al rango en el que ocasionalmente se dan efectos adversos y, finalmente, los valores mayores al PEL constituyen el rango

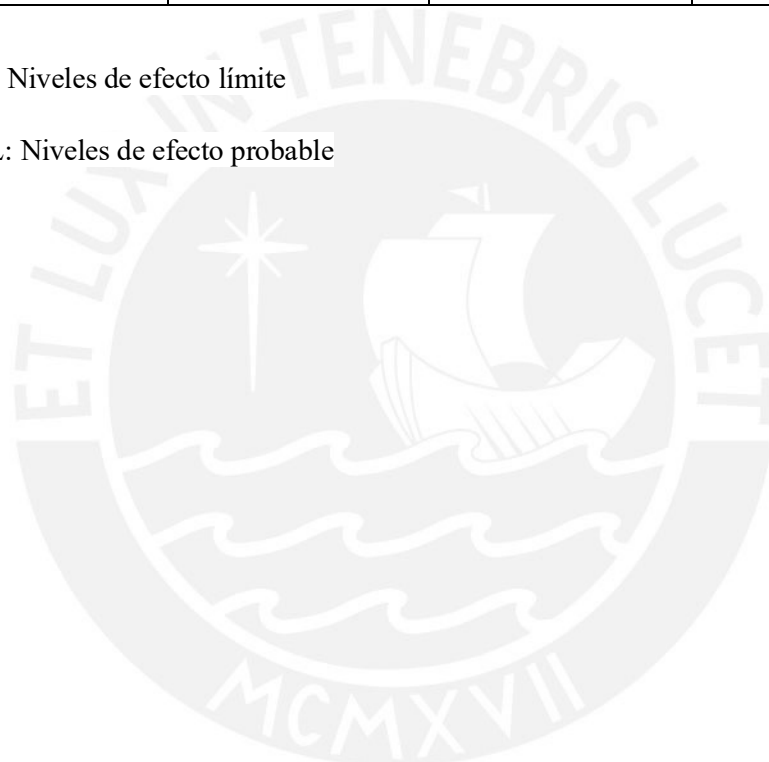
en el cual frecuentemente se dan los efectos adversos. (Canadian Council of Ministers of the Environment, 2001)

Tabla 8. Niveles de efecto límite y efecto probable

<b>Metal</b>	<b>Unidad</b>	<b>TEL*</b>	<b>PEL**</b>
Arsénico	mg/kg	7,240	41,600
Cadmio	mg/kg	0,700	4,200
Plomo	mg/kg	30,200	112,000
Mercurio	mg/kg	0,130	0,700

\*TEL: Niveles de efecto límite

\*\*PEL: Niveles de efecto probable



### 3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1. Aspectos geológicos y geográficos de la zona de estudio

El área de estudio se encuentra situada en el distrito de Sacsamarca, perteneciente a la provincia de Huancasancos en el departamento de Ayacucho, el cual se ubica en la zona sur del Perú. Debido a que se encuentra en la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, la actividad magmática y altos flujos térmicos en la corteza de la Tierra condujo a la formación de sistemas geotermales. Dentro de estos sistemas, debido a las elevadas temperaturas, las aguas subterráneas en circulación terminan por convertirse en fluidos hidrotermales que dan origen a depósitos metálicos, alteraciones hidrotermales y brechas explosivas, en la Figura 7 se presenta un mapa de ubicación con las áreas de estudio. (Steinmüller & Huamaní Huaccán, 1997)



Figura 7. (A) Ubicación geográfica las aguas termales de Cceronta con respecto al distrito de Puquio de la provincia de Lucanas, (B) Ubicación de Pachapupum (Obtenido de Google Earth: <https://www.google.com/intl/earth/>)

Las rocas con mayor capacidad para albergar aguas subterráneas y alimentar manantiales, son mayormente rocas calcáreas, areniscas y rocas volcánicas, en las cuales el flujo de agua subterránea depende, en gran medida, del grado de fracturación y meteorización. En areniscas y rocas volcánicas, las aguas subterráneas migran principalmente a través de juntas, fracturas y fallas.

Por otro lado, en rocas calcáreas también existen las cavernas de disolución como se puede ver en la Figura 8, donde el flujo del agua subterránea es turbulento y no sigue la ley de Darcy (Steinmüller & Huamaní Huaccán, 1997), la cual describe las características del movimiento de aguas subterráneas a través de medios porosos. En base a este tipo de rocas, se pueden predecir las características de las aguas que emergen por los ojos termales.

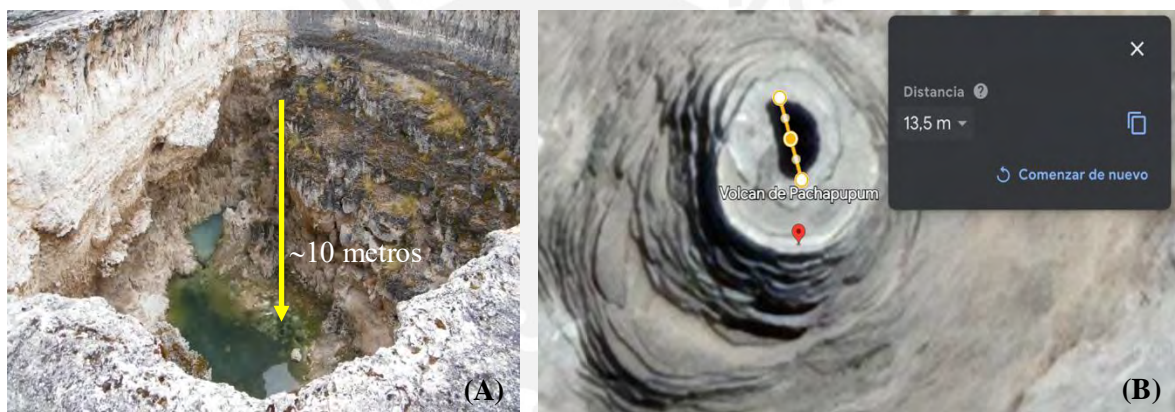


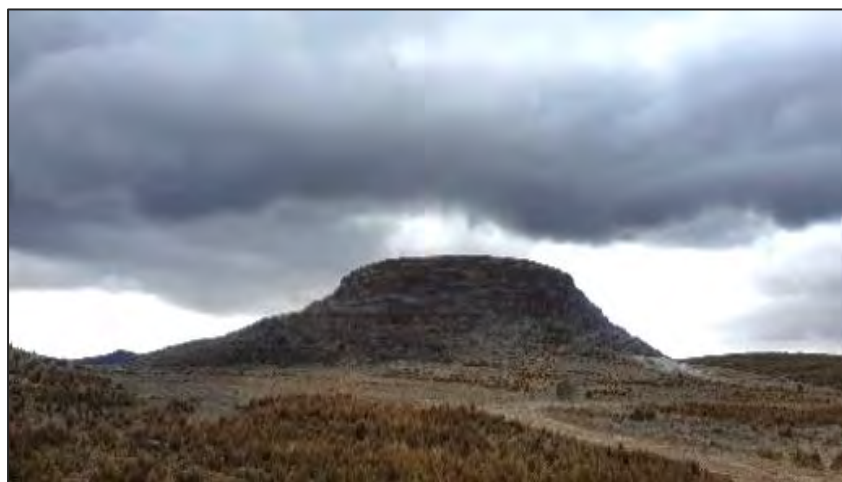
Figura 8. A) Cavernas de disolución observadas desde la cima de Pachapupum (foto de proyecto DARS) (Gamboa, 2016); B) Vista satelital de Pachapupum (obtenido de Google Earth)

La actividad magmática en Ayacucho ya no se expresa por un volcanismo activo y campos geotermales del sur del Perú. Las únicas manifestaciones de la actividad magmática actual en esta región son surgencias de aguas calientes con precipitaciones de sínter. (Steinmüller & Huamaní Huaccán, 1997)



### 3.1.1. Aspectos geológicos de las fuentes termales de Pachapupum

Pachapupum es una estructura originada por un manantial principal de agua termal, esta fuente de agua fluye por la parte céntrica de la estructura donde el material calcáreo precipitado se encuentra dispuesto a manera de plataformas concéntricas circulares, escalonadas, con bordes verticales y con radios que disminuyen gradualmente hacia arriba como se ve en la Figura 9. (Castillo, Barreda, & Vela, 1993)



*Figura 9. Vista principal de Pachapupum (Figura del autor)*

La temperatura del agua bordea los 40°C en la zona superficial y es rica en carbonatos de calcio, además de generar depósitos de travertinos de color amarillo y estructura fibrosa. En algunos sectores aislados, los travertinos adquieren estructura cavernosa por acción de la lluvia. (Castillo, Barreda, & Vela, 1993)

### 3.1.2. Aspectos geológicos de Cceronta

Las aguas termales de Cceronta presentan temperaturas que superan los 65°C. Se encuentran en la provincia de Lucanas a más de 4000 m s.n.m, a menos de 60 km al sur de Pachapupum, en la Figura 7 se puede observar la ubicación geográfica de Cceronta. Estas aguas provienen del substrato volcánico a través de fisuras y se almacenan en dos pozas precarias, la primera poza en base a piedra y barro, mientras que la segunda de cemento y ladrillo.

### **3.2. Situación socioeconómica de Sacsamarca**

El censo de población y hogares del año 2017 registró una población de 1313 personas en el distrito de Sacsamarca. Este es uno de los distritos más pobres del Perú, con cerca del 80% de su población en situación de pobreza, y un nivel de desnutrición crónica del 40% del total de la población sacsamarquina. Este dato es de interés en cuanto a susceptibilidad de las personas para asimilar con mayor facilidad elementos tóxicos en su organismo. (INEI. Censos Nacionales 2017)

En el año 2013, la Dirección Académica de Responsabilidad Social (DARS) de la PUCP realizó un informe de diagnóstico socioeconómico de la comunidad de Sacsamarca. La economía de la comunidad se basa en la crianza de ovino, ganado vacuno y alpacas, favorecidos por las grandes extensiones de pasto natural y recursos hídricos que tienen a su disposición. Los productos que se obtienen de esta actividad se comercializan a la zona costera y emplean el dinero para financiar proyectos comunales, apoyar a los más pobres del pueblo o comprar ganado mejorado. (DARS, 2014)

Además, se cuenta con actividades secundarias relacionadas a la venta de productos no autóctonos, procedentes de Ica, Lima y Huamanga. En general, varias actividades económicas han desaparecido a lo largo de los años, ya que las nuevas generaciones buscan oportunidades laborales en la zona costera ante la falta de oportunidades económicas y educativas dentro de la comunidad. Por otro lado, la agricultura, la cual es la principal actividad ocupacional por parte de la población, solo representa una actividad de autoconsumo. La activación de Pachapupum como un centro turístico podría ampliar sus oportunidades laborales, generando un apoyo económico a la comunidad. (INEI, 2017)

### **3.3. Situación socioeconómica de Cceronta**

El distrito de Puquio cuenta con 13 870 pobladores, según el censo del mismo año. (INEI, 2017) La morbilidad en el distrito está asociada principalmente al consumo y uso de agua de pozo sin tratamiento, al sistema inadecuado para disponer las excretas, la falta de conocimiento de una adecuada nutrición, la falta de higiene de la población y la presencia de animales dentro de los hogares y sus excretas en las calles.



En cuanto al nivel educativo, cerca del 90% de la población cuenta con educación primaria y secundaria, mientras que el 10% cuenta con educación superior. La condición de pobreza existente en un sector de Puquio, la cual es de aproximadamente 60% según el censo del 2017, obliga a los niños a iniciar labores de campo desde temprana edad, lo que origina que abandonen la escuela.(INEI, 2017)

Las aguas termales de Cceronta estaban destinadas a promover el turismo termal en la zona. Sin embargo, el Área de Recursos Hídricos de la Dirección Regional de Salud de Ayacucho advirtió de un alto contenido de metales pesados y carga bacteriana en las aguas, a partir de resultados obtenidos de un análisis realizado previamente cuya información no se encuentra disponible para el público, por lo que el proyecto quedó suspendido y actualmente se encuentra con libre acceso para los visitantes.



## 4. PARTE EXPERIMENTAL

### 4.1. Materiales, reactivos y equipos

#### Lista de materiales

Bolsas Ziploc

Botellas de plástico de 250 mL

Cooler

Pala de plástico

Placa Petri

Tubos de digestión

Fiolas de 100 ± 0,1 mL

Vasos de precipitado 50 mL

Pipetas graduadas de 2,3,5 y 10 mL

Fiolas de 50 mL ± 0,06 mL

Fiolas de 25 mL ± 0,04 mL

Probeta de 100 mL

Botella de plástico de 500 mL

Cucharitas de vidrio

Micropipeta p200

### Lista de reactivos

<b>Reactivo</b>	<b>Marca</b>	<b>Pureza</b>
HNO <sub>3</sub> concentrado	Merck	65%
HCl concentrado	Merck	30%
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Merck	30%
KI	Merck	p.a.
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>6</sub>	Merck	p.a.
KMnO <sub>4</sub>	Merck	99%
NaBH <sub>4</sub>	Merck	p.a.
Estándar de As 1000 mg/L - As(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Merck	99,9%
Estándar de Hg 1000 mg/L - Hg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Merck	99,9%
Estándar de Pb 1000 mg/L - Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Merck	99,9%
Estándar de Cd 1000 mg/L - Cd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Merck	99,9%
Estándar de Al 1000 mg/L - Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Merck	99,9%
Estándar de Fe 1000 mg/L - Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	Merck	99,9%

### Lista de equipos

<b>Equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>
Espectrómetro de Absorción Atómica	Perkin Elmer	PinAAcle 900H
Estufa	MMM Group	Ecocell 55
Balanza analítica digital	OHAUS	Adventurer
Termómetro	HANNA Instruments	HI 9053
Plancha de calefacción	Thermolyne Corporation	HP-A224OM

## 4.2. Distribución de las estaciones de muestreo

### 4.2.1. Estaciones de muestreo en Pachapupum

La primera estación de muestreo se encuentra ubicada a 35 km de la plaza de Huanca Sancos y 4000 m s.n.m, al lado de la estructura calcárea conocida como Pachapupum, como se puede observar en la Figura 10.

La poza termal empleada por los pobladores tiene un área aproximada de 400 m<sup>2</sup> y es el primer punto de muestreo (ver Figura 11). Además, existen pozas poco profundas que rodean a Pachapupum y se conocen como ojos termales (ver Figura 12).

Se ubica en la región Ayacucho, latitud sur 14° 8'15.77" y longitud oeste 74°17'36.06", a 40 km al sur del distrito de Sacsamarca, por carretera afirmada, a una altitud de 4000 m.s.n.m. La información de los puntos muestreados se presenta en la Tabla 9 y en la Figura 10.

Los puntos de muestreo se eligieron desde el punto más concurrido, recolectando muestras entre los años 2018 y 2019. Debido a la poca profundidad de la poza principal y la poca extensión, se recolectaron muestras tanto en el centro de la poza como en los extremos para luego homogeneizar la muestra. En la Tabla 9 se presentan las coordenadas geográficas y altitud de los puntos estudiados.

Tabla 9. Ubicación geográfica en coordenadas UTM y altitud de los puntos registrados alrededor de la poza termal principal de Pachapupum (P1 -P5) en el 2017

Puntos geográficos	Zona 17		Altura (m s.n.m)
	Este	Norte	
P1	0576192E	8437030N	4006
P2	0576204E	8437053N	4009
P3	0576203E	8437027N	4008
P4	0576182E	8437034N	4014
P5	0576215E	8437039N	4012

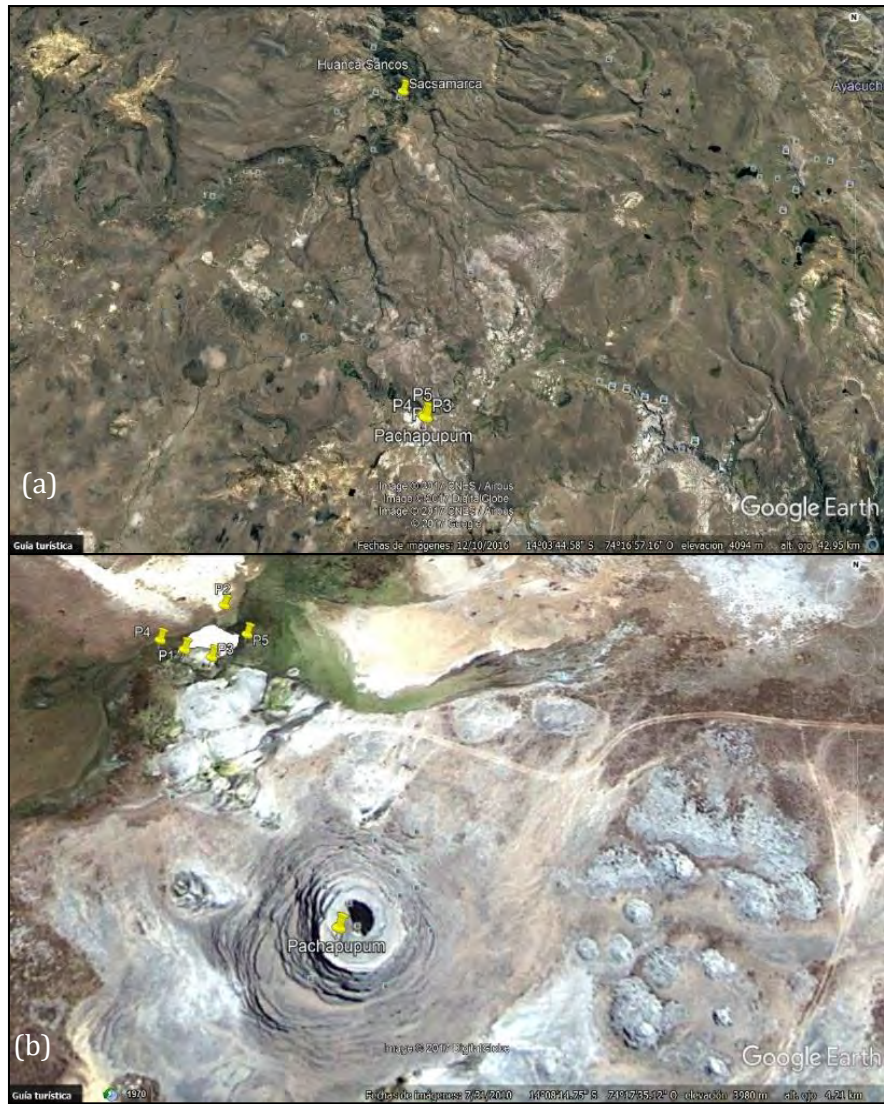


Figura 10. (a) Ubicación geográfica de fuente termal de Pachapupum respecto a Sacsamarca. (b) Ubicación de Pachapupum y de los puntos P1-P5 que rodean la poza termal principal. Obtenido de Google Earth: <https://www.google.com/intl/es/earth/>)



Figura 11. Poza natural principal (~440 m<sup>2</sup>) (Figura del autor)



*Figura 12. Poza secundaria (Ojos) (Figura del autor)*

#### **4.2.2. Estaciones de muestreo de Cceronta**

A unos minutos de Puquio, por carretera asfaltada, se visualiza una estructura precaria de piedras (ver Figura 13) y en su interior se encuentran dos piscinas termales (ver Figura 14) que se abastecen del agua termal a través de un riachuelo, cuya extensión es de 110 metros como se ve en la Figura 16 hasta el ojo termal en la Figura 15.

Es relevante mencionar que no fue posible realizar un monitoreo constante a lo largo del año en ambas fuentes de agua debido a las condiciones climatológicas del lugar que suelen dificultar el acceso. Además, las fechas de viaje para la toma de análisis fueron modificadas en diversas ocasiones, sobre todo al inicio de este trabajo de investigación, debido al fenómeno del Niño del 2017, y posteriormente en el 2019, las lluvias intensas generaron deslizamientos, derrumbes y aumento de caudal de los ríos. Todo ello afectó a la población saccamarquina y sus alrededores debido a la destrucción de las carreteras de acceso al pueblo a consecuencia de los huaicos que azotaron la zona en ese periodo. De este modo, se tuvo que esperar un largo periodo hasta que las autopistas de acceso a Cceronta y a Pachapupum fueran restauradas.





Figura 13. Vista externa de baño termal (figura del autor)

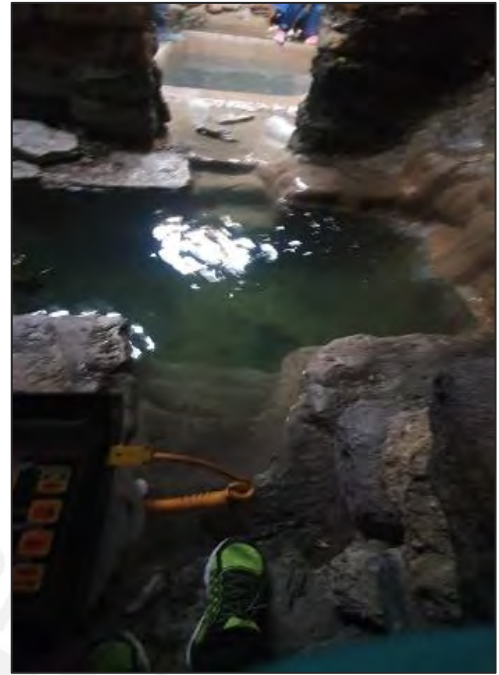


Figura 14. Baños termales (figura del autor)



Figura 16. Riachuelo con destino a baños termales (figura del autor)



Figura 15. Origen de agua termal (a ~110 m de baño termal) (figura del autor)

En la Figura 17 se muestra el efecto que tienen las condiciones climatológicas, como lluvia y granizo, sobre las zonas de acceso a Pachapupum, y las dificultades que ello representa para realizar un monitoreo constante a la zona de estudio, estas imágenes fueron proporcionadas a la DARS por parte del alcalde de Sacsamarca.



*Figura 17. Efecto climatológico sobre la ruta a Pachapupum (fotos obtenidas por la DARS en marzo de 2019)*

#### **4.2.3. Compilación de estaciones y subestaciones de muestreo**

Según lo presentado en las dos secciones previas, se posee dos grandes estaciones de muestreo donde la estación 1 corresponde a Pachapupum, y la estación 2 corresponde a Cceronta. En cada estación se designaron subestaciones de muestreo, las cuales se presentan compiladas en la Tabla 10.



Tabla 10. Asignación de estaciones y subestaciones de muestreo

Estación	Subestación	Descripción
Estación 1: Pachapupum	Poza central	Poza principal
	P1	Puntos aledaños a la poza principal
	P2	
	P3	
	P4	
	P5	
Estación 2: Cceronta	S1	Baño termal
	S2	Riachuelo
	S3	Origen

#### 4.3. Procedimiento de colecta de muestras

El diseño de muestreo se basó en un manual técnico proporcionado por la United States Environmental Protection Agency (EPA United States Environmental Protection Agency, 2001) Un método de muestreo que se podría emplear es el muestreo sistemático, en el cual se escoge una ubicación de muestreo al azar y todas las estaciones que le siguen se colocan en intervalos regulares a lo largo del área de estudio según se observa en la Figura 18. Este fue el método empleado para la toma de muestras de este estudio.

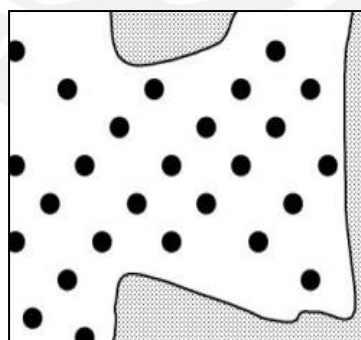


Figura 18. Diseño de muestreo sistemático (United States Environmental Protection Agency, 2001)

#### 4.4. Condiciones de almacenamiento de muestras

Se almacenaron las muestras en sus respectivos contenedores según la Tabla 11, donde se aprecia las condiciones que se tomaron en consideración para el transporte de las muestras.

Tabla 11. Condiciones de almacenamiento de muestras según analito a analizar

<b>Analitos</b>	<b>Contenedor</b>	<b>Tiempo máximo de almacenamiento</b>	<b>Condiciones de almacenamiento (muestras de agua)</b>
Hg	Plástico	6 semanas	HNO <sub>3</sub> , pH<2
			Refrigerar
As, Pb, Cd, Al y Fe	Plástico	6 meses	HNO <sub>3</sub> , pH<2 congelar



## 4.5. Parámetros medidos “in situ”

### 4.5.1. Temperatura

Las temperaturas en los distintos puntos de muestreo fueron medidas con ayuda de un termómetro HANNA Instruments HI 9053 como puede visualizarse en la Figura 19

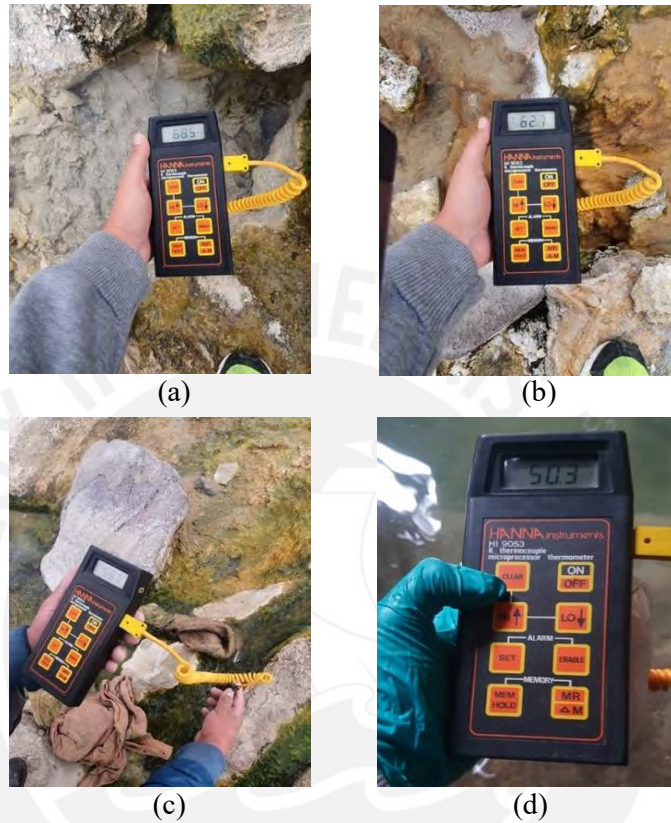


Figura 19. Toma de temperatura en puntos de muestreo. Estas locaciones fueron (a) Origen Cceronta; (b) y (c) Riachuelo Cceronta; (d) Baño termal de Cceronta. (Figura del autor)

## 4.6. Tratamiento de las muestras

### 4.6.1. Muestras de agua

Para las muestras de agua no se requirió de una extracción ácida como en el caso de las muestras de sedimento.

#### 4.6.2. Muestras de sedimento

Para las muestras de sedimento se realizó una extracción ácida basada en el método 3050B (USEPA), el procedimiento empleado se describe en la Figura 20.

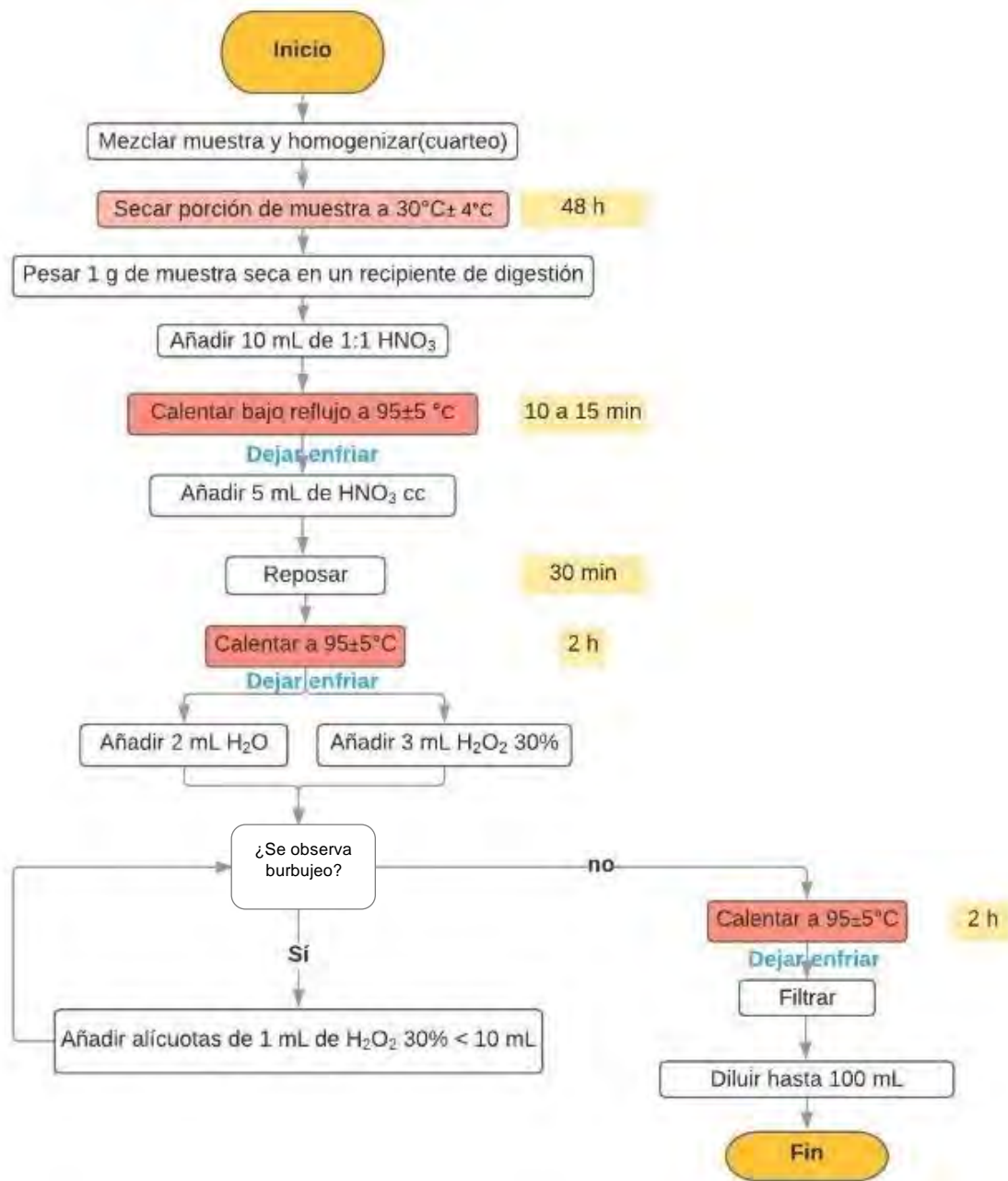


Figura 20. Extracción ácida basada en la norma EPA 3050B

Las muestras de Pachapupum se recolectaron de la poza principal donde hay mayor afluencia de pobladores y estas se integraron por la complejidad de la matriz y para evitar tomar alguna porción de muestra que no fuera representativa.

#### 4.7. Análisis espectroscópico de las muestras

Los análisis realizados fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Análisis Instrumental, mientras que las muestras y soluciones requeridas fueron preparadas en el Laboratorio de Química Ambiental de la Sección Química de la PUCP.

Para determinar las concentraciones de los analitos de interés se empleó el método instrumental de espectrometría de absorción atómica mediante generación de hidruros para arsénico (método 7062 EPA) y mercurio (método 245.1 EPA), mientras que para los demás analitos se empleó atomización por llama (método 7000B EPA).

El límite de detección es la mínima concentración de analito que se puede detectar con un intervalo de confianza de 99% a modo que la concentración del analito sea mayor a cero. (EPA, 1994) Por otro lado, el límite de cuantificación es la concentración más baja de un analito que puede ser determinada con una precisión aceptable (repetibilidad) y exactitud en las condiciones establecidas.

Se determinaron los límites de detección y cuantificación como parámetros de desempeño mediante la siguiente fórmula (McNaught & Wilkinson, 1997), los cuales se muestran en la Tabla 12.

$$LD = X_{bl} + K \cdot S_{bl}$$

$$LC = X_{bl} + 10 S_{bl}$$

LD: Límite de detección

LC: Límite de cuantificación

$X_{bl}$ : media de las mediciones del blanco, valor positivo o cero.

$S_{bl}$ : desviación estándar de las mediciones del blanco.

K: factor numérico elegido de acuerdo al nivel de confianza deseado” (K=3 para un nivel de confianza de 99%)

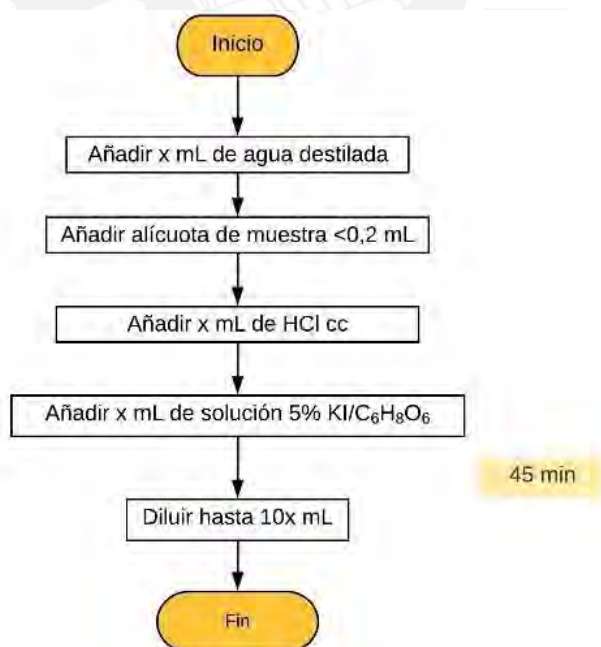
Tabla 12. Límite de detección y cuantificación

Parámetro	Unidades	Límite de detección	Límite de cuantificación
Arsénico	µg/L	0,134	0,231
Cadmio	mg/L	0,032	0,100
Plomo	mg/L	0,048	0,114
Mercurio	µg/L	0,034	0,082
Aluminio	mg/L	0,254	0,698
Hierro	mg/L	0,196	0,381

#### 4.8. Preparación y tratamiento de muestras líquidas para análisis espectroscópico

##### 4.8.1. Arsénico

Para realizar la preparación y tratamiento de las soluciones de As, se empleó el siguiente esquema de pasos que fue validado empleando soluciones estándar, y la metodología según las recomendaciones técnicas del equipo y cumpliendo con los lineamientos de la metodología US EPA 7061A como se muestra en la Figura 21.



\*Dado que las fioas que se emplearon fueron de 25 mL -> x=2,5 mL

Figura 21. Preparación y tratamiento de soluciones estándar y muestras de As para análisis espectroscópicos\*

#### 4.8.2. Mercurio

Para realizar la preparación y tratamiento de las soluciones de Hg se siguieron los pasos descritos en la Figura 22. En los casos en que la absorbancia no era detectable o se presenciaba una fluctuación entre las mediciones de una muestra, se optó por concentrar la solución mediante ebullición. La muestra fue pretratada con ácido nítrico concentrado in situ, luego tratada con permanganato de potasio y acidificada con ácido clorhídrico para brindar mayor estabilidad y fijación del mercurio en la matriz, y así evitar su volatilización.

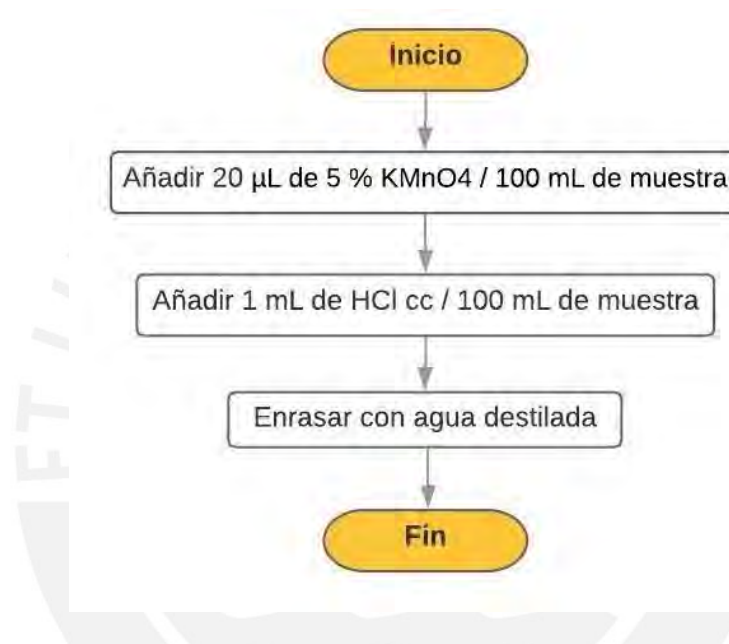


Figura 22. Preparación y tratamiento de soluciones estándar y muestras de Hg para análisis espectroscópicos

#### 4.8.3. Plomo, cadmio, aluminio y hierro

Las muestras se analizaron por medio de FAAS, por lo que sólo se requirió filtrar la muestra preparada y enrasar en una fiola.

En el caso del sedimento de hierro y aluminio, las concentraciones superaban el rango lineal del equipo empleado, por lo que se tuvo que diluir las muestras para que se encuentre en el rango de la curva de calibración. Sin embargo, para el agua termal, se tuvo que concentrar por encontrarse por debajo del límite de detección.

#### 4.9. Lavado de materiales

Con el objetivo de estandarizar el procedimiento, se realizó el lavado de los materiales de vidrio según la Figura 23.

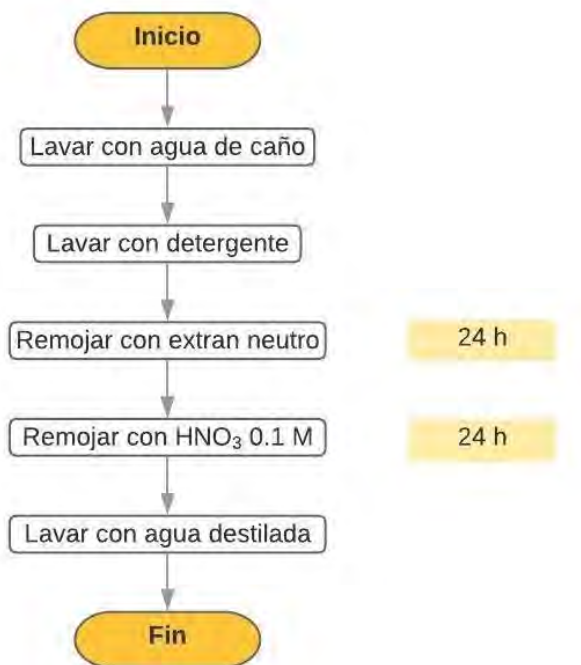


Figura 23. Procedimiento de lavado de materiales

#### 4.10. Disposición de residuos

Los residuos químicos generados durante la implementación de los métodos analíticos se dispusieron de acuerdo con su reactividad. Los residuos acuosos se almacenaron en recipientes de plástico herméticos rotulados para su disposición.

Los residuos con contenido de  $\text{KMnO}_4$  se trataron con  $\text{H}_2\text{O}_2$  con la finalidad de reducir el estado de oxidación del Mn y luego almacenarlo en recipientes de plástico herméticos rotulados para disposición.

Los residuos líquidos con metales pesados se almacenaron en recipientes plásticos herméticos rotulados adecuadamente. Los residuos sólidos (guantes, papel toalla, puntas de la micropipeta, goteros, papel filtro) fueron dispuestos en bolsas negras plásticas.

Una vez que se almacenaron los residuos, estos se entregaron al responsable del almacén de la Sección Química para que sean entregados a la entidad correspondiente.



## 5. RESULTADOS

### 5.1. Resultados de parámetros fisicoquímicos

#### 5.1.1. Temperatura y pH

Los resultados de las lecturas de temperatura en agua obtenidos en la poza central de Pachapupum y en las 3 subestaciones (S1-S3) en Cceronta se muestran en la Tabla 13. Como ya se había comentado previamente, las de Cceronta presentan temperaturas mayores a las pozas en Pachapupum.

Tabla 13. Temperatura de los puntos de muestreo

Estaciones de Análisis	Temperatura (°C)	pH
Poza Central de Pachapupum	35,0 - 40,0	6,5-7
Cceronta: S1	50,3	6,5-7
Cceronta: S2	56,0 – 68,5	6,5-7
Cceronta: S3	68,5	6,5-7

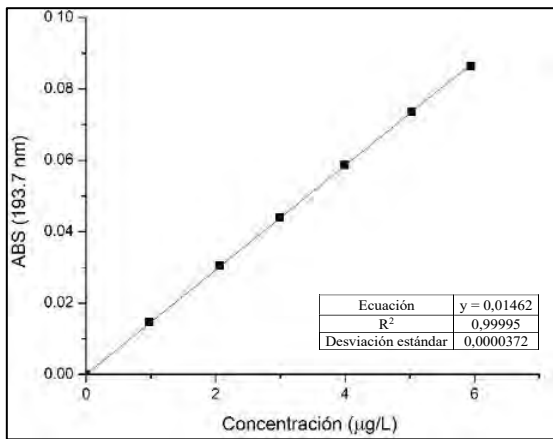
El pH medido in situ en las dos fuentes termales se encontraba en el rango de 6,5-7 y fue medido en el laboratorio bajo las mismas condiciones de temperatura presentes en las pozas de origen de las muestras, como se puede ver en la Tabla 13. A pesar del alto contenido de carbonatos en el suelo, el contenido de sulfuro es un factor importante que puede afectar la acidez del agua.

### 5.2. Resultados de análisis espectroscópicos

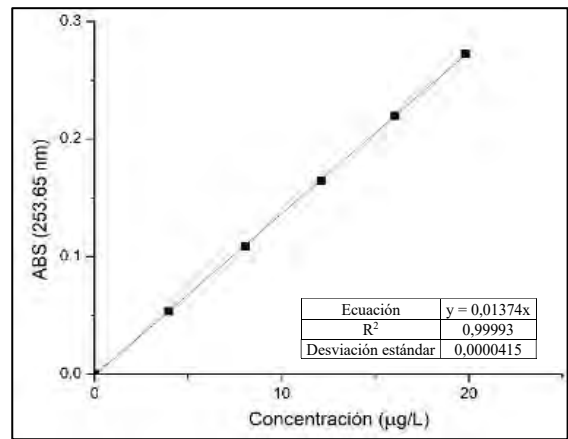
A continuación, se presentan las curvas de calibración obtenidas para cada analito obtenidas por análisis espectroscópico según las técnicas previamente mencionadas para cada metal. A partir de estas curvas se determinaron las concentraciones de los analitos presentes en las muestras de agua y sedimento colectadas. Cada valor de concentración reportado es resultado del promedio de tres análisis de la muestra. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 14, mientras que las curvas de calibración para cada analito se muestran en la Figura 24.

Tabla 14. Valores empleados para la curva de calibración de cada analito

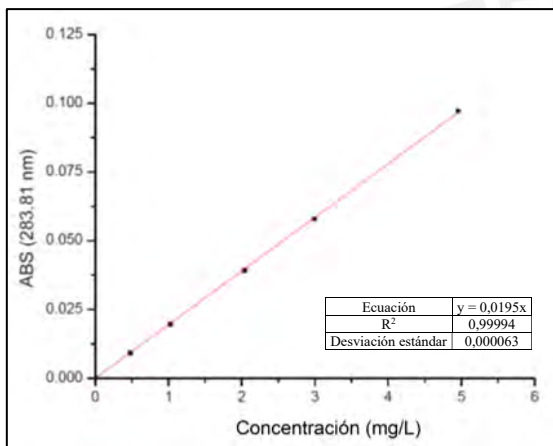
Arsénico			Mercurio		
Solución	Absorbancia (A)	Concentración (µg/L)	Solución	Absorbancia (A)	Concentración (µg/L)
Blanco	0	0	Blanco	0	0
1	0,015	0,978	1	0,053	3,962
2	0,031	2,057	2	0,109	8,046
3	0,044	2,986	3	0,165	12,097
4	0,059	3,998	4	0,219	16,056
5	0,074	5,035	5	0,273	19,839
6	0,086	5,941			
Plomo			Cadmio		
Solución	Absorbancia (A)	Concentración (µg/L)	Solución	Absorbancia (A)	Concentración (µg/L)
Blanco	0	0	Blanco	0	0
1	0,009	0,480	1	0,042	0,100
2	0,019	1,029	2	0,212	0,507
3	0,039	2,040	3	0,248	0,599
4	0,058	2,992	4	0,281	0,688
5	0,097	4,958	5	0,309	0,773
Hierro			Aluminio		
Solución	Absorbancia (A)	Concentración (µg/L)	Solución	Absorbancia (A)	Concentración (µg/L)
Blanco	0	0	Blanco	0	0
1	0,038	0,454	1	0,002	0,504
2	0,087	1,048	2	0,004	0,983
3	0,173	2,097	3	0,007	2,039
4	0,248	3,044	4	0,010	2,951
5	0,324	4,006	5	0,012	3,972
6	0,387	4,826	6	0,015	5,061



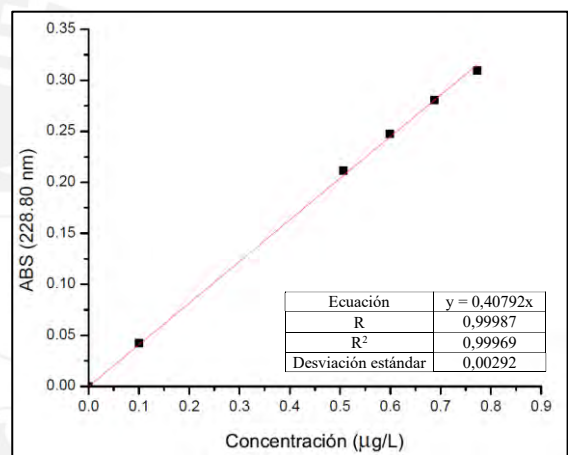
(A)



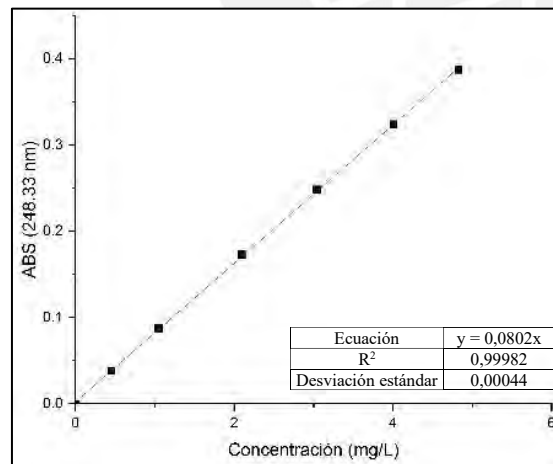
(B)



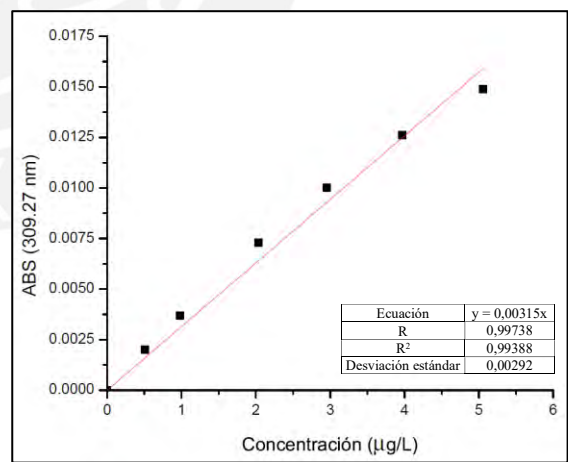
(C)



(D)



(E)



(F)

Figura 24. Curva de calibración para (A) As por AAS-GH, (B) Hg, (C) Pb, (D) Cd, (E) Fe, (F) Al.

### 5.2.1. Arsénico

En base a las curvas de calibración anteriores, se obtuvieron las concentraciones de As en las muestras de agua de Pachapupum y Cceronta, según la Tabla 15, y para el sedimento en Pachapupum y Cceronta, según la Tabla 16. La toma de muestras se realizó en el transcurso de los años 2019 y 2020.

Tabla 15. Concentraciones de arsénico en agua en Pachapupum colectadas en marzo de 2020

Pachapupum			Cceronta		
Soluciones Agua	Concentración (mg/L)	Desviación estándar(mg/L)	Soluciones Agua	Concentración (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
P1	0,889	0,023	S1 – muestra 1	4,263	0,039
P2	0,876	0,007	S1 – muestra 2	4,054	0,059
P3	0,906	0,006	S2 – muestra 1	3,844	0,067
<b>Concentración Promedio</b>	<b>0,890</b>	<b>0,012</b>	S2 – muestra 2	4,464	0,045
			S3 – muestra 1	4,285	0,058
			S3 – muestra 2	4,199	0,066
			<b>Concentración promedio</b>	<b>4,185</b>	<b>0,056</b>

Tabla 16. Concentraciones de arsénico en sedimento en Pachapupum y Cceronta

Pachapupum			Cceronta		
Soluciones Sedimento	Concentración (mg/L)	Desviación estándar(mg/L)	Soluciones Sedimento	Concentración (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
P1	286,587	2,392	S1	255,697	5,292
P2	282,557	4,095	S2	249,990	3,314
P3	263,481	6,985	S3	250,704	4,889
P4	268,534	4,393	<b>Concentración promedio</b>	<b>252,130</b>	<b>4,498</b>
P5	266,603	5,601			
<b>Concentración promedio</b>	<b>273,552</b>	<b>4,693</b>			

### 5.2.2. Mercurio

En base a la curva de calibración anterior, se obtuvieron las concentraciones de agua mostradas en la Tabla 17 y las concentraciones de sedimento mostradas en la Tabla 18.

Tabla 17. Concentraciones de mercurio en agua en Pachapupum y Cceronta

Pachapupum			Cceronta		
Soluciones Agua	Concentración (mg/L)	Desviación estándar(mg/L)	Soluciones Agua	Concentración (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
P1	$4,425 \times 10^{-5}$	$4,813 \times 10^{-6}$	S1	$4,360 \times 10^{-4}$	$5,199 \times 10^{-6}$
P2	$3,744 \times 10^{-5}$	$3,930 \times 10^{-6}$	S2	$4,250 \times 10^{-4}$	$3,404 \times 10^{-6}$
P3	$3,744 \times 10^{-5}$	$3,931 \times 10^{-6}$	S3	$4,320 \times 10^{-4}$	$2,407 \times 10^{-6}$
<b>Concentración promedio</b>	<b>&lt;0,034</b>	<b>-</b>	<b>Concentración promedio</b>	<b>&lt;0,034</b>	<b>-</b>

Tabla 18. Concentraciones de mercurio en sedimento en Pachapupum y Cceronta

Pachapupum			Cceronta		
Soluciones Sedimento	Concentración (mg/L)	Desviación estándar(mg/L)	Soluciones Sedimento	Concentración (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
P1	0,003	$9,280 \times 10^{-4}$	S1 – muestra 1	0,777	0,044
P2	0,003	$2,050 \times 10^{-4}$	S1 – muestra 2	0,792	0,027
P3	0,002	0,001	S2 – muestra 1	0,791	0,025
<b>Concentración promedio</b>	<b><math>2,66 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>7,543 \times 10^{-4}</math></b>	S2 – muestra 2	0,563	0,008
			S3 – muestra 1	0,652	0,009
			S3 – muestra 2	0,611	0,012
			<b>Concentración promedio</b>	<b>0,698</b>	<b>0,021</b>

### 5.2.3. Plomo

En base a la curva de calibración anterior, se obtuvieron las concentraciones de agua mostradas en la Tabla 19 y las concentraciones de sedimento mostradas en la Tabla 20.

Tabla 19. Concentraciones de plomo en agua en Pachapupum y Cceronta

Pachapupum			Cceronta		
Soluciones Agua	Concentración (mg/L)	Desviación estándar(mg/L)	Soluciones Agua	Concentración (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
P1 – muestra 1	0,107	0,006	S1 – muestra 1	0,051	0,006
P2 – muestra 1	0,100	0,003	S2 – muestra 1	0,029	0,009
P3 – muestra 1	0,102	0,006	S3 – muestra 1	0,039	0,011
P4 – muestra 1	0,104	0,006	S1 – muestra 2	0,030	0,009
P5 – muestra 1	0,154	0,006	<b>Concentración promedio</b>	<b>&lt;0,048</b>	-
P1 – muestra 2	0,152	0,002			
P2 – muestra 2	0,153	0,001			
P3 – muestra 2	0,149	0,003			
P4 – muestra 2	0,136	0,012			
P5 – muestra 2	0,110	0,003			
<b>Concentración promedio</b>	<b>0,127</b>	<b>0,005</b>			

Tabla 20. Concentraciones de plomo en sedimento en Pachapupum y Cceronta

Pachapupum			Cceronta		
Soluciones Sedimento	Concentración (mg/L)	Desviación estándar(mg/L)	Soluciones Sedimento	Concentración (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
P1 – muestra 1	24,203	0,109	S1 – muestra 1	22,429	0,549
P2 – muestra 1	23,202	0,363	S2 – muestra 1	22,275	0,592
P3 – muestra 1	21,414	0,189	S3 – muestra 1	21,628	0,193
P4 – muestra 1	19,190	0,391	S1 – muestra 2	21,275	0,255
P5 – muestra 1	22,380	0,276	S2 – muestra 2	19,897	0,199
P3 – muestra 2	21,558	0,271	S3 – muestra 2	22,837	0,121
P4 – muestra 2	21,220	0,430	<b>Concentración promedio</b>	<b>21,724</b>	<b>0,318</b>
P5 – muestra 2	21,394	0,203			
<b>Concentración promedio</b>	<b>21,820</b>	<b>0,279</b>			

### 5.2.4. Cadmio

En base a las curvas de calibración anteriores, se obtuvieron las concentraciones de agua mostradas en la Tabla 21 y las concentraciones de sedimento mostradas en la Tabla 22.

Tabla 21. Concentraciones de cadmio en agua en Pachapupum y Cceronta

Pachapupum			Cceronta		
Soluciones Agua	Concentración (mg/L)	Desviación estándar(mg/L)	Soluciones Agua	Concentración (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
P1	<0,032	-	S1	<0,032	-
P2	<0,032	-	S2	<0,032	-
P3	<0,032	-	S3	<0,032	-
<i>Concentración promedio</i>	<i>&lt;0,032</i>	<i>-</i>	<i>Concentración promedio</i>	<i>&lt;0,032</i>	<i>-</i>

Tabla 22. Concentraciones de cadmio en sedimento en Pachapupum y Cceronta

Pachapupum			Cceronta		
Soluciones Sedimento	Concentración (mg/L)	Desviación estándar(mg/L)	Soluciones Sedimento	Concentración (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
P1	4,283	0,019	S1 – muestra 1	1,877	0,064
P2	3,963	0,058	S2 – muestra 1	1,844	0,072
P3	3,910	0,097	S3 – muestra 1	1,781	0,009
<i>Concentración promedio</i>	<i>4,052</i>	<i>0,058</i>	S1 – muestra 2	1,781	0,034
			<i>Concentración promedio</i>	<i>1,828</i>	<i>0,045</i>

### 5.2.5. Hierro

En base a la curva de calibración anterior, se obtuvieron las concentraciones de agua mostradas en la Tabla 23 y las concentraciones de sedimento mostradas en la Tabla 24.

Tabla 23. Concentraciones de hierro en agua en Pachapupum y Cceronta

Pachapupum			Cceronta		
Soluciones Agua	Concentración (mg/L)	Desviación estándar(mg/L)	Soluciones Agua	Concentración (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
P1 – muestra 1	0,539	0,022	S1 – muestra 1	0,547	0,026
P2– muestra 1	0,552	0,002	S2 – muestra 1	0,557	0,003
P3	0,553	0,002	S3 – muestra 1	0,551	0,003
P4	0,551	0,001	S1 – muestra 2	0,556	0,009
P5	0,421	0,004	S2 – muestra 2	0,544	0,001
P1 – muestra 2	0,419	0,002	S3 – muestra 2	0,510	0,009
P2 – muestra 2	0,418	0,002	S1 – muestra 3	0,507	0,008
<b>Concentración promedio</b>	<b>0,493</b>	<b>0,005</b>	S2 – muestra 3	0,510	0,009
			<b>Concentración promedio</b>	<b>0,536</b>	<b>0,009</b>

Tabla 24. Concentraciones de hierro en sedimento en Pachapupum y Cceronta

Pachapupum			Cceronta		
Soluciones Sedimento	Concentración (mg/L)	Desviación estándar(mg/L)	Soluciones Sedimento	Concentración (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
P1	5285,575	21,676	S1 – muestra 1	1765,741	11,504
P2	5229,1105	5,198	S2 – muestra 1	1770,629	4,791
P3	5252,838	10,094	S3 – muestra 1	1675,303	1,892
P4	5229,340	19,829	S1 – muestra 2	1654,405	4,785
<b>Concentración promedio</b>	<b>5249,216</b>	<b>14,199</b>	S2 – muestra 2	1639,399	8,954
			<b>Concentración promedio</b>	<b>1701,096</b>	<b>6,385</b>

### 5.2.6. Aluminio

En base a las curvas de calibración anteriores, se obtuvieron las concentraciones de agua mostradas en la Tabla 25 y las concentraciones de sedimento mostradas en la Tabla 26.



Tabla 25. Concentraciones de aluminio en agua en Pachapupum y Cceronta

Pachapupum			Cceronta		
Soluciones Agua	Concentración (mg/L)	Desviación estándar(mg/L)	Soluciones Agua	Concentración (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
P1 – muestra 1	0,166	0,029	S1	<0,254	-
P2 – muestra 1	0,223	0,032	S2	<0,254	-
P3 – muestra 1	0,143	0,021	S3	<0,254	-
P4	0,133	0,054	<i>Concentración promedio</i>	<i>&lt; 0,254</i>	-
P5	0,104	0,048			
P1 – muestra 2	0,107	0,025			
P2 – muestra 2	0,152	0,037			
P3 – muestra 1	0,098	0,044			
<i>Concentración promedio</i>	<i>&lt; 0,254</i>	-			

Tabla 26. Concentraciones de aluminio en sedimento en Pachapupum y Cceronta

Pachapupum			Cceronta		
Soluciones Sedimento	Concentración (mg/L)	Desviación estándar(mg/L)	Soluciones Sedimento	Concentración (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
P1 – muestra 1	5653,436	112,939	S1	995,860	35,569
P2	5644,636	103,637	S2	1114,266	49,769
P3	5631,599	159,690	S3	1045,918	13,333
P1 – muestra 2	5520,793	145,352	<i>Concentración promedio</i>	<i>1052,015</i>	<i>32,890</i>
<i>Concentración promedio</i>	<i>5612,616</i>	<i>130,405</i>			

En la Tabla 27 se presenta un resumen con las concentraciones promedio en las muestras de agua y sedimento de Pachapupum y Cceronta para los seis analitos estudiados.

Tabla 27. Resumen de Concentraciones de agua y sedimento promedio\*

Parámetros	Unidad de medida	B1 (contacto primario)	Agua		Unidad de medida	Sedimentos	
			Pachapupum	Cceronta		Pachapupum	Cceronta
pH	Unidades de pH	6,0 - 9,0	6,5 - 7,0	6,5 - 7,0	Unidades de pH	-----	-----
Al	mg/L	0,2	<0,254	<0,254	mg/kg	5612,616 ± 130,405	1052,015 ± 32,890
As	mg/L	0,01	0,890 ± 0,012	4,185 ± 0,056	mg/kg	273,552 ± 4,693	252,130 ± 4,498
Cd	mg/L	0,01	<0,032	<0,032	mg/kg	4,052 ± 0,058	1,828 ± 0,045
Fe	mg/L	0,3	0,493 ± 0,005	0,536 ± 0,009	mg/kg	5249,216 ± 14,199	1701,096 ± 6,385
Hg	mg/L	0,001	3,971 x 10 <sup>-5</sup> ± 4,225 x 10 <sup>-6</sup>	4,310 x 10 <sup>-4</sup> ± 3,670 x 10 <sup>-6</sup>	mg/kg	2,66 x 10 <sup>-3</sup> ± 7,543 x 10 <sup>-4</sup>	0,698 ± 0,021
Pb	mg/L	0,01	0,127 ± 0,005	<0,048	mg/kg	21,820 ± 0,279	21,724 ± 0,318

\*Para todos los resultados mostrados, número total de muestras analizadas es de tres (n=3).

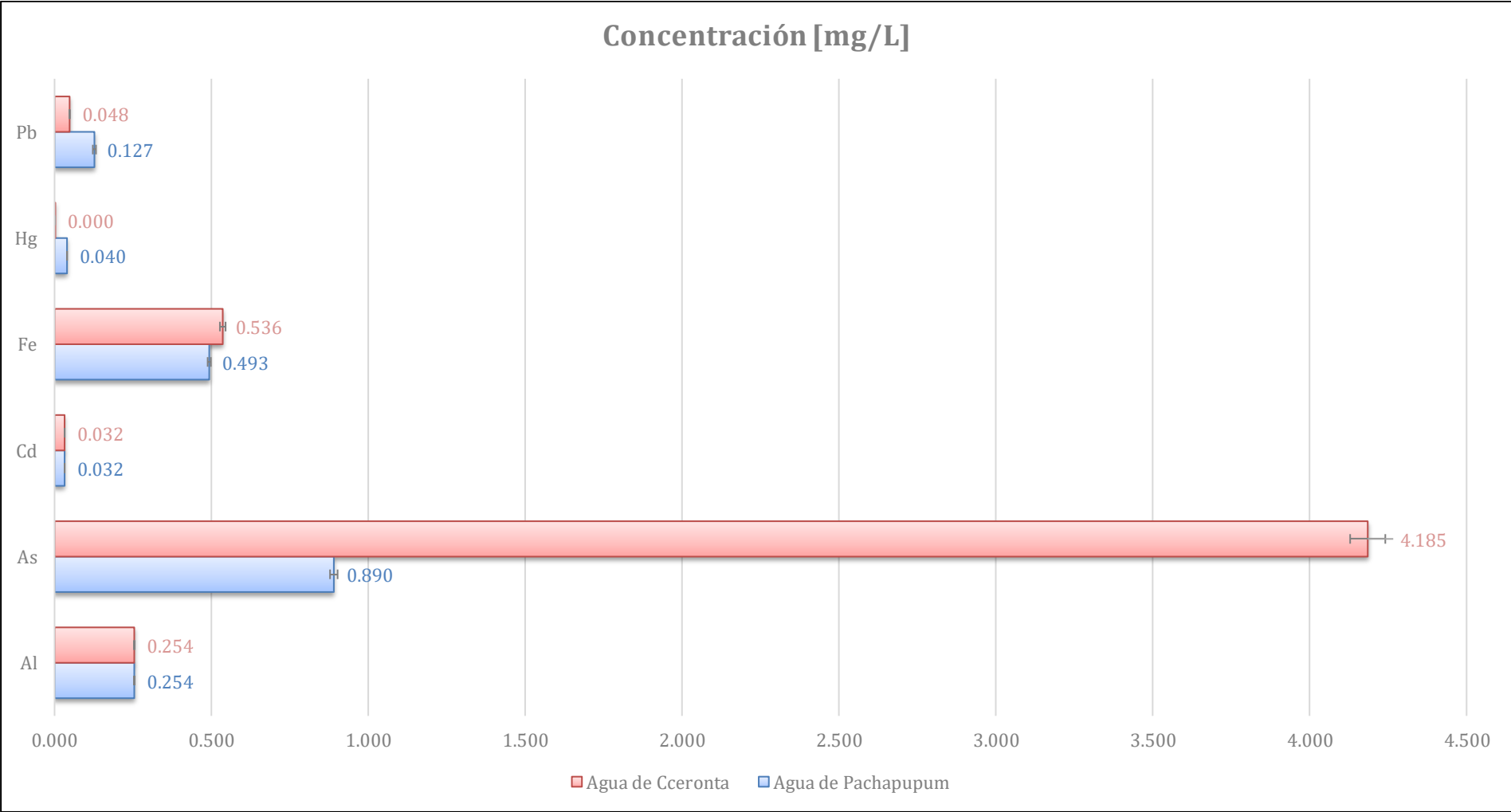


Figura 25. Gráfico de barras con resultados de concentración (mg/L) de analitos en muestras de agua de Pachapupum y de Cceronta

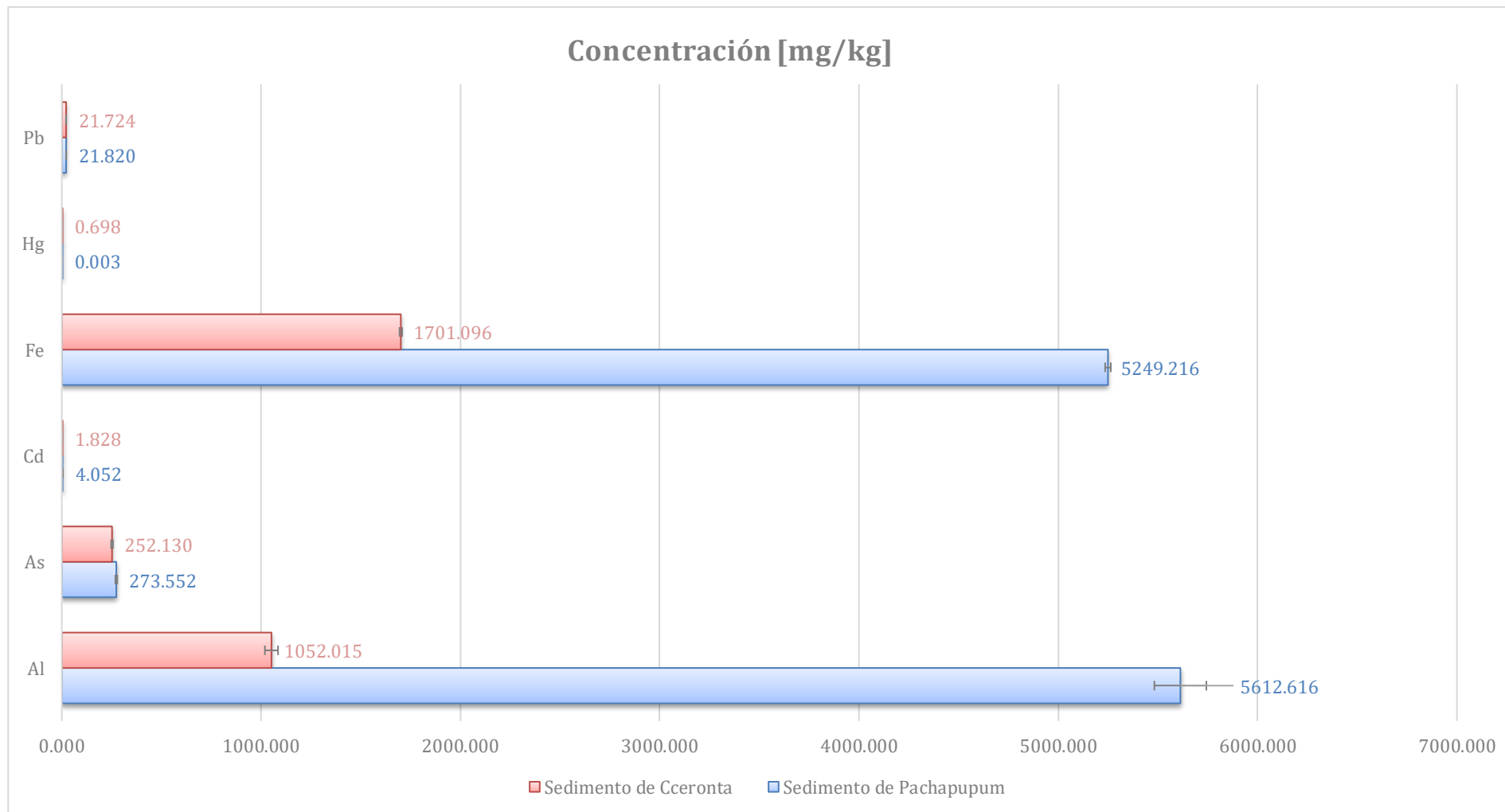


Figura 26. Gráfico de barras con resultados de concentración (mg/kg) de analitos en muestras de sedimento de Pachapupum y de Cceronta

Además de realizar el análisis de las muestras por las técnicas ya mencionadas previamente, estas fueron caracterizadas en las instalaciones del Laboratorio ALS-CorpLab mediante la técnica de ICP-MS e ICP-OES para la cuantificación de analitos en las muestras de agua y sedimento, respectivamente. Estos ensayos fueron de gran utilidad ya que nos permitieron obtener información no solo de los analitos inicialmente seleccionados para el estudio, sino de toda una gama de elementos debido a que esta técnica permite el análisis multielemental de muestras. En la Tabla 28 y Tabla 29 se presentan los resultados obtenidos mediante la técnica mencionada para las muestras analizadas.

Tabla 28. Resultados de agua mediante ICP-MS en colaboración con el Laboratorio ALS

Nº ALS LS				277610/2019-1.0	277620/2019-1.0
Fecha de Muestreo				19/05/2019	19/05/2019
Hora de Muestreo				13:30:00	18:00:00
Tipo de Muestra				Aguas Superficiales	Aguas Superficiales
Identificación				Pacha-P	Cceronta
Parámetro	Ref. Mét.	Unidad	LD	Resultado	Resultado
007 ENSAYOS DE METALES TOTALES POR ICP-MS					
Plata (Ag)	11420	mg/L	0,000003	< 0,000003	< 0,000003
Aluminio (Al)	11420	mg/L	0,002	0,018	0,025
Arsénico (As)	11420	mg/L	0,00003	0,6574	2,628
Boro (B)	11420	mg/L	0,002	25,73	35,74
Bario (Ba)	11420	mg/L	0,0001	0,0569	0,0700
Berilio (Be)	11420	mg/L	0,00002	0,00038	0,00135
Bismuto (Bi)	11420	mg/L	0,00002	< 0,00002	< 0,00002
Calcio (Ca)	11420	mg/L	0,10	333,2	65,02
Cadmio (Cd)	11420	mg/L	0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Cobalto (Co)	11420	mg/L	0,00001	< 0,00001	< 0,00001
Cromo (Cr)	11420	mg/L	0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Cobre (Cu)	11420	mg/L	0,00003	< 0,00003	< 0,00003
Hierro (Fe)	11420	mg/L	0,0004	0,0140	0,1659
Mercurio (Hg)	11420	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,00065
Potasio (K)	11420	mg/L	0,04	46,72	50,21
Litio (Li)	11420	mg/L	0,0001	1,525	2,248
Magnesio (Mg)	11420	mg/L	0,003	43,48	2,785
Manganeso (Mn)	11420	mg/L	0,00003	0,05501	0,13691
Molibdeno (Mo)	11420	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,02139
Sodio (Na)	11420	mg/L	0,006	315,0	905,9
Niquel (Ni)	11420	mg/L	0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Fosforo (P)	11420	mg/L	0,015	< 0,015	0,020
Plomo (Pb)	11420	mg/L	0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Antimonio (Sb)	11420	mg/L	0,00004	< 0,00004	0,39420
Selenio (Se)	11420	mg/L	0,0004	< 0,0004	< 0,0004
Silicio (Si)	11420	mg/L	0,2	18,2	73,8
Estaño (Sn)	11420	mg/L	0,00003	< 0,00003	< 0,00003
Estroncio (Sr)	11420	mg/L	0,0002	3,293	1,676
Titanio (Ti)	11420	mg/L	0,0002	< 0,0002	0,0015
Talio (Tl)	11420	mg/L	0,00002	< 0,00002	0,00233
Uranio (U)	11420	mg/L	0,000003	< 0,000003	< 0,000003
Vanadio (V)	11420	mg/L	0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Zinc (Zn)	11420	mg/L	0,0100	< 0,0100	< 0,0100

Tabla 29. Resultados de sedimento mediante ICP-OES en colaboración con el Laboratorio ALS

Nº ALS LS				277588/2019-1.0	277595/2019-1.0
Fecha de Muestreo				19/05/2019	19/05/2019
Hora de Muestreo				14:00:00	18:10:00
Tipo de Muestra				Lodos	Lodos
Identificación				Pacha-g	Cceronta
Parámetro	Ref. Mét.	Unidad	LD	Resultado	Resultado
007 ENSAYOS DE METALES - Metales Totales por ICP-OES					
Plata (Ag)*	9757	mg/kg	0,6	< 0,6	< 0,6
Aluminio (Al)*	9757	mg/kg	2	7290	1023
Arsenico (As)*	9757	mg/kg	3,5	294,2	268,4
Boro (B)*	9757	mg/kg	3,6	31,9	25,4
Bario (Ba)*	9757	mg/kg	0,3	86,7	151,6
Berilio (Be)*	9757	mg/kg	0,3	< 0,3	< 0,3
Bismuto (Bi)*	9757	mg/kg	1,5	< 1,5	< 1,5
Calcio (Ca)*	9757	mg/kg	0,9	231605	226148
Cadmio (Cd)*	9757	mg/kg	0,5	< 0,5	< 0,5
Cobalto (Co)*	9757	mg/kg	0,8	< 0,8	< 0,8
Cromo (Cr)*	9757	mg/kg	0,9	< 0,9	< 0,9
Cobre (Cu)*	9757	mg/kg	0,8	4,4	< 0,8
Hierro (Fe)*	9757	mg/kg	1,2	5218	2119
Potasio (K)*	9757	mg/kg	2,5	298,3	337,7
Litio (Li)*	9757	mg/kg	2,5	< 2,5	23,8
Magnesio (Mg)*	9757	mg/kg	2	2533	1794
Manganeso (Mn)*	9757	mg/kg	1	136	722
Molibdeno (Mo)*	9757	mg/kg	0,6	< 0,6	< 0,6
Sodio (Na)*	9757	mg/kg	9	691	1577
Niquel (Ni)*	9757	mg/kg	1	< 1	< 1
Fosforo (P)*	9757	mg/kg	4,5	143,5	140,6
Plomo (Pb)*	9757	mg/kg	2	< 2	< 2
Antimonio (Sb)*	9757	mg/kg	2,5	< 2,5	88,0
Selenio (Se)*	9757	mg/kg	1,6	< 1,6	< 1,6
Silicio (Si)*	9757	mg/kg	2,4	713,8	443,0
Estaño (Sn)*	9757	mg/kg	2,5	< 2,5	< 2,5
Estroncio (Sr)*	9757	mg/kg	0,7	1109	4868
Talio (Tl)*	9757	mg/kg	3	< 3	< 3
Titanio (Ti)*	9757	mg/kg	0,3	58,8	38,7
Vanadio (V)*	9757	mg/kg	0,5	< 0,5	< 0,5
Zinc (Zn)*	9757	mg/kg	0,5	5,4	4,5
007 ENSAYOS DE METALES – Mercurio Total					
Mercurio Total (Hg)	13312	mg/kg	0,01	0,04	6,15

Para una mejor visualización y comparación de los datos obtenidos, se presentan en la Tabla 30 las concentraciones detectadas en las muestras de agua y sedimentos de ambas estaciones de muestreo para los analitos de interés de este trabajo de investigación.

Tabla 30. Resultados de concentraciones de analitos según análisis en la PUCP y en ALS

Elemento	Sedimento (mg/kg)				Agua (mg/L)			
	Pachapupum		Cceronta		Pachapupum		Cceronta	
	PUCP	ALS	PUCP	ALS	PUCP	ALS	PUCP	ALS
Aluminio	5612,616 ± 130,405	7290	1052,015 ± 32,890	1023	<0,254	0,018	<0,254	0,025
Arsénico	273,552 ± 4,693	294	252,130 ± 4,498	268,4	0,890 ± 0,012	0,657	4,185 ± 0,056	2,628
Cadmio	4,052 ± 0,058	<0,5	1,828 ± 0,045	<0,5	<0,032	<0,00001	<0,032	< 0,00001
Hierro	5249,216 ± 14,199	5218	1701,096 ± 6,385	2119	0,493 ± 0,005	0,0140	0,536 ± 0,009	0,1659
Mercurio	2,66 x 10 <sup>-3</sup> ± 7,543 x 10 <sup>-4</sup>	0,04	0,698 ± 0,021	6,15	3,971 x 10 <sup>-5</sup> ± 4,225 x 10 <sup>-6</sup>	<0,00003	4,310 x 10 <sup>-4</sup> ± 3,670 x 10 <sup>-6</sup>	0,001
Plomo	21,820 ± 0,279	<2	21,724 ± 0,318	<2	0,127 ± 0,005	<0,0002	<0,048	<0,0002



## 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1.1. Temperatura de las aguas termales

Un factor relevante para considerar es la temperatura de las aguas termales, ya que es de gran interés terapéutico el aumento de la temperatura corporal, lo cual conlleva a la eliminación de toxinas. También se da un aumento de la presión hidrostática del cuerpo, lo que genera un incremento en la circulación sanguínea y la oxigenación, beneficiando al cuerpo humano ante ciertas enfermedades como la psoriasis y dermatitis. (Sinclair, 2008) Sin embargo, se tiene que tomar en cuenta que no todas las personas poseen igual tolerancia a temperaturas elevadas, por lo que los resultados pueden variar entre individuos.

En la hidroterapia, la temperatura recomendada para baños de cuerpo completo no excede los 40°C. Al comparar esto con los resultados de temperatura de la Tabla 11, se puede concluir que las aguas termales de Cceronta no son recomendables para el baño ya que pueden causar quemaduras en la piel, y con ello el ingreso de contaminantes en el flujo sanguíneo a través de las heridas cutáneas. Por este motivo, estas aguas se mezclaban con agua del río adyacente. En contraste con lo anterior, las aguas termales de Pachapupum se encuentran en un rango de temperatura aceptable para el baño pues no exceden los 40°C.

### 6.1.2. Análisis de metales pesados

Se analizaron seis especies metálicas en las matrices de agua y sedimento, de estas, se determinó que el contaminante con mayor relevancia es el arsénico, ya que se encuentra presente en ambas matrices con una concentración que supera los estándares aceptables en ambientes naturales.

#### 6.1.2.1. Arsénico

La concentración de arsénico obtenida en el agua de Cceronta fue  $4,185 \pm 0,056$  mg/L, mientras que en Pachapupum fue de  $0,890 \pm 0,012$  mg/L. Si se toma en cuenta que la temperatura de las aguas es mayor en Cceronta, se podría inferir que en esta fuente se da una mayor disolución del mineral que contiene arsénico. Otra posible opción según



Geoatmin es la de relaves mineros en minas abandonas aledañas a la zona, lo cual correspondería a una actividad antropogénica.

Si bien es cierto que el factor geológico puede contribuir en la composición química de los analitos evaluados, se tendrían que considerar medidas de seguridad adicionales para permitir el ingreso de las personas en estos ambientes termales, ya que muchos de los que asisten a estos lugares, no son conscientes de los riesgos que una sobreexposición a estos elementos podría ser contraproducente para su salud.

### **6.1.2.2. Hierro y aluminio**

En base a los resultados obtenidos del estudio, se observó valores elevado de hierro y aluminio en las muestras de sedimento de ambas estaciones de muestreo de Pachapapupum y Cceronta, obteniendo concentraciones en sedimento de  $5612,616 \pm 130,405$  y  $5249,216 \pm 14,199$  mg/kg en la primera estación. Según Romero, ambos elementos se encuentran en forma de cationes hidrolizados, oxihidróxidos u oxoaniones que son poco solubles en las fuentes de agua, con lo cual terminan acumulándose en el sedimento de las pozas. (Romero, 2011)

De igual modo, se puede corroborar este comportamiento con las bajas concentraciones de estos elementos que se encontraron en las muestras analizadas de agua termal de las dos fuentes termales, menores a 0,254 mg/kg para aluminio en ambas. Para hierro en las pozas de Pachapupum y Cceronta, fueron  $0,493 \pm 0,005$  mg/kg y  $0,536 \pm 0,009$  mg/kg, respectivamente.

### **6.1.2.3. Mercurio**

El análisis de mercurio realizado en la PUCP a las muestras de sedimento provenientes de Cceronta mostró valores de concentración de  $0,698 \pm 0,021$  mg/kg mediante AAS, valor que se encuentra entre los niveles de efecto límite (TEL) y los niveles de efecto probable (PEL) según la norma canadiense. (CCME, 2001). Se debe tomar en cuenta que mediante ICP se determinó un valor superior a estos niveles en estas muestras. En el laboratorio ALS se realizó una extracción total de Hg en el sedimento con agua regia, mientras que para el análisis por AAS se realizó una extracción con ácido nítrico.

En estudios realizados en zonas costeras de Ecuador, la distribución de Hg en los sedimentos se explica en gran medida por la presencia de materia orgánica al existir una relación positiva y significativa ( $R=0,82$ ) entre los niveles de Hg y el contenido de materia orgánica. Este comportamiento se debe a la coordinación de este elemento con los grupos sulfhidrilos presentes en la materia orgánica que puede generar una precipitación en forma de sulfuro mercúrico (RS-Hg). En las fuentes termales hay alto contenido de azufre, por lo que este supuesto puede aplicarse a esta clase de ambientes y explicar el contenido de mercurio en Cceronta.

El origen del Hg en Cceronta puede ser natural o antrópico, pero la determinación de ello requeriría de una mayor cantidad de estudios y empleo de recursos. Por otro lado, en Pachapupum, los niveles obtenidos a partir de las pruebas en la PUCP para mercurio fueron de  $3,971 \times 10^{-5} \pm 4,225 \times 10^{-6}$  mg/L para agua y de  $2,66 \times 10^{-3} \pm 7,543 \times 10^{-4}$  mg/kg para sedimento, las cuales son concentraciones pequeñas que no superan los estándares del ECA peruano que establecen un máximo permitido de 0,001mg/L.

#### **6.1.2.3.1. Plomo**

En cuanto a los niveles de Pb, se detectaron niveles superiores a los estándares nacionales de calidad ambiental para agua (Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM) en las aguas termales de Pachapupum ( $0,127 \pm 0,005$  mg/L), mientras que en Cceronta los valores estuvieron por debajo de los límites de detección y estándares nacionales ( $<0,048$  mg/L).

Esto puede estar asociado a la presencia de minerales en la corteza terrestre como la galena (PbS), cerusita (PbCO<sub>3</sub>), anglesita (PbSO<sub>4</sub>), entre otros, los cuales pueden disolverse en el agua termal. (Centeno, 2016)

En cuanto a las concentraciones de Pb en sedimento, estos se encontraban por debajo de las recomendaciones canadienses.

#### **6.1.2.4. Cadmio**

En el sedimento de ambas fuentes termales se detectaron niveles de Cd por encima de los límites aceptables según la norma canadiense CCME del 2001, que estipula un máximo de 0,7 mg/kg, mientras que las concentraciones obtenidas con el análisis en la PUCP para el sedimento de las pozas de Pachapupum y Cceronta es de  $4,052 \pm 0,058$  y  $1,828 \pm 0,045$  mg/kg. Su origen puede estar ligado a la presencia de otros minerales, ya que es un

elemento natural que se encuentra en la corteza terrestre y suele ser un subproducto formado durante los procesos de extracción de otros metales.

#### **6.1.2.5. Resultados del Laboratorio ALS vs Resultados PUCP**

En el análisis realizado por el Laboratorio ALS, notamos que hay una mayor concentración de los elementos evaluados en la PUCP, esto es debido a que las fechas de recolección de muestras corresponden a distintas fechas y estaciones, con respecto a las que se analizaron en la PUCP. Las condiciones de la temporada en que se realiza el muestreo influyen en los resultados, pero nos pueden indicar que las concentraciones oscilan entre ambos valores. Cabe mencionar que los métodos son distintos, por lo que, en principio, no deberían ser comparables, sin embargo, nos puede ayudar a tener un entendimiento más holístico de los demás elementos que no se pudo estudiar en la PUCP. Los valores altos de calcio podrían ser causados por contaminación humanas, ya que se observó residuos de alimentos, en especial cáscaras de huevo, sin embargo, también parte de la concentración registrada, incluyendo la alta concentración de sodio, se puede deber a la naturaleza de las fuentes termales y su contenido de azufre, que, si bien es cierto que no se realizó el análisis del mismo, el olor característico indicaba su presencia.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1. Conclusiones

- Se determinaron las concentraciones de As, Hg, Pb, Cd, Al y Fe en el sedimento y agua de las fuentes termales de Pachapupum y Cceronta
- En base a las mediciones realizadas durante la toma de muestras de agua y sedimento en las estaciones de muestreo, se detectó que la temperatura de las piscinas de agua termal en Cceronta en un día sin lluvia es 50,3°C, mientras que en las aguas de Pachapupum oscilan entre 35 y 40°C. En base a estas mediciones, podríamos decir preliminarmente que las aguas de Pachapupum poseen una temperatura tolerable para el cuerpo humano bajo un uso recreativo, mientras que el empleo de las aguas de Cceronta con la misma finalidad podría generar quemaduras en el cuerpo según las altas temperaturas registradas durante el muestreo. Es importante resaltar que las mediciones fueron registradas en momentos aislados durante la toma de muestra y no constituyeron un monitoreo durante un periodo largo de tiempo, lo cual sería necesario para concluir con mayor objetividad sobre la temperatura usual de estas fuentes de agua termal.
- Los resultados para arsénico muestran concentraciones de  $4,185 \pm 0,056$  mg/L para las aguas termales de Cceronta, que son mayores a la concentración de As de Pachapupum, siendo esta de  $0,890 \pm 0,012$  mg/L. Ambos resultados constituyen valores mayores al establecido por el ECA peruano para agua de uso recreativo, por lo cual no se recomienda la exposición prolongada y recurrente de los bañistas a las aguas de ninguna de estas pozas termales. De igual modo, el sedimento de Cceronta con una concentración de  $252,130 \pm 4,498$  mg/kg presenta niveles de arsénico inferiores al de Pachapupum con  $273,552 \pm 4,693$  mg/kg. Sin embargo, ambos valores sobrepasan los límites estipulados por la norma canadiense CCME del 2001, que es de 7,24 mg/kg, por lo cual no se recomienda utilizar o aplicar emplastos de lodo con fines terapéuticos ni realizar actividades de cocina cerca a estos ambientes.
- Las concentraciones obtenidas para el plomo en las aguas termales de Pachapupum, con  $0,127 \pm 0,005$  mg/L, son mayores a las de Cceronta, con valores por debajo del límite de detección  $<0,048$  mg/L. En Pachapupum supera el límite establecido por el ECA peruano, que refiere como límite a 0,05 mg/L de plomo. Por otro lado, los sedimentos de Pachapupum, que resultó en  $21,820 \pm 0,279$  mg/kg y de Cceronta, con

21,724 ± 0,318 mg/kg, presentan niveles de plomo por debajo del estándar de la normal legal canadiense, que establece como 30,2 mg/kg al límite máximo permitido. Sin embargo, si bien estos valores se encuentran dentro del parámetro estipulado, son cercanos al valor límite, por lo cual es importante ejecutar periódicamente labores de monitoreo en las aguas y sedimentos de estas fuentes termales para tener un control sobre la variación de la concentración de este analito.

- Las aguas termales de Pachapupum y Cceronta presentan niveles de Hg por debajo de 0,01 mg/L, los cuales se encuentran por debajo de lo estipulado por los estándares.
- El sedimento de Cceronta (0,698 ± 0,021 mg/kg) presenta mayores niveles de Hg que en Pachapupum (2,660 x 10<sup>-3</sup> ± 7,543 x 10<sup>-4</sup> mg/kg), encontrándose en el rango de peligrosidad. Por lo tanto, no es recomendable emplear el sedimento de Cceronta según las normas y pautas de calidad desarrolladas por el Consejo de ministros del Medio Ambiente de Canadá.
- En base a los resultados de cadmio (en base a ALS), las aguas termales de Pachapupum y Cceronta presentan niveles por debajo de 0,01 mg/L, lo cual no sobrepasa los límites del ECA peruano A2 y A3 referentes a fuentes de agua empleadas para uso recreativo. Por otro lado, el sedimento de Pachapupum (4,052 ± 0,058 mg/kg) presenta mayores niveles de cadmio que en Cceronta (1,828 ± 0,045 mg/kg). Ambos resultados se encuentran entre los niveles de TEL y PEL según las normas de calidad de Canadá, lo que indica que ocasionalmente ocurren efectos adversos en seres vivos, por ello es importante realizar un monitoreo de este analito cada cierto tiempo para verificar su variación en concentración por ser una especie contaminante.
- Para hierro, el agua termal de Cceronta presenta 0,536 ± 0,009mg/L, lo cual es similar a la concentración obtenidas en Pachapupum con 0,493 ± 0,005 mg/L. En ambos casos superan los valores del ECA de agua peruano, por lo que pueden considerarse como contaminantes en ambas fuentes termales. Los valores de hierro para las estaciones de Pachapupum y Cceronta fueron de 5249,216 ± 14,199 mg/kg y 1701 ± 6,385 mg/kg, respectivamente.
- Para aluminio, se detectó que el agua termal de Pachapupum y Cceronta poseía niveles que eran inferiores al límite de detección del equipo de AAS 0,254 mg/L. Por ello, para lograr detectar los niveles del analito en la muestra de agua de Pachapupum, se tuvo que concentrar la muestra. Por otro lado, las muestras de sedimentos obtenidas

de ambas estaciones de muestreo arrojaron valores elevados de aluminio, siendo las muestras de sedimento de Pachapupum, con  $5612,616 \pm 130,405$  mg/kg, mayores a los niveles de aluminio de Cceronta, con  $1052,015 \pm 32,890$  mg/kg.

## 7.2. Recomendaciones

- Un dato que es relevante y requiere de mayor análisis, es la concentración de azufre presente en ambas fuentes termales. El principal problema al ingresar en ambos ambientes termales fue el olor característico a azufre que puede generar dolores de cabeza. Recomendaría que se puede realizar el análisis de los niveles de azufre en el aire, especialmente en Pachapupum, ya que en la actualidad se encuentran personas trabajando en el área y la inhalación continua de los compuestos sulfurados pueden generar efectos negativos en la salud como dolores de cabeza y alteración de las funciones motoras.
- Se debe implementar un sistema de lavado para la salida de las aguas termales con la finalidad de eliminar cualquier residuo que se pueda adherir en el cuerpo. En ambos lugares cuentan con ríos cercanos que pueden servir para este fin.
- El principal contaminante es el As, por lo que en ambas fuentes termales se debe limitar el acceso para evitar una sobreexposición a los contaminantes presentes. Además, sería recomendable evitar que los animales que circulan el área consuman de esta agua y vegetación cercana. Además, es recomendable evitar el uso de las fuentes termales para cocinar comida como huevos.
- Se recomendaría realizar un estudio sobre las diferentes tecnologías que existen actualmente para purificar el agua contaminada como intercambio iónico, métodos electroquímicos, empleo de nanomateriales, tratamiento biológico empleando microorganismos (Cayetano, 2019) y que puedan ser empleadas por la población. Esto dependerá del presupuesto que se disponga.
- Se recomienda generar un espacio de difusión de los resultados obtenidos con los pobladores de la región, donde se comparta la información de este trabajo sobre los niveles de los contaminantes presentes en las fuentes de aguas termales de Pachapupum y Cceronta.

## 8. REFERENCIAS

- Abbaspour, N., Hurrell, R., & Kelishadi, R. (2014). Review on iron and its importance for human health. *Journal of Research in Medical Sciences : The Official Journal of Isfahan University of Medical Sciences*, 19(2), 164–174. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24778671>
- Acharya, S. (2013). Lead between the lines. *Nature Chemistry*, 5(10), 894. <https://doi.org/10.1038/nchem.1761>
- Acosta, P. (2015). *Proyecto bandera para el turismo termal en colombia termales de Cumbal, Nariño*. Fontur Colombia. Acceso en: [https://fontur.com.co/sites/default/files/2020-12/proyecto\\_bandera\\_para\\_el\\_turismo\\_termal\\_en\\_col.pdf](https://fontur.com.co/sites/default/files/2020-12/proyecto_bandera_para_el_turismo_termal_en_col.pdf)
- Adams, S. (2008). *Arsenic: medicinal double-edged sword*. Healio. <https://www.healio.com/news/hematology-oncology/20120325/arsenic-medicinal-double-edged-sword#:~:text=Since then%2C arsenic and its,to treat ulcers and cancer.>
- Gaikwad, S. (2019). *The Environmental Impact of Aluminum (And Why it's Still Better Than Plastic)* en The Piping Mart Blog. Acceso en: <https://www.thesca.org/connect/blog/environmental-impact-aluminum>
- ASTDR. (2019). *Estudio de sustancias tóxicas*. ATSDR En Español; ASTDR. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology\\_curriculum/modules/4/es\\_module4.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology_curriculum/modules/4/es_module4.html)
- ATSDR. (2007). Toxicological Profile for Arsenic. *ATSDR's Toxicological Profiles, August*. [https://doi.org/10.1201/9781420061888\\_ch33](https://doi.org/10.1201/9781420061888_ch33)
- ATSDR. (2008). Toxicological Profile for Aluminum. In *ATSDR's Toxicological Profiles* (Issue September). [https://doi.org/10.1201/9781420061888\\_ch109](https://doi.org/10.1201/9781420061888_ch109)
- ATSDR. (2009). *La toxicidad del arsénico*. Curso de Toxicología Para Comunidades. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/efectos\\_fisiologicos.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/efectos_fisiologicos.html)
- ATSDR. (2012). *Toxicological Profile for Cadmium* (Issue September). [https://doi.org/10.1016/s1090-3798\(09\)70033-9](https://doi.org/10.1016/s1090-3798(09)70033-9)

Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., López, F., Ruales, J., Prunier, J., Marquet, A., & Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution*, 229, 950–963. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.080>

San Miguel de la Cámara, M. (1956). *Geoquímica de las fuentes termales*. Real Academia Nacional de Medicina (Madrid)

Canadian Council of Ministers of the Environment. (2001). *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*. Port of London Authority. [https://www.pla.co.uk/Environment/Canadian-Sediment-Quality-Guidelines-for-the-Protection-of-Aquatic-Life#:~:text=of Aquatic Life-,Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life,ecosystems \(CCME%2C 2001\).](https://www.pla.co.uk/Environment/Canadian-Sediment-Quality-Guidelines-for-the-Protection-of-Aquatic-Life#:~:text=of Aquatic Life-,Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life,ecosystems (CCME%2C 2001).)

Carbotecnia. (2013). *Remoción de fierro y manganeso*. Carbotecnia. <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/eliminadores-de-fierro-y-manganeso/fierro-y-manganeso-en-el-agua/#:~:text=Este proceso de remoción de,de resinas de intercambio iónico.>

Castillo, J., Barreda, J., & Vela, C. (1993). *Geología de los cuadrángulos de Laramate y Santa Ana*.

Cayetano, P. (2019). Tecnologías Para La Recuperación De Agua Contaminada Con Metales Pesados: Plomo, Cadmio, Mercurio Y Arsénico, En Boletín Tecnológico N°3 - Año 2019. Lima, Perú. Acceso en: <https://web.ins.gob.pe/sites/default/files/Archivos/ogitt/cati/3%20BOLET%3%8DN%20T%3%89CNOLOGICAS%20N-3%202019.pdf>

Centeno, R. (2016). Evaluación de la calidad de las aguas termales del balneario de Colcamayo, distrito de Santa Teresa, La Convención-Cusco. Tesis de Licenciatura en Biología. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Consulta: 02 de diciembre de 2022. <http://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/UNSAAC/2874/253T20171097.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Centro Nacional del Medio Ambiente. (2010). *Análisis de la composición físico química de los sedimentos fluviales y su relación con la disponibilidad de metales en agua* S.I.T. N° 207, Volumen II. Santiago de Chile



Chung, J. S., Haque, R., Guha Mazumder, D. N., Moore, L. E., Ghosh, N., Samanta, S., Mitra, S., Hira-Smith, M. M., von Ehrenstein, O., Basu, A., Liaw, J., & Smith, A. H. (2006). Blood concentrations of methionine, selenium, beta-carotene, and other micronutrients in a case-control study of arsenic-induced skin lesions in West Bengal, India. *Environmental Research*, 101(2), 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2005.10.006>

Cosio, C., & Renault, D. (2019). Effects of cadmium, inorganic mercury and methylmercury on the physiology and metabolomic profiles of shoots of the macrophyte. *Environmental Pollution*, 113557. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113557>

DARS. (2014). *Sistematización del Proyecto Sacsamarca (2013-2014)*. Pontificia Universidad Católica del Perú (Lima).

Duruibe, J.O., Ogwuegbu, M.O.C. and Egwurugwu, J.N. (2007) Heavy Metal Pollution and Human Biotoxic Effects. *International Journal of Physical Science*, 2, 112-118. Acceso en: [https://academicjournals.org/article/article1380209337\\_Duruibe%20et%20al.pdf](https://academicjournals.org/article/article1380209337_Duruibe%20et%20al.pdf)

EPA. (1994). *Method 200.7, Revision 4.4: Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry*.

Espejo Reyes, L. T., & Mantilla Villar, J. L. (2013). *Análisis físicoquímicos de las aguas termominerales de Cachicadan, Yanasara, baños Chimú y Huaranchal en La Libertad, Perú*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química.: Universidad Nacional de Trujillo. Consulta: 16 de noviembre de 2022. Acceso en: [http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/3446/EspejoReyes\\_L%20-%20MantillaVillar\\_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/3446/EspejoReyes_L%20-%20MantillaVillar_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Fagundo Castillo, J. R., & González Hernández, P. (2004). *Aguas naturales, minerales y mineromedicinales*. <http://www.sld.cu/sitios/mednat/docs/aguas.pdf>

Friberg, L., Piscator, M., & Nordberg, G. (2018). Cadmium in the environment. In *Cadmium in the Environment*. <https://doi.org/10.1201/9781351070379>

Galetovic Carabantes, A., & De Fernicola, N. A. G. G. (2003). Arsénico en el agua de bebida: Un problema de salud pública. *Revista Brasileira de Ciências Farmaceuticas*, 39(4), 365–372. <https://doi.org/10.1590/s1516-93322003000400003>

Gamboa N. Informe Final. Estrategia: Vinculación con cursos QUI361 y QUI210, semestre 2015-2. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú; 2016 p. 9-16.

Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the Elements* (2nd ed.). Editorial Butterworth Heinemann.

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., & Fujita, M. (Eds.). (2018). *Mechanisms of Arsenic Toxicity and Tolerance in Plants*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1292-2>

Huamaní Huaccán, A. (2001). Aguas termales y minerales en el suroriente del Peru (Dptos. Apurímac, Cusco, Madre de Dios y Puno). En *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)*.

Hynek, D., Prasek, J., Pikula, J., Adam, V., Hajkova, P., Krejcová, L., Trnkova, L., Sochor, J., Pohanka, M., Hubalek, J., Beklova, M., Vrba, R., & Kizek, R. (2011). Electrochemical analysis of lead toxicosis in vultures. *International Journal of Electrochemical Science*, 6(12), 5980–6010.

INEI. (2017). *Directorio Nacional de Centros Poblados. XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*.

Johnson, C. M., & Beard, B. L. (2005). Biogeochemical Cycling of Iron Isotopes. *Science*, 309(5737), 1025 LP – 1027. <https://doi.org/10.1126/science.1112552>

Jornada: Diario Judicial. (2015). *Baños termales de Geronta están altamente contaminados*. Jornada:Diario Judicial. <https://www.jornada.com.pe/component/content/article/12-todas/regional/4579-banos-termales-de-geronta-estan-altamente-contaminados?Itemid=265>

Klaassen C.D.(Ed.), (2019). *Casarett & Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons, 9th edition*. McGraw Hill.

Kresse, T. M., & Hays, P. D. (2009). Geochemistry, comparative analysis, and physical and chemical characteristics of the thermal waters east of Hot Springs National Park, Arkansas. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2009-5263, February*, 48. <https://pubs.usgs.gov/sir/2009/5263/downloads/SIR2009-5263.pdf>

Lillo, J. (2008). Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas Visite el GEMM Grupo de Estudios de Minería y Medioambiente (Textos y cursos on-line).

- Gemm*, 33.  
[http://www.aulados.net/GEMM/Documentos/Peligros\\_geoquimicos\\_As/Peligros\\_As\\_2.pdf](http://www.aulados.net/GEMM/Documentos/Peligros_geoquimicos_As/Peligros_As_2.pdf)
- Liu, G., Cai, Y., & O’Driscoll, N. (2012). *Environmental Chemistry and toxicology of mercury*. Wiley: Nueva Jersey.
- López, M. V. M., Pico, L. F. G., Montoya, A. B., Gómez, A. D. R., & Navarro, S. V. M. (2011). *Cuantificación de Arsénico en Aguas Termales de Importancia Recreacional en el Estado de Chihuahua*. Memoria de Congreso (Mexico).
- Lutgens, F. K., & Tarbuck, E. J. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física*. Pearson Prentice Hall (Madrid).
- Marín, A., Gonzalez, V. H., Lapo, B., Molina, E., & Lemus, M. (2016). Niveles de mercurio en sedimentos de la zona costera de El Oro, Ecuador. *Gayana*, 80(2), 147–153. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382016000200147>
- McFarland, M. L., & Dozier, M. C. (2004). Problemas del agua potable: El hierro y el manganeso. Reporte de la Cooperativa de Texas Extensión, El Sistema Universitario Texas A & M., 6.
- Maxe Malca, M. R., (2015). Estudio de la calidad físico-química y mineromedicinal del agua termal de los Baños del Inca. UCV-HACER. Revista de Investigación y Cultura, 4(1),38-42. Consulta: 21 de Septiembre de 2022. ISSN: 2305-8552. Acceso en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=521751973004>
- McNaught, A. D., & Wilkinson, A. (1997). *Compendium of Chemical Terminology*. Blackwell Scientific Publications.
- MINAM. (2017) Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Lima, 07 de junio de 2017. Consulta: 30 de setiembre de 2022. Acceso en: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- MINCETUR. (2012). *Estrategia de Turismo Termal de Perú: Informe final*.
- MINEM. (nd). *Los Principales Metales que Produce el Perú* [folleto] Consulta: 10 de agosto de 2022. Acceso en: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/GUIAS/FO LLETOS/principalesmetales.pdf>

Ministerio del Medio Ambiente (2008). Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM. Lima, 31 de julio de 2008. Consulta: 15 de setiembre de 2022. Acceso en: [http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes\\_tecnicos/GRUPO DE USO 3.pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO DE USO 3.pdf)

Olivier, J., & Jonker, N. (2013). *Optimal Utilisation of Thermal Springs In South Africa* (Issue November).

OMS. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: World Health Organization; 2022.

Ortiz, A. (2018). *Determinación del contenido de mercurio (Hg) en sangre de niños en la zona minera/metalúrgica de Cedral S.L.P.* Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Tierra. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. Consulta: 15 de octubre de 2022. Acceso en: [https://www.researchgate.net/publication/331767969\\_Determinacion\\_del\\_contenido\\_de\\_mercurio\\_Hg\\_en\\_sangre\\_de\\_ninos\\_en\\_la\\_zona\\_minerametallurgica\\_de\\_Cedral\\_SLP](https://www.researchgate.net/publication/331767969_Determinacion_del_contenido_de_mercurio_Hg_en_sangre_de_ninos_en_la_zona_minerametallurgica_de_Cedral_SLP).

Rahimzadeh, M. R., Rahimzadeh, M. R., Kazemi, S., & Moghadamnia, A. A. (2017). Cadmium toxicity and treatment: An update. *Caspian Journal of Internal Medicine*, 8(3), 135–145. <https://doi.org/10.22088/cjim.8.3.135>

Romero Guadarrama, J. A. (2011). Geoquímica de As, Hg, Pb y Zn y mineralogía en sedimentos superficiales de la cuenca de drenaje del distrito minero el triunfo, B.C.S., México. Disponible en *Centro interdisciplinario de ciencias marinas*. Consulta: 15 de julio de 2022. Acceso en: <https://doi.org/Tesis de Ingenieria Civil>

NORMA Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, 26 551 (1996).

Shan, Bing & Hao, Ruixia & Xu, Hui & Li, Jiani & Li, Yinhuang & Xu, Xiyang & Zhang, Junman. (2021). A review on mechanism of biomineralization using microbial-induced precipitation for immobilizing lead ions. *Environmental Science and Pollution Research*. 28. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14045-8>

Sinclair, M. (2008). *Modern Hydrotherapy for the Massage Therapist*. Wolters Kluwers.

Steinmüller, K., & Huamaní Huaccán, A. (1997). Aguas termales y minerales en el centro del Perú. In *INGEMMET. Boletín N°21, Series D: Estudios Regionales*.

Steinmuller, K., & Núñez Juárez, S. (1998). Hidrotermalismo en el sur del Perú: Sector Cailloma-Puquio. In *INGEMMET*.

Tahir, M. W., Saleemi, M. K., Khan, A., Yousaf, M., Butt, S. L., Siriwong, W., Muhammad, F., Bhatti, S. A., & Qureshi, A. S. (2017). Hematobiochemical effects of cadmium intoxication in male Japanese quail (*Coturnix japonica*) and its amelioration with silymarin and milk thistle. *Toxin Reviews*, 36(3), 187–193. <https://doi.org/10.1080/15569543.2017.1287088>

United States Environmental Protection Agency. (2001). *Methods for Collection, Storage and Manipulation of Sediments for Chemical and Toxicological Analyses: Technical Manual Manipulation of Sediments for Chemical and Toxicological Analyses: Technical Manual* (p. 208). <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/collectionmanual.pdf>

Valle, R. Z. (1973). *Agua minerales del Perú*. INGEMMET. Boletín, Serie D: Estudios Regionales; n° 2. Repositorio Institucional de INGEMMET. Acceso en: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/348>

Vargas, V. (2010). Las Fuentes Termales En El Perú, Estado Y Uso Actual. *Sociedad Geológica Del Perú*, 9, 1175–1178.

Vásquez, G. R. (2015). *Cosmovisión andina*. Volveré.

Yuen, H., & Becker, W. (2020). *Iron Toxicity*. StatPearls. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1955.tb03528.x>

Yupanqui, E. G. (2006). *Análisis fisicoquímico de fuentes de aguas termominerales del Callejón de Huaylas*. Tesis de Maestría en Química. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Consulta: 10 de julio de 2022. Acceso en: [https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/90/YUPANQUI\\_EDSON\\_ANALISIS\\_FISICOQUIMICO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/90/YUPANQUI_EDSON_ANALISIS_FISICOQUIMICO.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

## 9. ANEXOS

### **Anexo 1: Entrevista a pobladores de Ayacucho**

Las siguientes líneas presentan los extractos más relevantes de las entrevistas realizadas a algunos pobladores ayacuchanos, cuyos testimonios fueron obtenidos con su consentimiento.

#### **9.1.1. Percepción de los pobladores con respecto a las fuentes termales**

En Pachapupum, los pobladores se cubren de emplastos de lodo con fines terapéuticos. En Cceronta, emplean el lodo para calentar comida, como huevos, sin percatarse de que estos alimentos podrían absorber los contaminantes. En base a los viajes realizados se observó que la gente que asiste a estos ambientes se baña durante horas.

Para conocer la percepción de los pobladores de Ayacucho con respecto a las aguas termales, se entrevistó a dos personas originarias de Puquio, Willman y Orlando, quienes se encontraban bañando en las pozas de Cceronta. Las preguntas formuladas y las respuestas no literales son:

***Pregunta 1: ¿Con qué frecuencia los pobladores vienen a las aguas termales?***

Respuesta: Es constante, siempre encuentras personas bañándose.

***Pregunta 2: ¿Con qué finalidad los pobladores vienen a las aguas termales?***

Respuesta: Como esta agua es medicinal, vienen a bañarse para poder curarse de enfermedades como reumatismo u otras cosas, ya que las aguas tienen tantas sustancias para curar.

***Pregunta 3: ¿Cuánto tiempo se exponen a las aguas termales en cada visita?***

Respuesta: Entre 1 a 2 horas.

En base a sus respuestas, se infiere que no hay control por parte de las autoridades en cuanto al uso de estas aguas termales y que los pobladores no están conscientes y/o desconocen la composición química de las mismas y sus implicancias. Creen que, por tratarse de aguas termales presentan propiedades medicinales que pueden curar sus diversas afecciones como el reumatismo o problemas dermatológicos.

En Pachapupum, además de emplear las aguas termales, los pobladores hacen uso de emplastos de lodo, que consideran terapéuticos. En ambos casos, es importante

desarrollar campañas de educación e información sobre las propiedades de las aguas termales y los cuidados que deben respetarse.

De este modo, en base a los resultados obtenidos durante el estudio de las muestras de agua y sedimento provenientes de estos recursos naturales y de la información recabada de los pobladores usuarios de los mismos, se puede dar preliminarmente respuestas a las preguntas formuladas al inicio de este trabajo de investigación.

***¿Cómo se puede orientar a la población para hacer un uso responsable de los recursos termales con el fin de preservarlos?***

Una buena herramienta de concientización de los pobladores que hacen uso de los recursos naturales descritos previamente corresponde a las capacitaciones impartidas por la Dirección Académica de Responsabilidad Social (DARS) de la PUCP, la cual, a través de los talleres y charlas brindados a la comunidad para una adecuada gestión de residuos sólidos, con el apoyo de miembros de la Sección Química que lideraron los esfuerzos de capacitación para concientizar a los habitantes de la zona.

Es importante que esta clase de charlas y proyectos se promuevan y continúen dándose para que la población pueda adoptar estas acciones y recomendaciones dadas de modo que se introduzcan en su estilo de vida a modo de costumbres.

***¿La población que asiste a las fuentes termales mencionadas es consciente de los peligros asociados a las mismas?***

De la información recabada a partir de las entrevistas, se puede inferir que la población no se encontraría totalmente consciente de los riesgos potenciales que implican el uso de los recursos termales presentes en estas zonas. Sin embargo, debe dejarse en claro que esto no es representativo del pensamiento general de la región.

***¿Qué actividades relacionadas a estas aguas termales ponen en peligro la salud de los visitantes? ¿Los peligros asociados a las fuentes termales en el Perú son debidamente informados a la población?***

Las actividades de mayor riesgo para la población son las que se relacionan con la ingesta de los recursos presentes en las fuentes termales, de forma directa mediante la ingesta del agua de las pozas. Luego, una exposición prolongada o de uso continuo de los recursos

de estas fuentes puede tener efectos negativos en la población debido a la presencia de elementos tóxicos.

De igual modo al caso de Pachapupum y Cceronta, se observa que, en los poblados más alejados en el Perú profundo, con menos recursos económicos, esta información no se difunde por parte de las autoridades, por lo que los pobladores desconocen de los riesgos asociados al empleo de estos recursos naturales.

