

# Arsénico en aguas subterráneas de la cuenca del río Callacame y su impacto en suelos agrícolas en Desaguadero, Puno – Perú

Miguel Elías Calcina-Benique <sup>a</sup>, Liliam Elizabeth Calcina-Rondán <sup>b</sup>, Froilán Rodolfo Huaraya-Chambi <sup>c</sup>,  
Antonio Renán Salas-Camargo <sup>d</sup> & Kevin Tejada-Meza <sup>e</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú. miguel.calcina@unap.edu.pe

<sup>b</sup> Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú. lcalcinar@unsa.edu.pe

<sup>c</sup> Facultad de Ingenierías, Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú. c16955@utp.edu.pe

<sup>d</sup> Facultad de Arquitectura Ingeniería Civil y del Ambiente, Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú. 75667140@ucsm.edu.pe

<sup>e</sup> Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas, Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú. ktejada@ucsm.edu.pe

Received: September 9<sup>th</sup>, 2021. Received in revised form: April 25<sup>th</sup>, 2022. Accepted: May 12<sup>th</sup>, 2022.

## Resumen

El arsénico es un elemento presente en el medio ambiente tanto en formas orgánicas como inorgánicas, siendo su forma inorgánica más tóxica. La presente investigación busco cuantificar el arsénico presente en aguas subterráneas y muestras de suelo e identificar el impacto en los suelos agrícolas en la cuenca del río Callacame. Se colectaron y prepararon muestras para su análisis con la metodología EPA 6020 con ICP-MS. Los resultados mostraron concentraciones de arsénico en aguas subterráneas entre 3 a 446 µg/L, en suelos de 10 a 42,7 mg/Kg. En el caso de agua subterránea existieron 4 puntos que sobrepasaron los estándares de calidad ambiental para el país de origen de las muestras (Perú) Se concluyó que en un futuro si no se cuenta con la vigilancia adecuada pueden darse pie a procesos de bioacumulación y biomagnificación producto del riego de suelos con aguas subterráneas contaminadas con arsénico.

*Palabras clave:* agua subterránea; arsénico; suelo agrícola e impacto.

# Arsenic in groundwater of the Callacame river basin, and its impact on agricultural soils in Desaguadero, Puno - Perú

## Abstract

Arsenic is an element present in the environment in both organic and inorganic forms, being its inorganic form more toxic. The present investigation sought to quantify the arsenic present in groundwater and soil samples and to identify the impact on agricultural soils in the Callacame river basin. Samples were collected and prepared for analysis using EPA 6020 methodology with ICP-MS. The results showed arsenic concentrations in groundwater ranging from 3 to 446 µg/L, in soils from 10 to 42.7 mg/Kg. In the case of groundwater, there were 4 points that exceeded the environmental quality standards for the country of origin of the samples (Peru). It was concluded that in the future, without adequate monitoring, bioaccumulation and biomagnification processes may occur because of the irrigation of soils with groundwater contaminated with arsenic.

*Keywords:* groundwater; arsenic; agricultural soil and impact.

## 1. Introducción

El agua es un componente indispensable para la supervivencia de todos los organismos vivos, y preservar su calidad es la preocupación más importante de la humanidad, ya que influye directamente en el bienestar

general de la población [1]. La única fuente de agua potable para muchas comunidades rurales es el agua subterránea, alrededor del 50% de la población mundial depende del agua subterránea para beber [2]. El agua subterránea se encuentra en el subsuelo y en los espacios porosos del suelo y roca contenida en formaciones

**How to cite:** Calcina-Benique, M.E., Calcina-Benique, Liliam Elizabeth Calcina-Rondán, L.E., Huaraya-Chambi, F.R., Salas-Camargo, A.R. and Tejada-Meza, K., Arsénico en aguas subterráneas de la cuenca del río Callacame y su impacto en suelos agrícolas en Desaguadero, Puno - Perú. DYNA, 89(221), pp. 178-184, April - June, 2022.

geológicas conocidas como acuíferos, acuícludos, acuitardos y acuífugos, siendo los acuíferos los más explotados debido al gran volumen de agua que contienen, a diferencia del agua superficial presentan una gran capacidad de protegerse de varios agentes contaminantes, sin embargo, una vez contaminados su regeneración es muy lenta y dificultosa [3].

Las aguas subterráneas se contaminan por razones como la urbanización inadecuada, actividades industriales como la minería, prácticas agrícolas y la mala disposición de residuos sólidos [2]. La principal causa natural de contaminación del suelo y agua subterránea por As, es la meteorización de rocas que contienen As; mientras que las fuentes o causas antropogénicas son combustión de carbón, actividades como la fundición de minerales de metales básicos, la aplicación de pesticidas a base de As, el arseniato de cobre cromatado (CCA) que se usa en la preservación de madera y actividades mineras, entre otras. Una razón natural adicional puede ser la tendencia del As a moverse en el medio ambiente, un fenómeno influenciado por aguas superficiales, aguas subterráneas y suelos agrícolas convirtiéndose en un problema ambiental importante, la contaminación de aguas subterráneas ha sido reportada en países de todos los continentes excepto en la Antártida [4].

En el agua el As se presenta en dos estados de oxidación: As (V), As (III); el arsenito es más peligroso que el arseniato [5]. Se ha reportado la presencia de arsénico en aguas subterráneas por ejemplo en grandes áreas del oeste de Bengala (India) y Bangladesh [6,7], en Vietnam [8,9], en el este de África [10] y en América del sur [11-16]. En el Perú se han reportado investigaciones que demuestran la presencia de As en aguas subterráneas de la zona amazónica [17] y en la zona andina también, precisamente en la zona rural de Pelipeline y Jallamilla [18], en Huata y Carancas [19]. A la vez se ha demostrado la presencia de arsénico hasta 500 µg/L. en los distritos de Juliaca y Caracoto, el 6% de las muestras de agua subterránea superan los límites permisibles de 10 µg/L [20].

A nivel mundial se riegan aproximadamente 112.9 millones de hectáreas (Mha) con 545 km<sup>3</sup>/ha por año de agua subterránea, lo que representa un 43 % del total de agua usada en irrigaciones, siendo países asiáticos como China e India los que riegan más área con agua subterránea, mientras que en América del sur se riegan 1.71 Mha con aguas subterráneas y la zona andina específicamente riega 660 447 ha con aguas subterráneas [21]. El uso agrícola de aguas subterráneas con alto contenido de arsénico trae consigo la bioacumulación de As en las raíces de diversos cultivos, el As atraviesa la membrana plasmática de las células endodérmicas de la raíz, probablemente a través de la acción de una bomba de membrana o puede ingresar al apoplasto radicular a través del espacio entre las celdas, las plantas pueden acumular tanto arsenito como arseniato a través de diferentes mecanismos. El arseniato y el fosfato comparten la misma vía de transporte en plantas superiores a través del transportador de fosfato, el mecanismo de absorción implica el co-transporte de fosfato o arseniato y protones [22].

As y fósforo (P) son elementos químicos análogos, y se propone que tengan comportamientos químicos similares en los sistemas ambientales. Sin embargo, algunas propiedades químicas de As y P son distintas, como las reacciones redox, que hacen que el comportamiento biogeoquímico de estos dos elementos difiera. En el medio ambiente, As se produce como oxianiones As (V) o As (III) como, AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup> o AsO<sub>3</sub><sup>3-</sup>. En contraste, P ocurre predominantemente con estado de oxidación (V+); más comúnmente como el ión ortofosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>). Se sabe que el arseniato afecta a la fosforilación oxidativa, porque compite con el fosfato. En condiciones en las cuales la concentración de fosfato es alta, la toxicidad del arseniato para la biota es generalmente reducida [23]. Como el arseniato es análogo al fosfato, los organismos que viven en presencia de una concentración elevada de arseniato deben adquirir el fósforo nutritivo, pero evitando la toxicidad del arsénico [24].

La capacidad de adsorción de un suelo está afectada por su textura, contenido de sesquióxidos de hierro, aluminio y por la presencia de otros elementos que puedan interferir en el proceso de adsorción. Las fracciones arenosa y limosa muestran una capacidad de adsorción bastante reducida debido a su baja área superficial y a la predominancia de cuarzo, mientras que la arcilla es el principal adsorbente [25]. En suelo agrícola, los compuestos inorgánicos de arsénico permanecen retenidos en forma indefinida, la alcalización del suelo contribuye a aumentar la movilidad del arsénico [26].

El arsénico está presente en el medio ambiente tanto en formas inorgánicas y orgánicas, siendo el As inorgánico el más tóxico, al As se le conoce como un elemento esencial en la biota y su presencia en el cuerpo humano puede causar intoxicación que incluye trastornos de la piel, debilidad, languidez, anorexia, náuseas, vómitos con diarrea o estreñimiento, pigmentación de la piel, melanosis arsenical e hiperqueratosis, agrandamiento del hígado, enfermedades respiratorias y cáncer de piel [22].

El presente artículo científico es importante debido a que el arsénico es un metal pesado contaminante y su presencia en aguas subterráneas y suelo agrícola origina riesgos en muchos entornos sobre todo en la salud humana, los suelos son receptores de muchos elementos y estos a su vez soportan la vida de las plantas, animales y por ende el desarrollo humano. La cuenca de río Callacame, se caracteriza por albergar dos tipos de rocas de mayor ocurrencia como son la presencia de rocas metasedimentarias del Grupo Puno, la formación Maure y la presencia de rocas volcánicas cenozoicas como: Senca, Capillune, Barroso y depósitos fluviales y aluviales. El arsénico está presente en las rocas volcánicas ácidas y en rocas con presencia de mineralización hidrotermal Ag-Pb-Zn con contenidos de As, los minerales más comunes son arsenopirita (FeAsS), enargita (Cu<sub>3</sub>AsS<sub>4</sub>) y tenanita (Cu<sub>12</sub>As<sub>4</sub>S<sub>13</sub>), rejalgar (AsS), Oropimente-Stibnita (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), por lo tanto, el As en sistemas acuosos proviene en parte de la disolución de estos minerales, la erosión y desintegración de rocas y por deposición en la cuenca [27]. El objetivo de la presente investigación fue determinar la

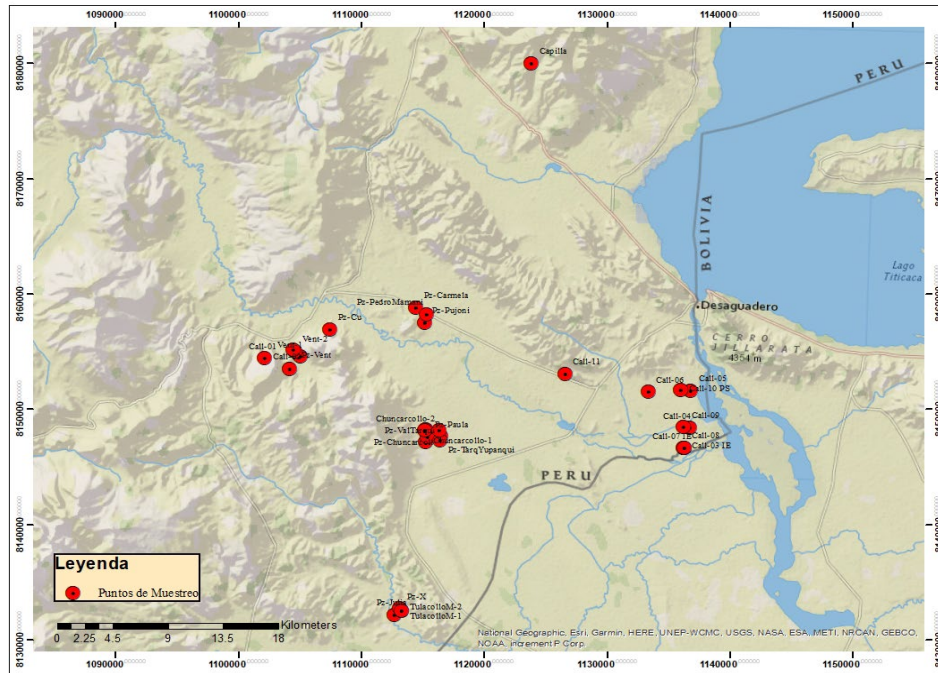


Figura 1. Área de estudio con puntos de muestreo  
Fuente: Elaboración propia

presencia de arsénico en aguas subterráneas de la cuenca del río Callacame y dar a conocer los posibles impactos en los suelos agrícolas en Desaguadero – Perú.

## 2. Material y métodos

El estudio se realizó en la cuenca del río Callacame tributario del río Desaguadero, provincia Chucuito, región Puno, al sur de Perú, a una altitud de 3,820 a 3,850 msnm, con una extensión de 84.1 hectáreas (ha), enmarcadas dentro de las coordenadas UTM 460 000 – 489 500 E y 8 155 000 - 8 173 000 N. Ver mapa en la Fig. 1.

### 2.1 Área de estudio

### 2.2 Obtención de muestras de agua subterránea y suelo

Se establecieron 32 puntos para la toma de muestras de aguas subterráneas, dichos puntos son lugares estratégicos en los cuales existen afloramientos naturales de aguas subterráneas, las muestras de suelo fueron tomadas alrededor de los puntos. En la Tabla 1 se presenta la localidad, código y coordenadas UTM de cada punto considerado, los puntos se pueden visualizar también en la Fig. 1.

Tabla 1.  
Puntos de muestreo enclavados en el área de estudio.

Localidad	Código	Coordenadas UTM*	
		Este	Norte
<b>Puntos de muestreo de agua subterránea</b>			
Huacullane	Call-01	461391	8162910
Huacullane	Call-02	463384	8162060
Huanocollo	Call-03 IE	495542	8156198

Huanocollo	Call-04	495944	8157905
Carancas	Call-05	495944	8161156
Carancas	Call-06	492508	8160934
Huanocollo	Call-07 IE	495494	8156148
Huanocollo	Call-08	495540	8156197
Carancas	Call-09	495467	8157980
Carancas	Call-10 PS	495132	8161152
C <sup>o</sup> Collana	Call-11	485729	8162302
Yoroco	Vent-1	464278	8163124
Yoroco	Vent-2	463787	8163569
Huacullane	Pz-Cu	466567	8165566
Yoroco	Pz-Vent	463689	8163678
Kelluyo	Pz-Chuncarcollo	474573	8157114
K-Tulacollo	Pz-Julia	472569	8141069
K-Tulacollo	Pz-X	472947	8141633
Pomata	Capilla	482173	8189005
Cicuyani-QM	Pz-Pujoni	474232	8166384
Cicuyani-QM	Pz-Carmela	473480	8167640
Cicuyani-QM	Pz-PedroMamani	474361	8167080
Kelluyo	CC-Chuncarcollo	475721	8156761
Cicuyani	Pz-ValTarqui	474655	8156038
Cicuyani	Pz-PpaCahualla	475822	8156632
Cicuyani	Pz-Paula	474738	8156516
Cicuyani	Pz-TarqYupanqui	475761	8156275
Kelluyo	Pz-Chuncarcollo	474573	8157114
Keluyo	TulacolloM-1	473107	8141406
Keluyo	TulacolloM-2	473107	8141406
Keluyo	Chuncarcollo-1	474531	8157089
Keluyo	Chuncarcollo-2	475684	8157089
<b>Puntos de muestreo de suelos</b>			
Quiñones - Mamani	MQ1-M1	474665	8167789
Quiñones - Mamani	MQ1-M2	474665	8167789
Chuncarcollo	CH2-M1	475721	8156761
Chuncarcollo	CH2-M2	475721	8156761

\*hemisferio sur, zona 19.  
Fuente: Elaboración propia

Las muestras de aguas subterráneas y suelos fueron obtenidas de las comunidades de Quiñones – Mamani (QM), Chuncarcollo, Huacullane, Huanocollo, Kelluyo y Cicuyani del distrito de Desaguadero, en los meses de junio-agosto de los años 2015, 2016 y 2018.

Las muestras de agua subterránea fueron tomadas de 32 pozos cuya ubicación puede apreciarse en la Fig. 1. Las muestras de suelos se tomaron en zonas cercanas a los pozos surgentes de agua subterránea en un área de 2 y 10 m<sup>2</sup>. Se utilizó un barreno muestreador saca testigo, de un diámetro de 3 pulgadas para extraer de una profundidad de 30 a 40 cm. En cada punto de muestreo, se realizó limpieza de material orgánico presente, la muestra fue de 1 Kg. aproximadamente y fue almacenada en bolsas de polietileno. Las perforaciones se realizaron en las comunidades de Quiñones – Mamani y Chuncarcollo.

### 2.3 Preparación de muestras

La preparación de muestra se realizó por el método EPA-3051 [28]; se sometió a secado y trituración al tamaño de malla de 2 mm para su digestión en un digestor de microondas, por un tiempo de 10 minutos a una temperatura de 175°C, los reactivos utilizados fueron 10 ml de HNO<sub>3</sub> y 3 ml de HCl.

### 2.4 Análisis de muestras

El análisis de arsénico en aguas subterráneas se hizo basándose en el método EPA 6020 [29] utilizando un ICP-MS. Los parámetros fisicoquímicos se tomaron con un multiparámetro de forma directa en caso de la muestra de agua subterráneas y en caso de suelo con una solución al 50% Agua/Suelo.

## 3. Resultados

### 3.1 Caracterización fisicoquímica de aguas subterráneas

A continuación, se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos tomados in situ, en cada punto de muestreo. En la Tabla 2 se aprecia la codificación de cada punto y el respectivo valor de cada parámetro evaluado.

### 3.2 Presencia de Arsénico en agua subterránea

Los resultados de la presencia de la As en las muestras se detallan en la Tabla 3, reportando resultados en microgramos por litro (µg/L) y miligramos por litro (mg/L).

Al realizar la composición química de As en aguas subterráneas, en 32 muestras, se obtuvo valores entre 3 y 446 µg/L.

Para analizar la calidad de las aguas subterráneas los datos fueron ploteados en el diagrama Piper (Fig. 2) para 32 muestras

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos de las muestras recolectadas.

Código	pH	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	ORP (mV)
Call-01	7,82	104,9	70,0	110
Call-02	7,27	1361,0	900,0	201

Código	pH	CE (µS/cm)	STD (mg/L)	ORP (mV)
Call-03 IE	7,78	675,0	450,0	-74
Call-04	7,96	613,0	390,0	-73
Call-05 PS	7,53	664,0	420,0	-82
Call-06	7,72	392,0	260,0	-12
Call-07 IE	8,30	580,0	420,0	-82
Call-08	8,15	420,0	280,0	-108
Call-09	8,14	600,0	350,0	-114
Call-10 PS	8,50	542,0	180,0	-60
Call-11	8,5	280,0	400,0	147
Ventilla-1	6,4	811,0	586,7	478
Ventilla-2	6,5	739,0	530,0	717
Pz-Cumo	6,60	186,7	138,3	457
Pz-Ventilla	7,70	627,0	550,0	759
Pz-Chuncarcollo	9,50	532,0	371,8	794
Pz-Julia	6,80	933,0	654,5	765
Pz-X	6,90	299,0	209,5	718
Capilla	7,00	29,8	17,0	694
Pz-Pujoni	6,90	92,6	67,0	691
Pz-Carmela	6,40	359,0	253,5	684
Pz-PedroMamani	7,20	536,0	372,0	784
CC-Chuncarcollo	7,80	945,0	594,0	344
Pz-ValTarqui	7,60	908,0	656,0	280
Pz-PpaCahualla	7,80	1180,0	815,0	220
Pz-Paula	7,30	1907,0	1520,0	228
Pz-	8,00	1466,0	992,5	226
TarqYupanqui				
Pz-Chuncarcollo	9,50	532,0	371,5	227
TulacolloM-1	8,10	315,0	214,0	226
TulacolloM-2	8,00	315,0	221,5	227
Chuncarcollo-1	7,80	945,0	594,0	227
Chuncarcollo-2	7,90	945,0	572,0	227

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3 Concentración de arsénico en agua subterránea.

Código	As (µg/L)	As (mg/L)
Call-01	0	0,0000
Call-02	2	0,0020
Call-03 IE	420	0,4200
Call-04	346	0,3460
Call-05 PS	22	0,0220
Call-06	207	0,2070
Call-07 IE	4	0,0040
Call-08	446	0,4460
Call-09	93	0,0930
Call-10 PS	4	0,0040
Call-11	25	0,0250
Ventilla-1	12	0,0117
Ventilla-2	18	0,0181
Pz-Cumo	1,0	0,0014
Pz-Ventilla	4	0,0044
Pz-Chuncarcollo	4	0,0044
Pz-Julia	0,0	0,0000
Pz-X	0,0	0,0000
Capilla	15	0,0153
Pz-Pujoni	4	0,0040
Pz-Carmela	2	0,0017
Pz-PedroMamani	5	0,0051
CC-Chuncarcollo	9	0,0090
Pz-ValTarqui	4	0,0045
Pz-PpaCahualla	4	0,0039
Pz-Paula	4	0,0039
Pz-TarqYupanqui	4	0,0040
Pz-Chuncarcollo	4	0,0040
TulacolloM-1	3	0,0031
TulacolloM-2	3	0,0026
Chuncarcollo-1	9	0,0090
Chuncarcollo-2	9	0,0091

Fuente: Elaboración Propia

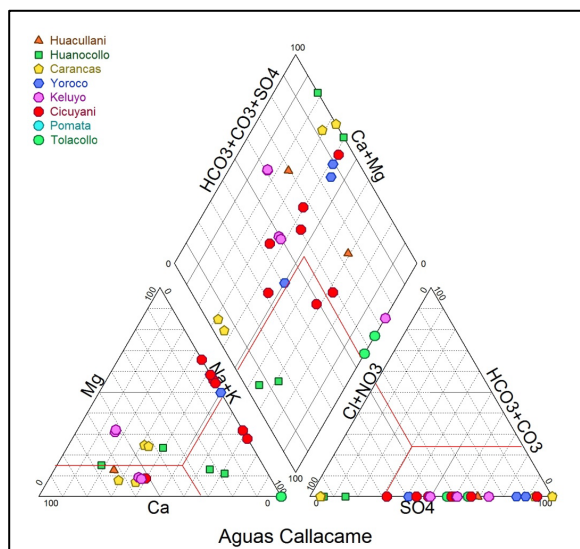


Figura 2. Diagrama Piper de clasificación de aguas subterráneas.  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.  
Concentración de arsénico en suelos.

COD	Carbono Orgánico (%)	As (mg/Kg)
MQ1-M1	-	10,0
MQ1-M2	2,22	42,7
CH2-M1	-	10,0
CH2-M2	2,31	14,6

Fuente: Elaboración Propia

El diagrama indica que son aguas calcoalcalinas sulfatadas que son provenientes de minerales constituyentes de rocas félsicas, así mismo los parámetros fisicoquímicos indican un pH de 6,4 a 9,5; CE (uS/cm) 29, 8 a 1,907. STD 17 a 1520, ORP (mV) -114 a 794, Alk (mg/L) -98 a 681.

### 3.3 Presencia de Arsénico en suelos

Los análisis químicos en las muestras de suelos dieron los siguientes valores de As en suelos (Tabla 4).

Las especies de arsénico presentes en las aguas subterráneas de la cuenca del río Callacame son arseniato en ambientes oxidantes y arsenito en ambientes reductores, los suelos alrededor de pozos del sector de Chuncarcollo tienen alto contenido de carbono orgánico y alto As, por lo tanto, la especie presente es el arsenito.

Las especies de arseniato son estables a altos valores de Eh y pH neutrales, mientras el arsenito es estable en condiciones reductoras. Las muestras de aguas nos indican una variabilidad en el potencial redox de -114 a + 794 (mV) estas aguas son divididas en dos grupos basados por el contenido de ORP: negativos y positivos. La correlación Fe-As positiva indica que el As está presente con óxidos e hidróxidos de hierro en ambiente oxidante.

## 4. Discusiones

La química natural de las aguas subterráneas está influenciada principalmente por la composición química de las rocas y del subsuelo por las que el agua fluye sobre o en los intersticios, lo cual podría relacionarse con los resultados

fisicoquímicos de las muestras.

La ocurrencia de un elemento en diferentes formas químicas, estados de oxidación y fases minerales es conocida como especiación. La especiación de un elemento puede representar su toxicidad y biodisponibilidad en el suelo. Hoy en día, es bien sabido que la especiación metálica indica mejor su comportamiento biogeoquímico en comparación con el contenido total de metales [30]. El diagrama de Piper (Fig. 2) nos sugiere con el triángulo de la parte inferior izquierda que no hay un dominio catiónico único, sino indica dominios mixtos siendo similar a lo reportado por Ahmed et al. [31], en el triángulo de la parte inferior derecha nos indica que todas las muestras se colocan en la región de SO<sub>4</sub> y algunas muestras comparten dominio de Cl<sup>-</sup> y HCO<sub>3</sub>, agrupando a las aguas dentro un solo grupo denominado calcoalcalinas, lo que sugiere procesos de meteorización en su evolución hidrogeológica.

Con respecto a los resultados de arsénico en agua subterránea según Smedley y Kinniburgh [6], en el río Amazonas es superior a 300 ug/L. mientras que el promedio de los valores encontrados fue de 64 ug/L. La normativa del país de origen de las muestras nos señala un estándar de calidad ambiental con una concentración máxima 200 ug/L, enmarcado en la categoría 3 (Riego y bebida de animales) [32]. Según los resultados encontramos cuatro puntos de muestreo donde la concentración de arsénico supera este estándar de calidad ambiental en algunos casos en más del doble de la concentración permitida, lo cual podría implicar un riesgo ambiental, sin embargo estas concentraciones fueron halladas en pozos de 30 a 40 metros de profundidad que aún no son de acceso a la población, requiriendo una vigilancia y manejo especial puesto que en un futuro pueden ser motivo directo de riesgo ambiental y a la salud. Autores como Strawn, D. [23] mencionan que los riesgos ambientales sufren influencia por parte del manejo de suelos, sedimentos, aguas subterráneas y superficiales, debido al ciclo biogeoquímico del Arsénico, para lo cual es necesario conocer su especiación y concentración para reducir riesgos de contaminación en ecosistemas naturales.

El arsénico tanto en su forma inorgánica como orgánica tienen presencia en suelos [33]. Según los estándares de calidad ambiental planteados por la normativa del país de origen de las muestras son permitidas concentración de hasta 50 mg/Kg, por lo que los resultados obtenidos están dentro de lo permitido. Esto puede deberse a la composición de los horizontes en los suelos de los sectores de de Huacullane, Huanocollo, Kelluyo y Cicuyani que presentan texturas franco limosas por lo que no permiten una adsorción significativa del arsénico proveniente de las aguas residuales, sin embargo sectores como Quiñones – Mamani presentan horizontes arcillosos con abundante presencia de materia orgánica, en este sector precisamente es donde se encontraron las concentraciones más altas de arsénico en suelo acercándose al estándar de calidad ambiental. En caso se produjeran procesos de bioacumulación en un futuro estas concentraciones podrían sobrepasar los estándares teniendo un impacto directo en la cadena alimenticia ya que las plantas pueden absorber arsénico siendo un riesgo para los cultivos y pastizales naturales en la zona, que luego podrían desencadenar en una biomagnificación [34].



Las muestras comprendidas en el sector de Huacullani corresponden a un suelo contaminado por la actividad minera, investigaciones afirman que los suelos contaminados por la actividad minera pueden contener entre 45-2600 mg/Kg de arsénico, mientras que un suelo agrícola no contaminados contienen entre 1-20 mg/Kg de arsénico [35], en los resultados del sector de Huacullani entre 10 y 14 mg/Kg por lo que sus concentraciones serían aun adecuadas para un uso agrícola, sin embargo si se efectúa un riesgo con aguas subterráneas contaminadas por arsénico esto puede promover una aparición de altas concentraciones

## 5. Conclusiones

La concentración de As en las aguas subterráneas en el área de estudio se encuentra entre los 3 y 446 µg/L, sobrepasando en 4 de los 32 puntos de muestreo el estándar de calidad ambiental de 100 µg/L.

El diagrama de Piper elaborado indica que las aguas subterráneas pertenecen al grupo de las calcoalcalinas sulfatadas provenientes de minerales constituyentes de rocas félsicas, con parámetros fisicoquímicos en rangos de pH de 6,4 a 9,5; C.E 29,8 – 1907 y ORP de -114 a 794.

Las concentraciones de arsénico en suelos están dentro de los estándares de calidad ambiental y actualmente no representan un riesgo para la salud y el ambiente, sin embargo, si se efectúa el riego de estos suelos con aguas subterráneas puede dar pie a procesos de bioacumulación y biomagnificación que implicarían un riesgo para los ecosistemas de la zona de estudio.

## Referencias

- [1] Patil, V.T. and Patil, P.R., Physicochemical analysis of selected groundwater samples of Amalner Town in Jalgaon District, Maharashtra, India. *E-Journal of Chemistry*, 7(1), pp. 111-116, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1155/2010/820796>
- [2] Rasool, A., Farooqi, A., Masood, S. and Hussain, K., Arsenic in groundwater and its health risk assessment in drinking water of Mailsi, Punjab, Pakistan. *Human and Ecological Risk Assessment*, 22(1), pp. 187-202, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1056295>
- [3] Gomez-Vargas, J.S.G., Conzalez-Velasquez, E.D. and Pérez-Morales, I.D., Percolación de lixiviados y contaminación de aguas subterráneas análisis sistemático de literatura. Tesis, Universidad Cooperativa de Colombia, Villavicencio, 2017.
- [4] Kumar, M., Ramanathan, A., Rahman, M.M. and Naidu, R., Concentrations of inorganic arsenic in groundwater, agricultural soils and subsurface sediments from the middle Gangetic plain of Bihar, India. *Science of The Total Environment*, 573, pp. 1103-1114, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.109>
- [5] Plant, J.A., Bone, J., Voulvoulis, N., Kinniburgh, D.G., Smedley, P.L., Fordyce, F.M. and Klinck, B., Chapter 11.2: Arsenic and Selenium. In: Sherwood-Lollar, B. (ed.), *Environmental Geochemistry*. Holland, H.D. and Turekian, K.K. (exec.eds.), *Treatise on Geochemistry* 2<sup>nd</sup> Ed. Vol. 11. Elsevier, Oxford, U.K., 2014, pp 13- 57
- [6] Smedley, P.L. and Kinniburgh, D.G., A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), pp. 517-568, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- [7] Rahman, M.M., Dong, Z. and Naidu, R., Concentrations of arsenic and other elements in groundwater of Bangladesh and West Bengal, India: potential cancer risk. *Chemosphere*, 139, pp. 54-64, 2015.
- [8] Nguyen, V.A., Bang, S., Viet, P.H. and Kim, K.-W., Contamination of groundwater and risk assessment for arsenic exposure in Ha Nam province, Vietnam. *Environment International*, 35(3), pp. 466-472, 2009.
- [9] Postma, D., Larsen, F., Jakobsen, R., Sø, H.U., et al., On the spatial variation of arsenic in groundwater of the Red River floodplain, Vietnam. *Arsenic R*, 3, 2016.
- [10] Bretzler, A., Lalanne, F., Nikiema, J., Podgorski, J., Pfenninger, N., Berg, M. and Schirmer, M., Groundwater arsenic contamination in Burkina Faso, West Africa: predicting and verifying regions at risk. *Science of the Total Environment*, 584, pp. 958-970, 2017.
- [11] Bundschuh, J., Armienta, M.A., Birkle, P., Bhattacharya, P., Matschullat, J. and Mukherjee, A.B., *Natural arsenic in groundwaters of Latin America*. CRC Press, 1997.
- [12] Francisca, F.M. and Perez, M.E.C., Assessment of natural arsenic in groundwater in Cordoba Province, Argentina. *Environmental Geochemistry and Health*, 31(6), pp. 673, 2009.
- [13] Smedley, P.L., Nicolli, H.B., Macdonald, D.M.J., Barros, A.J. and Tullio, J.O., Hydrogeochemistry of arsenic and other inorganic constituents in groundwaters from La Pampa, Argentina. *Applied geochemistry*, 17(3), pp. 259-284, 2002.
- [14] Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G., Macdonald, D.M.J., Nicolli, H.B., et al., Arsenic associations in sediments from the loess aquifer of La Pampa, Argentina. *Applied geochemistry*, 20(5), pp. 989-1016, 2005.
- [15] de Esparza, M.C., Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. *Int Cong Nat Arsenic Groundwaters Lat. Amer*, 20, 2006.
- [16] Bundschuh, J. and García, M., Rural Latin America-a forgotten part of the global groundwater arsenic problem. *Groundwater for sustainable development: problems, perspectives and challenges*. Balkema Publisher, Leiden, Netherlands 2008, pp.311-321.
- [17] de Meyer, C.M.C., Rodríguez, J.M., Carpio, E.A., García, P.A., Stengel, C. and Berg, M., Arsenic, manganese and aluminum contamination in groundwater resources of Western Amazonia (Peru). *Science of the Total Environment*, 607-608(December), pp. 1437-1450, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.059>
- [18] Esparza, M., Noriega, R., Wong, M. y Inamine, A., Estudio para el mejoramiento de la calidad del agua de pozos en zonas rurales de Puno. Puno, Lima-Perú, 2005.
- [19] Apaza-Panca, R. y Calcina-Benique, M.E., Contaminación natural de aguas subterráneas por arsénico en la zona de Carancas y Huata, Puno. *Revista Investigaciones Altoandinas*, 16(01), 2014. DOI: <https://doi.org/10.18271/ria.2014.35>
- [20] George, C.M., Sima, L., Arias, M.H.J., Mihalic, J., et al., Arsenic exposure in drinking water: an unrecognized health threat in Peru. *Bulletin of the World Health Organization*, 92(8), pp. 565-572, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2471/BLT.13.128496>
- [21] Siebert, S., Burke, J., Faures, J.M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P. and Portmann, F.T., Groundwater use for irrigation - a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), pp. 1863-1880, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>
- [22] Das, I., Ghosh, K. and Sanyal, S.K., Phytoremediation: a potential option to mitigate arsenic contamination in soil-water-plant system. *Everyman's Sci*, 40(2), pp. 115-123, 2005.
- [23] Strawn, D.G., Review of interactions between phosphorus and arsenic in soils from four case studies. *Geochemical Transactions*, 19, art. 10, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12932-018-0055-6>
- [24] World Health Organization. Arsenic in drinking-water: background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. World Health Organization. [online]. 2003, 11 P. Available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/75375>
- [25] Barrachina, A.C., Carbonell, F.B. and Beneyto, J.M., Arsenic uptake, distribution, and accumulation in tomato plants: effect of arsenite on plant growth and yield. *Journal of Plant Nutrition*, 18(6), pp. 1237-1250, 1995.
- [26] Franco, L.F.L., Presencia de metales pesados en hatos lecheros de los municipios de San Pedro y Entreríos, Antioquia, Colombia. Tesis, Universidad de León, España, 2014, 232 P.
- [27] Calcina-Benique, M.E., Evaluación geoquímica del arsénico en aguas subterráneas de la Subcuenca del Río Callacame, Desaguadero Puno. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, 2017.

- [28] U.S. EPA. Method 3051A: microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, and oils. In: Environmental Sampling and Analytical Methods (ESAM) Program. 2007.
- [29] U.S. EPA. Method 6020b - Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry. Standard Methods - ICP-MS, Vol. 39, 2014.
- [30] Abbas, G., Murtaza, B., Bibi, I., Shahid, M., et al., Arsenic uptake, toxicity, detoxification, and speciation in plants: physiological, biochemical, and molecular aspects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(1), art. 59, 2018.
- [31] Ahmed, F.T., Khan, A.H.A.N., Khan, R., Saha, S.K., et al., Characterization of arsenic contaminated groundwater from central Bangladesh: irrigation feasibility and preliminary health risks assessment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 15, art. 100433, 2021.
- [32] MINAM, Peru. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias. Lima, 2017.
- [33] Mitra, A., Chatterjee, S., Moogouei, R. and Gupta, D.K., Arsenic accumulation in rice and probable mitigation approaches: a review. *Agronomy*, 7(4), art. 67, 2017.
- [34] Schneider, M., Cadorn, H.R., Welz, B., Carasek, E. and Feldmann, J., Determination of arsenic in agricultural soil samples using High-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry and direct solid sample analysis. *Talanta*, 188, pp. 722-728, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.06.052>
- [35] Anawar, H.M., Garcia-Sanchez, A., Murciego, A. and Buyolo, T., Exposure and bioavailability of arsenic in contaminated soils from the La Parrilla mine, Spain. *Environmental Geology*, 50(2), pp. 170-179, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0196-2>
- M.E. Calcina-Benique**, es Ing. Geólogo en 1990, Dr. en Ciencia Tecnología y Medio Ambiente en 2007 ambos por la Universidad Nacional del Altiplano, Perú.  
ORCID: 0000-0001-5801-6337.
- L.E. Calcina-Rondán**, es Bióloga por la Universidad Nacional de San Agustín, Perú, MSc. en Planificación y Gestión Ambiental en 2006 por la Universidad Católica de Santa María, Perú.  
ORCID: 0000-0003-4024-4870
- F.R. Huaraya-Chambi**, es Biólogo en 1993 por la Universidad Nacional de San Agustín, Perú, MSc. en Planificación y Gestión Ambiental en 2008 por la Universidad Católica de Santa María, Perú.  
ORCID:0000-0001-6516-0484
- A.R. Salas-Camargo**, es Ingeniero Ambiental en 2020 por la Universidad Católica de Santa María, Perú, con experiencia en investigación científica en ecotoxicología y detección de contaminantes emergentes  
ORCID: 0000-0002-0778-623
- K.Tejada-Meza**, es Ingeniero Biotecnólogo en 2018 por la Universidad Católica de Santa María, Perú, experiencia en investigación científica en biotecnología ambiental y bioprocesos.  
ORCID: 0000-0002-9716-7821