

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**REMOCIÓN DE ARSÉNICO (As) EN AGUAS NATURALES POR  
PROCESOS DE OXIDACIÓN, FLOCULACIÓN,  
SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**ANALI PARY HILARI**

**MAURICIO WILBER MAMANI PARISUAÑA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PUNO – PERÚ**

**2018**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

REMOCIÓN DE ARSÉNICO (As) EN AGUAS NATURALES POR PROCESOS DE  
OXIDACIÓN, FLOCULACIÓN, SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN

TESIS PRESENTADA POR:

**ANALI PARY HILARI**

**MAURICIO WILBER MAMANI PARISUAÑA**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:



PRESIDENTE : .....  
M.Sc. ROGER HUANQUI PÉREZ

PRIMER MIEMBRO : .....  
M.Sc. GERMAN QUILLE CALIZAYA

SEGUNDO MIEMBRO : .....  
M.Sc. JANETTE ROSARIO RAMOS PINEDA

DIRECTOR / ASESOR : .....  
M.Sc. SALOMÓN TITO LEÓN

**LÍNEA:** Tecnologías ambientales y recursos naturales.

**TEMA:** Remoción de arsénico en aguas.

**ÁREA :** Tratamiento de aguas.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 27 DE ABRIL DE 2018

## DEDICATORIA

A Dios por darnos salud, alegría y muchas bendiciones.

A mis Padres Teófilo Pary Coquecondo y a mi Madre Irma Hilari Arapa por el esfuerzo y sabios consejos que hicieron que mis pasos sean firmes y llenos de esperanza con mucho cariño hacia ustedes.

Es un maravilloso placer el poder culminar satisfactoriamente esta etapa dentro de mi carrera como estudiante, por ello quiero agradecer a la fuerza de mi inspiración, a la fe que me hace creer, a Dios; que es el que me impulsa a buscar y lograr sueños.

*Anali Pary Hilari*

A la memoria de mi padre Fortunato Mamani Choquechambi que me guía en cada momento, mi madre Francisca Parisuaña Zea por el amor, sacrificio, confianza y por su invaluable apoyo total e incondicional a lo largo de toda mi vida

A mi querida esposa Susy Edith quien a sido mi confidente y quien me a brindado siempre su amor y cariño mi hija Leslie, Naysha Khaleesi, quien ha sido mi inspiración mi alegría que con sus sonrisas alegran mi corazón

*Mauricio Wilber Mamani Parisuaña*

## AGRADECIMIENTOS

- Mis más sinceras muestras de agradecimiento:
- A la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, por el apoyo brindado en mi formación profesional, es un honor haber culminado mis estudios en tan respetable Universidad.
- A los Docentes de la facultad de Ingeniería Química, por compartir sus conocimientos y experiencias profesionales con mí persona.
- Al asesor de la presente tesis, **M Sc. Norberto Miranda Zea**, por el asesoramiento en la culminación de este trabajo de investigación, por su apoyo y colaboración, por compartir sus conocimientos que se ven plasmados en este trabajo.
- A mis padres, por el apoyo constante.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE ACRONIMOS	
RESUMEN .....	14
ABSTRACT.....	15
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>16</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	18
1.1.1. Descripción del problema.....	18
1.1.2. Delimitación del problema .....	19
1.1.3. Problema general .....	19
1.1.4. Problema específico .....	19
1.2. ANTECEDENTES.....	20
1.3. OBJETIVOS .....	29
1.3.1. Objetivo general .....	29
1.3.2. Objetivos específicos.....	29
1.4. JUSTIFICACION .....	30
1.5. HIPOTESIS .....	33
1.5.1. Hipótesis general .....	33
1.5.2. Hipótesis específicos .....	33
1.5.3. Operacionalización de variables.....	33
1.5.4. Utilidades de los resultados del estudio .....	34
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>35</b>
2.1. MARCO TEORICO .....	35

2.1.1. Arsénico (AS).....	35
2.1.2. Sedimentación .....	41
2.1.3. Floculación .....	50
2.1.4. Filtración .....	52
2.1.5. Caracterización de la cal cao .....	57
2.1.6. Caracterización del agua superficial de río contaminada con arsénico.....	62
2.1.7. Proceso de adsorción de arsénico de muestras de agua por oxidación, floculación, sedimentación y filtración .....	63
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>65</b>
3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....	65
3.1.1. Ámbito de estudio .....	65
3.1.2. Muestreo de agua superficial de río .....	65
3.1.3. Definición del plan de muestreo.....	66
3.1.4. Ejecución del muestreo .....	66
3.1.5. Proceso de remoción de arsénico as de aguas .....	68
3.2. MATERIALES .....	69
3.3. METODOLOGÍA .....	70
3.3.1. Evaluación de las variables influyentes en el proceso de remoción de arsénico de aguas superficiales de río.....	70
3.3.2. Diseño experimental de la adsorción/precipitación del ion arsénico.....	74
3.3.3. Cinética de adsorción .....	74
3.3.4. Evaluación de la sedimentación .....	76
3.3.5. Evaluación de la filtración grava-arena IF .....	77

<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>80</b>
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA CAL ARTESANAL.....	80
4.1.1.	Tratamiento de la Cal CaO (Oxido de Calcio) .....	81
4.1.2.	Tratamiento físico - químico de la cal CaO .....	82
4.1.4.	Disoluciones de Hidróxido de Calcio Ca(OH) <sub>2</sub> .....	82
4.2.	CARACTERIZACIÓN DE AGUA SUPERFICIAL DE RIO CONTAMINADA CON ARSENICO .....	84
4.3.	PROCESO DE ADSORCIÓN DE ARSÉNICO DE MUESTRAS DE AGUA POR OXIDACIÓN, FLOCULACION, SEDIMENTACION Y FILTRACIÓN .....	86
4.3.1.	Evaluación de las variables influyentes en el proceso de remoción de arsénico en disoluciones acuosas y aguas superficiales de río.....	87
4.3.2.	Efecto de pH.....	92
4.3.3.	Efecto del tiempo de proceso para remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río .....	95
4.3.4.	Influencia de la cantidad del oxidante fecl <sub>3</sub> para proceso de remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río.....	100
4.4.	REMOCIÓN DE ARSÉNICO AS DE DISOLUCIONES ACUOSAS Y AGUAS SUPERFICIALES DE RÍO POR PROCESO DE OXIDACIÓN, FLOCULACIÓN, SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN .....	101
4.4.1.	Remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación y floculación .....	101

4.4.2. Remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación, floculación y filtración .....	108
4.5. LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES .....	113
4.6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	114
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>116</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>117</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>118</b>
ANEXOS .....	125

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1: Esquematización del ciclo del arsénico en el medio ambiente.....	36
Figura 2: Diagrama de sedimentación ideal de partículas discretas en tres diferentes clases de sedimentadores: (a) Rectangular, (b) Circular (c) De flujo ascendente .....	46
Figura 3: Diagrama para análisis de sedimentación ideal de partículas discretas. ....	47
Figura 4: Tanques circulares de sedimentación (a) alimentación central (b) alimentación perimetral. ....	49
Figura 5: Proceso de tratamiento de la cal artesanal cao. ....	60
Figura 6: Curva de asentamiento para un ensayo de sedimentación en cochada. ....	77
Figura 7: Balance de materia del tratamiento de la cal artesanal cao.....	82
Figura 8: Efecto de cantidades de cal cao para adsorción de as en muestras acuosas. 88	
Figura 9: Diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles.....	91
Figura 10: Efecto del PH para adsorción de as en muestras acuosas. ....	93
Figura 11: Efecto del tiempo de proceso para remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río.....	96
Figura 12: Diferencias estadísticamente del tiempo vs concentración de As. ....	98
Figura 13: Diferencias estadísticamente del tiempo vs concentración de As. ....	100
Figura 14: Remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación constante y floculación.....	102
Figura 15: Diferencias estadísticamente del tiempo vs concentración de As .....	106
Figura 16: Diferencias estadísticamente de cal VS concentración de As. ....	108
Figura 17: Remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación, floculación y filtración. ....	109
Figura 18: Diferencias estadísticamente de caudal vs concentración de As.....	112

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1: Operacionalización de variables. ....	34
Tabla 2: Principales características de filtros. ....	56
Tabla 3: Principales variables en filtración. ....	57
Tabla 4: Propiedades físicas y químicas del óxido de calcio cao. ....	58
Tabla 5: Características físico – químicas de agua superficial de río. ....	63
Tabla 6: Puntos de toma de muestreo del río Ayaviri. ....	68
Tabla 7: Efecto de la cantidad de cal CAO para adsorción de AS. ....	71
Tabla 8 : Efecto del PH para adsorción de AS. ....	72
Tabla 9: Efecto de tiempo de contacto. ....	73
Tabla 10: Cinética de adsorción y variables experimentales de proceso. ....	74
Tabla 11: Propiedades físicas y químicas del óxido de calcio CAO. ....	81
Tabla 12: Características físico – químicas de agua superficial del río ayaviri. ....	85
Tabla 13: Efecto de las cantidades de cal cao para adsorción de as en muestras acuosas. ....	88
Tabla 14: Análisis estadístico de cal cao para adsorción de as en muestras acuosas... 89	89
Tabla 15: Tabla a nova para CF (MG/L) POR W (G/L). ....	89
Tabla 16: Pruebas de múltiple rangos para CF (MG/L) POR W (G/L) ....	90
Tabla 17: Tabla anova para Q (MG/G) POR W (G/L). ....	90
Tabla 18: Pruebas de múltiple rangos para Q (MG/G) POR W (G/L) ....	91
Tabla 19: Efecto de diferentes PH para adsorción de as en muestras acuosas y agua superficial del río Ayaviri. ....	92
Tabla 20: Análisis estadístico de PH para adsorción de as en muestras acuosas y agua superficial del río Ayaviri. ....	94
Tabla 21: Tabla anova para CF (MG/L) POR PH. ....	94

Tabla 22:	Tabla anova para Q (MG/G) POR PH. ....	94
Tabla 23:	Efecto de tiempo de contacto. ....	95
Tabla 24:	Análisis de varianza del efecto del tiempo de proceso para remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río. ....	96
Tabla 25:	Tabla anova para CF (MG/L) POR T (MIN). ....	97
Tabla 26:	Pruebas de múltiple rangos para CF (MG/L) POR T (MIN). ....	97
Tabla 27:	Tabla anova para Q (MG/G) POR T (MIN). ....	98
Tabla 28:	Pruebas de múltiple rangos para Q (MG/G) POR T (MIN). ....	99
Tabla 29:	Remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación constante y floculación. ....	102
Tabla 30:	Análisis estadístico para remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación constante y floculación. ....	104
Tabla 31:	Tabla anova para CF (MG/L) POR W CAL (G/L) ....	104
Tabla 32:	Pruebas de múltiple rangos para CF (MG/L) POR W CAL (G/L) ....	105
Tabla 33:	Tabla anova para Q (MG/G) POR W CAL (G/L). ....	106
Tabla 34:	Pruebas de múltiple rangos para Q (MG/G) POR W CAL (G/L). ....	107
Tabla 35:	Remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación, floculación y filtración. ....	109
Tabla 36:	Análisis de varianza para la remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación, floculación y filtración. ....	110
Tabla 37:	Tabla anova para CF (AS) (MG/L) POR CAUDAL (L/MIN) ....	110
Tabla 38:	Pruebas de múltiple rangos para CF (AS) (MG/L) Por caudal (L/MIN) ...	111
Tabla 39:	Tabla anova para Q(MG/G) Por caudal (L/MIN) ....	112
Tabla 40:	Resumen límites máximos permisibles. ....	113

## ÍNDICE DE ACRONIMOS

<b>As</b>	: Arsénico
<b>D.S</b>	: Decreto Supremo
<b>ECA</b>	: Estándares de Calidad Ambiental
<b>EC</b>	: Electrocoagulación
<b>Fe</b>	: Hierro
<b>LMP</b>	: Límites Máximo Permisible
<b>MINAN</b>	: Ministerio del Ambiente
<b>NOM</b>	: Material Orgánico Natural
<b>OMS</b>	: Organización Mundial de la salud

## RESUMEN

Los metales pesados presentes en aguas naturales, son sustancias tóxicas capaces de causar graves daños en los seres vivos, por ser no biodegradables y permanecen mucho tiempo en el entorno, acumulándose en el organismo de los seres vivos; el metal pesado Arsénico contaminante del agua es el que pone en riesgo a la salud del ser humano por acumularse en el organismo por exposición crónica y por consumo en el agua que causa afecciones de alteraciones de la piel, efectos en el sistema nervioso, irritación del aparato respiratorio, gastrointestinal y hematopoyético, acumulación en los huesos musculo y piel, y en menor grado en el hígado y riñones (Rivera y Avila, 1998). El arsénico (As) contaminante natural o antropogénica en aguas naturales se encuentra con valores por encima de los estándares nacionales y existe la necesidad de reducir las concentraciones a niveles permisibles de Calidad Ambiental para el Agua, D.S. N°-004-2017 MINAM, con Límites máximos permisibles (LMP) del agua para consumo humano y bebida para animales para el arsénico de 0.01 mg/L. (El Peruano del Perú, 2010). Dentro del objetivo de estudio fue evaluar la remoción de arsénico (As) en soluciones acuosas y en aguas naturales superficiales del río Ayaviri cuyas muestras fueron tomadas en coordenadas UTM  $x = 314682.62m$  y  $y = 8362441.88m$  y procesados por oxidación con Cloruro férrico; floculación – sedimentación utilizando cal Artesanal y filtración en lecho de grava I.F; cuyos resultados de remoción de As, se compararon a los LMP según Normas Nacionales de Calidad Ambiental del agua. La investigación es de carácter explicativa y experimental, el estudio se realizó en el Laboratorio de Tecnología de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del altiplano Puno, a condiciones ambientales de 460 mm de Hg, a altitud de 3812 metros sobre el nivel del mar (msnm) y a temperatura variable de 12 a 15 °C. Los resultados del estudio para la remoción el As se utilizó 14,64 mg/L de  $FeCl_3$  para oxidación óptima de arsénico As, como floculante se utilizó 0,022 g/L de cal CaO de pureza del 52,52 % y se filtró en columna de grava y arena IF, a un caudal de 10,5 L/min; lográndose una remoción de arsénico As, del 93,75% en soluciones acuosas y en muestras de agua superficial del río Ayaviri; la remoción del As, tiene valores menores a los Límites Máximo Permisibles LMP de las Normas Nacionales de Calidad Ambiental del Agua ECA D.S. 004-2017. MINAN, Perú.

**Palabras clave:** Arsénico, floculación, filtración if, oxidante, remoción

## ABSTRACT

Heavy metals in natural waters, are toxic substances capable of causing serious damage to living beings because they are not biodegradable and remain long in the environment, accumulating in the body of living beings; Arsenic. The heavy metal water pollutant is the one that puts human health at risk by accumulating in the body by chronic exposure and by consumption in the water that causes conditions of skin disorders, effects on the nervous system, irritation of the respiratory, gastrointestinal and hematopoietic apparatus, accumulation in the muscle and skin bones, and to a lesser extent in the liver and kidneys. (Rivera & Avila, 1998). Arsenic (As), a natural or anthropogenic contaminant, in natural waters is found with values above national standards and there is a need to reduce the concentrations to permissible levels of Environmental Quality for Water, D.S. N ° -004-2017 MINAM, with maximum permissible limits (MPL) of water for human consumption and animal drink for arsenic of 0.01 mg / L. (El Peruano from Peru, 2010). Within the study objective, the removal of arsenic (As) in aqueous solutions and in natural surface waters of the Ayaviri River was evaluated, which samples were taken in UTM coordinates  $x = 314682.62m$   $y = 8362441.88m$  and processed by oxidation with ferric chloride; flocculation - sedimentation using artisanal lime and filtration in I.F recording bed; which As removal results were compared to the MPL according to the National Water Quality Standards. The research is of explanatory and experimental nature, the study was carried out in the Water Technology Laboratory of the Faculty of Chemical Engineering of the National University of the Puno Highlands, at environmental conditions of 460 mmHg, at an altitude of 3812 meters above the sea level (masl) and at a variable temperature of 12 to 15 ° C. The results for the removal of the As were used 14.64 mg / L of  $FeCl_3$  for optimal oxidation of arsenic (As), as a flocculent 0.022 g / L of CaO lime of 52.52% purity was used and filtered in column of gravel and sand IF, at a flow rate of 10.5 L / min; achieving a removal of arsenic (As), of 93.75% in aqueous solutions and in surface water samples from the Ayaviri river; the removal of As, has values lower than the Maximum Permissible Limits MPL of the National Environmental Quality Standards of the ECA D.S. 004-2017. MINAN, Peru

**Keywords:** Arsenic, Flocculation, IF filtration, Oxidant, Removal

## I. INTRODUCCIÓN

Las cantidades de los recursos hídricos que son usadas para satisfacer el consumo humano, cada vez son más escasas; es así que en términos de gestión de los recursos de agua disponibles como el de provisión del acceso al agua potable y saneamiento para la población a nivel mundial, el requerimiento del agua constituye un desafío en su tratamiento para el presente siglo XXI. El agua al ser un bien ambiental, su preservación como recurso natural e integrado al medio ambiente es hoy el principio rector para el manejo del agua en todos sus usos; en este sentido, uno de los problemas de mayor preocupación que afrontan son las aguas naturales continentales que por su naturaleza tienen contenido de elementos perjudiciales para la salud de quienes la consumen, es el caso del elemento de metal pesado arsénico (As) y así mismo también se generan cambios en el agua por el uso que se le da en diversas actividades antropogénicas caso en actividades minero metalúrgicos en el que se producen aguas residuales con altos contenidos de metales pesados caso del arsénico.

El arsénico presente en el agua al ser consumido es considerado como elemento cancerígeno para la población humana, cuando esta exceda en concentraciones superiores a los límites de los valores máximo permisibles (LMP), es el caso que en nuestra Región Puno, exista evidencias epidemiológicas de alteración a la salud ante el consumo prolongado de aguas con contenido de arsénico ya que en muchos lugares es la única fuente de agua para bebida con contenido de arsénico (As) en solución, por lo que resulta necesario realizar estudios para la remoción de estos metales pesados. En el presente trabajo de investigación a nivel de laboratorio se propone la remoción del arsénico en soluciones acuosas preparadas para tal estudio y en aguas naturales caso del Río Ayaviri recurso utilizado para la potabilización del agua para consumo para la población de la

ciudad de Ayaviri provincia de Melgar, cuyo antecedente muestra contenidos de Arsénico (As) de 0,08 mg/L, valores por encima de los LMP que es de 0,01 mg/L según los ECA 002-2008-MINAM (D.S 002 – 2002 MINAN Perú). Así mismo también se plante la remoción del arsénico (As) de aguas residuales minero metalúrgico provenientes del centro minero de la Rinconada Ananea de la provincia de San Antonio de Putina Región Puno. Cabe indicar que las aguas residuales citadas, por el uso al que se destinó, poseen altas concentraciones de metales pesados entre ellos el arsénico (As) que posteriormente son contaminantes de las aguas de la Sub Cuenca del río Azángaro, afluente de la Cuenca del río Ramis, que descarga sus efluentes de aguas al Lago Titicaca.

El presente estudio plantea la remoción del arsénico (As) contenido en aguas naturales y aguas residuales minero metalúrgico, por proceso de Oxidación del arsénico con cloro, luego tratar por proceso de floculación utilizando coagulantes de cal artesanal y para proceso comparativo utilizando coagulante de cloruro férrico, para su posterior tratamiento por sedimentación y filtración en lecho de grava I. F. y lecho de viruta de hierro. El tratamiento propuesto trabajo de investigación sobre “Remoción de Arsénico en Aguas Naturales y Aguas Residuales Minero Metalúrgicos, por Procesos de Oxidación, Floculación, Sedimentación y Filtración”; se desarrollaran en reactores dimensionados y construidos a nivel de laboratorio bajo una propuesta de ingeniería, base fundamental para la evaluación de los parámetros fisicoquímicos del agua y del arsénico en el agua antes y después del proceso de tratamiento, cuyas experiencias y evaluaciones se desarrollaran en el laboratorio de tecnología de aguas de la facultad de Ingeniería Química de La Universidad Nacional del Altiplano Puno.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1.1. Descripción del problema

Los metales pesados presentes en aguas residuales, son sustancias tóxicas capaces de causar graves daños en los seres vivos. Una de las principales propiedades de los metales pesados es que no son biodegradables y permanecen mucho tiempo en el entorno, acumulándose en el organismo de los seres vivos, por lo que es necesario evitar su incorporación al entorno a través de vertidos contaminados.

El agua natural puede proceder de diferentes fuentes de origen, estas tendrán diferentes cantidades de componentes de impurezas contaminantes que tienen influencia en el uso que se destine de acuerdo a la necesidad del hombre. Uno de los problemas en las aguas naturales y residuales en los efluentes industriales, mineros, urbanos, etc. es el contenido de metales pesados ionizados, con valores altos de concentración exigidos por la legislación nacional e internacional sobre la conservación del medio ambiente. Dentro de los metales pesados contaminantes del agua es el Arsénico; metal pesado que pone en riesgo la salud del ser humano ya que se acumula en el organismo por exposición crónica y consumo en el agua y puede causar afecciones como alteraciones de la piel, efectos secundarios en el sistema nervioso, irritación de los órganos del aparato respiratorio, gastrointestinal y hematopoyético, acumulación en los huesos musculo y piel, y en menor grado en el hígado y riñones (Rivera y Avila, 1998).

El arsénico (As) comúnmente como contaminante natural o antropogénicas se encuentra en aguas naturales y residuales con valores de concentraciones por encima de los estándares nacionales y existe la necesidad de reducir las concentraciones del Arsénico a niveles permisibles según normas nacionales del Perú, Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua, D.S. Nro.004-2017 MINAM. Límites máximos

permisibles (LMP) del agua para consumo humano y agua superficial para recreación para el arsénico es de 0.01 mg/L y Límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de Actividad Minero – Metalúrgicas DS.010-2010- MINAM. Se tiene para el Arsénico  $As = 0.08 \text{ mg/L}$  (El Peruano del Perú, 2010).

Existen diversas técnicas de remoción del arsénico (As) del agua y podemos mencionar los métodos de Coagulación/ Filtración, Oxidación/ Filtración, Adsorción sobre medios específicos como el Hidróxido de Hierro, Intercambio iónico, Separación por membranas.

### **1.1.2. Delimitación del problema**

Por tal razón, se propone investigar en qué medida se reduce la concentración de Arsénico en soluciones Acuosa y Aguas Naturales, en base a las siguientes interrogantes:

### **1.1.3. Problema general**

¿En qué medida se reducirá la concentración de Arsénico en aguas Naturales por Oxidación, Floculación, Sedimentación y Filtración; hasta llegar a límites máximos permisibles (LMP) según Normas Nacionales de Calidad Ambiental del agua?

A partir de este problema nos formulamos las siguientes preguntas:

### **1.1.4. Problema específico**

- ¿Cómo influyen el Cloro en la oxidación para la remoción de Arsénico en Aguas Naturales de río del distrito de Ayaviri?
- ¿Cómo influyen la floculación con cal Artesanal en forma de Hidróxido de calcio (lecha de cal) para la remoción de Arsénico en Aguas Naturales de río del distrito de Ayaviri?

- ¿Cómo influye, la Sedimentación y filtración en lecho de graba y virutas de hierro para la remoción de Arsénico en Aguas Naturales de río del distrito de Ayaviri?

## 1.2. ANTECEDENTES

Nidheesh y Singh (2017) el artículo analiza el rendimiento del proceso de la CE para la eliminación de arsénico. La electrocoagulación usando varios ánodos de metal de sacrificio como aluminio, hierro, magnesio, etc. efectivo para la descontaminación de arsénico. Hizo un enfoque especial en el mecanismo detrás de la remoción de arsenito y arseniato por el proceso de la CE. También incluyo las principales tendencias en los métodos de eliminación de lodo que contiene arsénico. También informo la comparación de las eficiencias de descontaminación con arsénico de la coagulación química y la CE.

Ahoranta, Kokko, Papirio, Özkaya y Puhakka (2016) el tratamiento de la solución ácida que contiene 5 g / L de Fe (II) y 10 mg / L de As (III) lo estudió en un sistema que consiste en un reactor biológico de lecho fluidizado (FBR) para la oxidación de hierro y un sedimentador por gravedad para la precipitación de hierro y la separación de los precipitados férricos. Con un pH de 3.0 y un tiempo de retención de FBR de 5.7. h, precipitó 96-98% del Fe (II) añadido (99.1% de los cuales fue jarosita). Las tasas más altas de oxidación y precipitación de hierro fueron 1070 y 28. mg / L / h, respectivamente, y se lograron a pH 3.0. Posteriormente, se examinó el efecto del pH sobre la eliminación de arsénico mediante sorción y / o coprecipitación disminuyendo gradualmente el pH de la solución de 3,0 a 1,6 (pH de alimentación). Con un pH de 3.0, 2.4 y 1.6, las eficiencias de eliminación de arsénico más altas obtenidas fueron 99.5%, 80.1% y 7.1%, respectivamente. Como el sistema tenía precipitados férricos en exceso, era probable que la disminución de la eliminación de arsénico se debiera a la coprecipitación reducida a pH. <. 2.4. Como (III) fue parcialmente oxidado a As (V) en el sistema. En los

experimentos con matraz de agitación, As (V) se absorbe en jarosita mejor que As (III). Además, la capacidad de sorción de la jarosita biogénica fue significativamente mayor que la de la jarosita sintética. El bioproceso desarrollado elimina de manera simultánea y eficiente el hierro y el arsénico de las soluciones ácidas, lo que indica potencial para el tratamiento de aguas residuales de minería.

Kundu, Gupta, Mol, Rahman y Van (2018) el artículo evalúa si estos primeros experimentos de campo con SAR se pueden conceptualizar, y en qué medida, como "experimentos socio-técnicos" diseñados para incubar y mejorar innovaciones tecnológicas radicales sirviendo como "ventana viviente", "ventana" y / o "agente de cambio". . Mediante el estudio de dos experimentos SAR, este artículo encuentra que esta novedosa tecnología sirvió como laboratorio y ventana viviente, pero no (todavía) como agente de cambio, en parte porque integra consideraciones sociales (como la aceptación de la comunidad, la selección apropiada del sitio y el post- soporte de instalación) en el diseño del prototipo SAR durante la experimentación de campo resultó ser muy difícil. Un obstáculo clave fue que la eficacia técnica de la tecnología siguió siendo una preocupación principal durante la experimentación, y no era seguro hacer que el agua derivada de unidades SAR experimentales estuviera disponible para los usuarios. Por lo tanto, la tecnología sigue siendo una idea abstracta y no puede estimular los cambios de comportamiento entre los usuarios. Llegaron a la conclusión de que es necesario identificar las condiciones en las que los experimentos en el mundo real pueden servir como agentes de cambio para facilitar la adopción sostenible de tecnologías seguras para el arsénico en contextos de países rurales en desarrollo.

Mohora *et al.* (2018) en este estudio, se llevaron a cabo experimentos a escala de laboratorio con el reactor EC horizontal de flujo continuo como una tecnología independiente con capacidad de 300 L / día con electrodos bipolares de placas de hierro

(Fe) para evaluar su eficacia en la eliminación de arsénico del agua subterránea sin tratamiento modificación del pH pre y post tratamiento del agua subterránea. Las condiciones óptimas de operación del reactor EC se determinaron como densidad de corriente de 1.98 A / m<sup>2</sup>, carga de carga de 54 C / L, caudal de 12 L / h. El reactor de la CE fue capaz de eliminar el 96% del arsénico del agua subterránea bruta y cumplió con el valor de referencia de 10 µg As / L de la Organización Mundial de la Salud (OMS) dentro de las 4 h corridas experimentales. El cambio de polaridad del electrodo de Fe a los 30 min controló exitosamente la pasivación de los electrodos de Fe y permitió un funcionamiento estable del reactor con la alta eficiencia de eliminación de As. La concentración de Fe residual en aguas subterráneas tratadas estaba en el rango  $0.17 \pm 0.07$  mg / L y cumplía con el valor de referencia de la OMS para el agua potable. El costo operativo preliminar estimado en las condiciones óptimas de operación fue de 0.0135 € / m<sup>3</sup>.

Banerji y Chaudhari (2016) la electrocoagulación con electrodos de hierro (ECFe) es una tecnología prometedora para la eliminación de arsénico. La eficiencia de eliminación de arsénico por ECFe puede verse afectada por parámetros tales como pH, intensidad de corriente, concentración inicial de arsénico e iones concurrentes como fosfato, silicato, materia orgánica natural (NOM), bicarbonato, sulfato, nitrato y cloruro, pero la acción causal es no bien entendido, Por lo tanto, los experimentos fueron diseñados y llevados a cabo para observar estos efectos y obtener una mejor comprensión de ECFe. Los resultados indican que la oxidación de Fe (II) generada durante el ECFe es esencial para una alta eficacia (con respecto a la dosis de hierro) de la eliminación de arsénico. Se encontró que las intensidades de corriente más baja y pH7 eran más eficientes para la eliminación de arsénico por unidad de peso de hierro disuelto. Las observaciones indican que el arsénico reacciona con los óxidos férricos (hidr) y los complejos de fosfato

con Fe (II). Con el tiempo, estos complejos y precipitados se reordenan para dar una afinidad mucho mayor de óxidos de hierro (hidr) por fosfato. El silicato, hasta 20 mg / L, tuvo un efecto insignificante, pero a 30 mg / L se observó que reduce la eliminación de arsénico por ECFe. El aumento de las concentraciones de NOM también redujo la eliminación de arsénico, pero el bicarbonato, el sulfato, el nitrato y el cloruro no tuvieron ningún efecto sobre la eliminación de arsénico por el ECFe. La presencia de óxidos férricos (hidr) viejos en el reactor condujo a un menor requerimiento de Fe (II) para lograr una concentración inferior a 10 ppb, ya que promovía las reacciones interfaciales. La formación de  $\text{FeAsO}_4$  se observó por análisis FTIR de los precipitados.

Saldaña-Robles *et al.* (2018) presento un estudio experimental complementado con predicciones numéricas de la adsorción de arsénico (As (V)) en minicolumnas usando hidróxido férrico granular (GFH) como adsorbente. El trabajo se centra en los efectos de la presencia de materia orgánica, es decir, ácidos húmicos (HA) y fúlvicos (FA), en un flujo de agua contaminado con As (V). Los tratamientos contienen la misma concentración de materia orgánica, la misma concentración inicial de As (V) de 0.8 mg L<sup>-1</sup>, y la misma cantidad de GFH de 2 g para los filtros. Los resultados muestran que las muestras que contienen materia orgánica (HA y FA) muestran una menor capacidad de adsorción, un menor volumen de penetración, un pH más bajo y una saturación no uniforme del filtro de GFH. Los resultados sugieren la necesidad de incluir los efectos de la materia orgánica en todos los análisis posteriores de eliminación de arsénico del agua porque la materia orgánica siempre está presente en escenarios de la vida real. Además, este trabajo proporciona información útil para resolver la problemática de la presencia de altas concentraciones de As (V) (más de 50  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) en los mantos acuáticos de la región del Bajío en México.

Zhu, Qiao, Ye y Yan (2018) realizaron experimentos de adsorción por lotes para investigar la capacidad de adsorción del óxido de aluminio impregnado con bismuto (BiAl). La aplicación continua de la eliminación de As (III) se logró a través de un reactor de columna a escala de laboratorio. La impregnación de bismuto disminuyó el área de superficie específica del óxido de aluminio y afectó la distribución del tamaño de poro. Sin embargo, debido a su carácter mesoporoso abundante y bien proporcionado, también mejoró su capacidad de adsorción a través de la complejación superficial de As (III). Los experimentos de adsorción por lotes demostraron un modelo de Freundlich adecuado y un modelo de pseudo-segunda cinética adaptada para la adsorción de As (III). El mecanismo principal fue la quimisorción con átomos de bismuto y aluminio; sin embargo, la fisisorción también contribuyó a la adsorción de arsénico en la etapa inicial de la reacción. El modelo de Adams-Bohart describió mejor las curvas de avance que el modelo de Thomas. BiAl exhibió una eficiente absorción de As (III) en un amplio rango de pH y podría aplicarse a la eliminación de As (III) del agua residual. Se obtuvo una alta eficacia de eliminación de As (III) (91,6%) a una concentración inicial de As (III) de 5 mg L<sup>-1</sup> en un caudal de 1 ml min<sup>-1</sup>. Este estudio indica el potencial para la aplicación práctica de BiAl en la eliminación de As (III).

Luong *et al.* (2018) a diferencia de la mayoría de otras tecnologías de remediación As, la inmovilización subsuperficial in situ ofrece la ventaja de una producción de desechos insignificante y, por lo tanto, tiene el potencial de ser una opción de tratamiento sostenible. Este artículo revisa la aplicación de las tecnologías de remoción de arsénico subsuperficial (SAR), así como los enfoques de modelado actuales. A diferencia de la extracción subsuperficial de hierro (SIR), que ha demostrado ser técnicamente factible en una variedad de entornos hidrogeoquímicos durante muchos años, SAR aún no es una solución establecida ya que muestra vulnerabilidad a diversas condiciones geoquímicas

como el pH, la relación Fe: As y la presencia de co-iones. En algunas situaciones, esto dificulta el cumplimiento del estricto valor de referencia para el agua potable recomendado por la OMS ( $10 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Para superar sus limitaciones, se necesitan más estudios teóricos y experimentales para mostrar los logros de la aplicación a largo plazo y ayudar al desarrollo de los procesos de SAR en la tecnología de punta.

Franco y Carro (2014) en el estudio de Remoción de Arsénico (As) en Agua Mediante Procesos de Coagulación – Floculación. En el proceso de remoción del arsénico (As), realizaron una previa oxidación del agua con hipoclorito de sodio con una concentración de  $2,2 \text{ mg/L}$ , con el objetivo de buscar la interacción fluido-partícula en el nuevo estado de oxidación del (As) que implicara una mayor carga actuante en el proceso de coagulación; luego se usó coagulantes desde  $5$  a  $500 \text{ mg/L}$ , para una concentración inicial de solución acuosa de arsénico de  $0,5$  a  $5 \text{ mg/L}$ , se obtuvieron porcentajes de remoción de (As) desde cero al 95% con floculante cloruro férrico y del 80% con sulfato de aluminio.

Aguilar, Zea, Ttito *et al.* (2010) en el estudio integral de la Cuenca del Ramis, afluente del Lago Titicaca. Región Puno Perú, para su estudio han identificado áreas de estudio de tres sub cuencas de la Cuenca del Ramis: Sub cuenca Azángaro, Ayaviri, Asillo. En cada punto de muestreo se ha colectado muestras de aguas, sedimentos, algas, fibras, lana y cabello, para determinar la concentración de metales de arsénico, mercurio, cobre y plomo; aplicando protocolos y metodologías apropiadas para una mejor interpretación de los resultados.

Resultado de metales pesados, caso específico del Arsénico (As) en aguas se tiene los siguientes resultados. Se evaluó teniendo como referencia agua para consumo humano y bebida para animales en base a los límites máximo permisibles (LMP) ECA 002-2008

MINAM PERU; para el (As) el LMP es de 0,01 mg/L. En la sub cuenca de Azángaro se tiene valores por debajo de los LMP, con un ligero aumento en el punto de muestreo L-4, el que se debe por la posible actividad minera y/o pasivos mineros de la zona. En la sub cuenca de Ayaviri, en el punto de muestreo K-8 se tiene concentraciones de (As) por encima de los LMP de 0,08 mg/L. En la cuenca del Ramis en el punto de descarga del río Ayaviri al río Ramis en el punto de muestreo M-12, se tiene (As) de 0,05 mg/L, concentraciones por encima de los LMP, posiblemente debido a los aportes de la sub cuenca Ayaviri.

En el Seminario de Aguas Universidad Tecnológica Nacional-Argentina UTNA. (Rodríguez, 2008) sobre la Reducción del Arsénico en Aguas Naturales. Concluyen que la coagulación y filtración con sales de aluminio (III) y fierro (III) es un método eficiente para la remoción del arsénico, ya que las sales de aluminio y hierro se hidrolizan formando hidróxidos sobre en la que el (As) (V) se adsorbe y coprecipita, luego el agua ingresa en la columna de filtro. Es un proceso efectivo para la remoción de (As) (V) de acuerdo de ensayos en laboratorio y planta piloto y a pH de rangos muy altos y bajos, la eficiencia decae significativamente. El alumbre demostró una mayor efectividad que el sulfato férrico.

Para la remoción del (As) la planta piloto de tratamiento consiste de un estanque de ingreso del agua, coaguladores-sedimentadores y filtros primarios. Es necesario regular el pH del agua cruda para oxidar el As (III) a As (V) utilizando como oxidante cloro gaseoso. Con esta técnica se logró remocionar arsénico (As) en el agua con el floculante alumbre un 75% de (As), a pH en un rango de 5,5 a 7.

Avilés (2008) en su trabajo de investigación Remoción del Arsénico de agua mediante coagulación-floculación a nivel domiciliario. Indican que el agua con

concentraciones de 0,05 mg As/L, se remoción o mediante el proceso de coagulación-floculación a pH natural del agua empleando  $\text{CaCl}_2$  para oxidar el As (III) a As (V), y luego floculando con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y posteriormente filtrando en columna; se realizaron pruebas en un prototipo y se remoción o hasta el 93%, equivalente al 0,049 mg/L de arsénico.

Franco y Carro (2014) en el estudio de Remoción de Arsénico (As) en Agua Mediante Procesos de Coagulación – Floculación. En el proceso de remoción del arsénico (As), realizaron una previa oxidación del agua con hipoclorito de sodio con una concentración de 2,2 mg/L, con el objetivo de buscar la interacción fluido-partícula en el nuevo estado de oxidación del (As) que implicara una mayor carga actuante en el proceso de coagulación; luego se usó coagulantes desde 5 a 500 mg/L, para una concentración inicial de solución acuosa de arsénico de 0,5 a 5 mg/L, se obtuvieron porcentajes de remoción de (As) desde cero al 95% con floculante cloruro férrico y del 80% con sulfato de aluminio.

Aguilar, Zea, Ttito, *et al.* (2010) en el estudio integral de la Cuenca del Ramis, afluente del Lago Titicaca. Región Puno Perú, para su estudio han identificado áreas de estudio de tres sub cuencas de la Cuenca del Ramis: Sub cuenca Azángaro, Ayaviri, Asillo. En cada punto de muestreo se ha colectado muestras de aguas, sedimentos, algas, fibras, lana y cabello, para determinar la concentración de metales de arsénico, mercurio, cobre y plomo; aplicando protocolos y metodologías apropiadas para una mejor interpretación de los resultados.

Resultado de metales pesados, caso específico del Arsénico (As) en aguas se tiene los siguientes resultados. Se evaluó teniendo como referencia agua para consumo humano y bebida para animales en base a los límites máximo permisibles (LMP) ECA 002-2008

MINAM PERU; para el (As) el LMP es de 0,01 mg/L. En la sub cuenca de Azángaro se tiene valores por debajo de los LMP, con un ligero aumento en el punto de muestreo L-4, el que se debe por la posible actividad minera y/o pasivos mineros de la zona. En la sub cuenca de Ayaviri, en el punto de muestreo K-8 se tiene concentraciones de (As) por encima de los LMP de 0,08 mg/L. En la cuenca del Ramis en el punto de descarga del río Ayaviri al río Ramis en el punto de muestreo M-12, se tiene (As) de 0,05 mg/L, concentraciones por encima de los LMP, posiblemente debido a los aportes de la sub cuenca Ayaviri.

En El Seminario de Aguas Universidad Tecnológica Nacional-Argentina UTNA. (Rodríguez, 2008). Sobre la Reducción del Arsénico en Aguas Naturales. Concluyen que la coagulación y filtración con sales de aluminio (III) y fierro (III) es un método eficiente para la remoción del arsénico, ya que las sales de aluminio y hierro se hidrolizan formando hidróxidos sobre en la que el (As) (V) se adsorbe y coprecipita, luego el agua ingresa en la columna de filtro. Es un proceso efectivo para la remoción de (As) (V) de acuerdo de ensayos en laboratorio y planta piloto y a pH de rangos muy altos y bajos, la eficiencia decae significativamente. El alumbre demostró una mayor efectividad que el sulfato férrico.

Para la remoción del (As) la planta piloto de tratamiento consiste de un estanque de ingreso del agua, coaguladores-sedimentadores y filtros primarios. Es necesario regular el pH del agua cruda para oxidar el As (III) a As (V) utilizando como oxidante cloro gaseoso. Con esta técnica se logró remover arsénico (As) en el agua con el floculante alumbre un 75% de (As), a pH en un rango de 5,5 a 7.

Avilés (2008) en su trabajo de investigación Remoción del Arsénico de agua mediante coagulación-floculación a nivel domiciliario. Indican que el agua con

concentraciones de 0,05 mg As/L, se remoción o mediante el proceso de coagulación-floculación a pH natural del agua empleando  $\text{CaCl}_2$  para oxidar el As (III) a As (V), y luego floculando con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y posteriormente filtrando en columna; se realizaron pruebas en un prototipo y se remoción o hasta el 93%, equivalente al 0,049 mg/L de arsénico.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo general

Evaluar la remoción de Arsénico (As) contenido en aguas naturales utilizando procesos de Oxidación, Floculación, Sedimentación y Filtración y comparar a los límites permisibles según Normas Nacionales de Calidad Ambiental del agua.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar el rendimiento de la remoción de Arsénico en Aguas Naturales del río Ayaviri en coordenadas UTM  $x = 314682.62\text{m}$  y  $y = 8362441.88\text{m}$  por procesos de oxidación con Cloruro férrico; floculación – sedimentación utilizando cal Artesanal y filtración en lecho de graba I.F.
- Evaluar según Normas Nacionales D.S. N° 004-2017 MINAM, de Calidad Ambiental del Agua; el nivel de remoción de Arsénico (As), contenido en aguas naturales del río Ayaviri, por proceso de oxidación con Cloro utilizando cloruro férrico; floculación y sedimentación utilizando Cal artesanal y filtración en lecho de graba I.F.

#### 1.4. JUSTIFICACION

La ciencia y la tecnología del tratamiento y el uso del agua comprenden la aplicación de principios químicos, físicos y biológicos asociados con técnicas de ingeniería para procesos de su tratamiento y abastecimiento de prioridad para consumo humano y para usos en el medios antropogénicos y natural; según normas de calidad ambiental del agua exigidos por la legislación nacional.

Las innovaciones tecnológicas en el tratamiento de aguas naturales y residuales cada vez son más exigentes en su control durante su aprovechamiento y evacuación, razón por lo que el diseño de diferentes modelos de reactores para el tratamiento de estas aguas debe ser experimentados y evaluados a nivel de laboratorio buscando la optimización y el cambio de métodos convencionales por otros métodos de diseño de mejor rendimiento para el proceso de tratamiento de aguas.

Uno de los problemas en las aguas naturales, es el contenido de metales pesados ionizados, con concentraciones por encima de los valores máximos permisibles exigidos por la legislación nacional e internacional sobre la conservación del medio ambiente. Dentro de los metales pesados contaminantes del agua el Arsénico (As) es el metal pesado que pone en riesgo la salud del ser humano ya que se acumula en el organismo por exposición crónica y por consumo en el agua, problema que puede causar afecciones al ser viviente que las consume.

El presente trabajo de investigación busca contribuir a la solución de problemas de mitigar la contaminación del agua por el metal pesado Arsénico (As), procedentes de centros de abastecimiento de agua natural, para el cual se propone desarrollar la Investigación Tecnológico de Remoción de Arsénico de aguas naturales por procesos de Oxidación, Floculación, Sedimentación (utilizando reactivo oxidante cloruro Férrico ,(

floculantes Cal artesanal) y Filtración en lecho de graba I.F. sistema adecuado para el tratamiento de aguas naturales, que permitan cumplir con las normas de estándares nacionales de calidad ambiental del agua de los LMP DS. N°004-2017-MINAM-Perú.

### **Utilidad técnica**

El proceso de floculación - sedimentación y filtración utilizando floculante cal artesanal (CaO); propone desarrollar un proceso adecuado para la remoción del metal pesado arsénico (As), en el tratamiento secundario de aguas de captación natural, que a su vez cumplan con las normas permisibles de emisiones del contenido del metal pesado arsénico (As), de acuerdo con las normas de estándares nacionales de calidad ambiental del agua, ECA-LMP DS. N°004-2017-MINAM. Perú

Este proceso propone utilizar el material Cal artesanal en forma de lechada de cal (De disponibilidad en nuestro medio geográfico) procesándola como material floculante para remover el arsénico (As), de aguas naturales, considerando que es necesario la adaptación de tecnologías de acuerdo a nuestros recursos naturales disponibles y necesidades en nuestro medio, utilizando el método de tratamiento de aguas por el proceso de oxidación, floculación - sedimentación y filtración.

### **Utilidad económica**

Las técnicas convencionales para la remoción de metales pesados de soluciones acuosas, como la precipitación, intercambio iónico con resinas y técnicas electrolíticas, son de alto costo.

La floculación con material inorgánico Cal (CaO) no es un método ampliamente utilizado para remoción final de metales pesados de concentraciones bajas, de esta surge el aprovechamiento del recurso cal procesado de piedras calcáreas, recurso natural de

gran existencia en nuestro medio y de esta forma darle un valor agregado al recurso cal artesanal de costos relativamente bajos y de gran disponibilidad en nuestro medio; estas razones expuestas propone que la cal procesada en nuestro medio constituya una tecnología alterna para la remoción de arsénico (As), de aguas naturales a bajos costos económicos.

### **Utilidad ambiental**

Existe gran demanda internacional y creciente de material de remoción de metales pesados de soluciones acuosas asociados a su uso en la solución de problemas ambientales, lo que viene dando lugar a investigaciones para el empleo de diversos materiales naturales procesados para remoción de metales pesados.

Por otro lado, la investigación, contribuirá a mitigar los impactos ambientales en la contaminación con metales pesados en aguas naturales y aguas residuales de mina. El proceso de floculación sedimentación y filtración, es una tecnología limpia que utiliza materiales naturales inorgánicos para remoción de metales pesados caso del Arsénico (As), en aguas naturales.

### **Utilidad social**

La investigación contribuirá socialmente, porque teniendo la tecnología para remoción de arsénico del agua natural para su uso posterior como agua para consumo humano favorecerá a la disminución de la posible generación de enfermedades que pueden afectar a la población humana, animal y vegetal, debido al uso y consumo de aguas con bajo contenido de Arsénico (As).

## 1.5. HIPOTESIS

### 1.5.1. Hipótesis general

La remoción de Arsénico (As) contenido en aguas naturales utilizando procesos de Oxidación, Floculación, Sedimentación y Filtración; tiene rendimiento adecuado a los límites permisibles según Normas Nacionales de Calidad Ambiental del agua.

### 1.5.2. Hipótesis específicos

- Son adecuados los rendimientos de la remoción de Arsénico en Aguas Naturales de río Ayaviri, por procesos de oxidación con Cloruro férrico; floculación – sedimentación utilizando cal Artesanal y filtración en lecho de graba I.F. y con virutas de hierro.
- Según Normas Nacionales ECA DS. N°004-2017 MINAM, de Calidad Ambiental del Agua; el nivel de remoción de Arsénico (As), contenido en aguas naturales del río Ayaviri, son adecuados cuantitativamente en sus concentraciones; por procesos de oxidación con cloruro férrico; floculación y sedimentación utilizando Cal artesanal (lechada de cal) y filtración en lecho de graba I.F.

### 1.5.3. Operacionalización de variables

#### VARIABLES

Para probar las hipótesis planteadas, se identifican las variables de:

Variable Independiente (causa) (Vi):

Contenido de Arsénico en Aguas Naturales

Variable Dependiente (efecto) (Vd.):

Procesos de Oxidación, floculación - sedimentación y filtración.

**Tabla 1:** Operacionalización de variables.

VARIABLE	INDICADOR	INDICES	VALORACIÓN
(Vi) Contenido de Arsénico en Aguas Naturales	1.1. Concentración de arsénico en aguas naturales.	1.1.1. Límites Máximos Permisibles según ECA 002-2008 MINAM 1.2.1. Natural 1.2.2. Antropogenico	1.1.1. : 0.01(mg/L) 1.2.1. (mg/L) 1.2.2. (mg/L)
(Vd.) Procesos de Oxidación, floculación - sedimentación y filtración	1.2. Origen del Arsénico en el Agua 2.1. Oxidación con Cloruro férrico. 2.2. Floculación – sedimentación, utilizando cal Artesanal en forma de Hidróxido de calcio (lecha de cal). 2.3. Filtración en lecho de graba I.F.	2.1.1. Concentración (Fe Cl <sub>3</sub> ). 2.2.1. Concentración Ca(OH) <sub>2</sub> 2.2.3. Concentración En Columnas de graba I.F	2.1.1. (mg/L) 2.2.2. (mg/L) 2.3.1. Alturas de Graba (cm).
VARIABLES INTERVINIENTES	3.1. pH 1.2. Temperatura- Presión 1.3. Tiempo de residencia en los reactores.	3.1.1. Acido o Básico 3.2.1. °C – Atm. 1.3.1. Reactores de: Oxidación, Floculación, Sedimentación, Filtración.	3.1.1. 0.00 a 14. 3.2.1. (T °C) (Atm.) Ambiental 3.3.1. (Minutos)

FUENTE: Elaboración propia.

#### 1.5.4. Utilidades de los resultados del estudio

El trabajo de Investigación, contribuirá a:

- a. Mitigar los impactos de contaminación ambiental del arsénico contenido en las aguas naturales del río Ayaviri utilizando métodos de remoción de Arsénico (As) por procesos de Oxidación, Floculación, Sedimentación y Filtración.
- b. Aplicar el sistema de procesos de oxidación con Cloro utilizando cloruro férrico; floculación y sedimentación utilizando Cal artesanal (Lechada de cal) y filtración en lecho de graba I.F. y viruta de Hierro, para la degradación del arsénico y ser apto para el consumo humano según Normas Nacionales de los ECA 002-2008 MINAM, de Calidad Ambiental del agua.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. MARCO TEORICO

#### 2.1.1. Arsénico (AS)

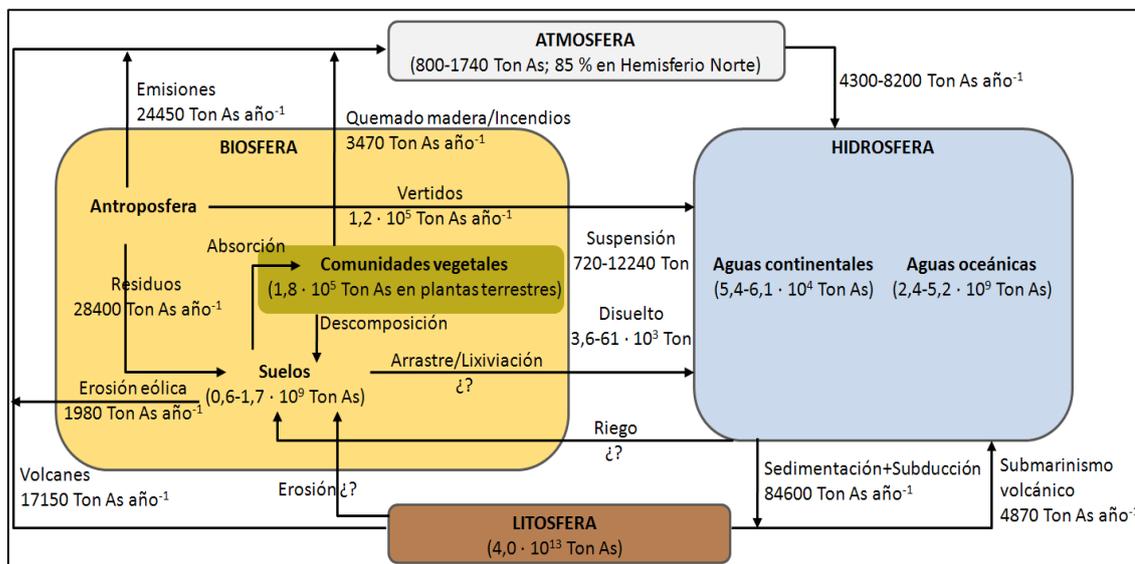
El arsénico es un elemento perteneciente al grupo V-A de la tabla periódica, de número atómico 33 y peso atómico 74,92 (Figura 1). Se presenta en estado sólido principalmente en forma de sulfuros. Por su posición en dicho grupo, muestra propiedades intermedias entre los metales y los no metales (metaloide), aunque por su electronegatividad y energía de ionización predominan las características de no metal y forma más fácilmente aniones que cationes. Por su posición en la tabla periódica, este elemento presenta un comportamiento químico similar al del fósforo, hecho que conlleva múltiples implicaciones tanto a nivel edáfico como sobre la toxicidad del arsénico para las plantas (Albores, Quintanilla, Razo y Cebrián, 1997).

El arsénico se suele unir covalentemente con la mayoría de metales y no metales y puede formar parte de moléculas orgánicas estables. Los estados de oxidación del As más comunes son -3, 0, +3 y +5, las arsinas y las metilarsinas se corresponden con el estado de oxidación -3 y son inestables en condiciones oxidantes. El arsénico elemental se forma por la reducción de los óxidos de arsénico. El arsénico con número de oxidación +3, que se produce en las actividades de fundición, puede ser oxidado catalíticamente o por bacterias a pentaóxido de arsénico,  $As_5O_{10}$  o a ácido ortoarsénico,  $H_3AsO_4$ . (Baran, 1995)

#### a) Arsénico en el Ambiente

El arsénico es un elemento ampliamente distribuido en el ambiente. Suele ser detectable en casi todos sus compartimentos y generalmente aparece en la litosfera en

concentraciones entre 1,5 y 2 ppm, ocupando el puesto 52 en abundancia (Adriano, 2001). Forma parte de más de 245 minerales en forma de arseniatos (60%), sulfuros y sulfosales (20%) y otras formas como arseniuros, arsenitos, óxidos y silicatos (20%) (Mandar y Suzuki, 2002). Los mayores depósitos de As de la corteza terrestre se encuentran en forma de pirita, galena, calcopirita, y esfalerita. Existen altas concentraciones en depósitos de azufre como por ejemplo  $As_2S_3$ ,  $AsS$ ,  $FeAsS$ ,  $FeAs_2$ , razón por la que la arsenopirita ha sido utilizada para la obtención de arsénico a lo largo de la historia, al ser el mineral de As más abundante en la naturaleza (Smedley y Kinniburgh, 2002). La Figura 1 esquematiza el ciclo del As en el medio ambiente.



**Figura 1:** Esquematación del ciclo del arsénico en el medio ambiente.

FUENTE: Smedley and Kinniburgh, 2002.

Esquema general del ciclo biogeoquímico del As en la geosfera: flujos y principales reservorios. Modificado de (Matschullat, 2000).

El arsénico inorgánico está presente en suelo, agua, aire y alimentos, de forma que el ser humano se encuentra continuamente expuesto a este contaminante (Mandal y Suzuki, 2002). Aunque existen técnicas que permiten una determinación semi cuantitativa de As en muestras sólidas, el arsénico en muestras ambientales sólidas (como por ejemplo

suelos y plantas) suele medirse en un extracto después de realizar una extracción fuerte, frecuentemente con un ácido y en condiciones oxidantes a altas presiones y temperaturas. El intervalo de arsénico en el suelo varía de 0,2 a 40 g kg<sup>-1</sup> y en el aire de las zonas urbanas la concentración es aproximadamente de 0,02 Qg m<sup>-3</sup> de aire. La exposición vía consumo de agua es la mayoritaria a escala global. En aguas continentales la concentración suele estar por debajo de 1 Qg L<sup>-1</sup>

Smedley y Kinniburgh (2002) mientras en el agua marina la media de la concentración de As está en torno a 1,5 Q.g L<sup>-1</sup> (Zwiener y Frimmel, 2004). La mayor exposición al arsénico es debida al agua superficial contaminada de origen antropogénicas o geológico. Se estima que unos treinta millones de personas están expuestas a agua contaminada con arsénico, y un cuarto de estos presentan síntomas derivados de una exposición aguda en al menos cinco países del sureste asiático: Bangladesh, India, Nepal, Tailandia y Myanmar (Caussy, Gochfeld, Gurzau, Neagu y Ruedel, 2003). La Organización Mundial de la Salud recomienda un nivel máximo de arsénico de 10 µg L<sup>-1</sup> en agua (Bissen y Frimmel, 2003) y, sin embargo, la concentración de arsénico en aguas superficiales excede de 2000 µg L<sup>-1</sup> en determinadas áreas de Bangladesh y de la India (Tripathi *et al.*, 2007). Tanto el suelo como el agua de un emplazamiento son una de las principales vías de exposición a arsénico para los seres vivos, ya sea por ingesta principalmente para niños (Rodriguez, Basta, Casteel, Armstrong y Ward, 2003), inhalación o contacto dérmico (DEFRA, 2002).

#### **b) Fuentes naturales de arsénico (fondo geoquímico)**

Las fuentes de origen natural engloban aquellas que implican el aporte sin intervención humana significativa. Incluso antes de que las actividades humanas tuvieran efectos sobre los ciclos de los elementos, el arsénico estaba presente en la corteza

terrestre, suelos, sedimentos, aguas, aire y organismos. Por regla general estas fuentes dependen íntimamente de la geoquímica de un emplazamiento (de su litología principalmente y de las vías de dispersión). El fondo geoquímico de una sustancia sería la concentración de la misma en un emplazamiento determinado atendiendo solamente a las fuentes naturales

La concentración de As en suelos suele estar por debajo de 40 ppm y el fondo geoquímico depende de las distintas litologías, cuya concentración de arsénico varía de una a otra.

### c) **Fuentes antropogénicas de arsénico**

La producción mundial de arsénico se estima entre 75 y 100 W 103 toneladas anuales (Adriano, 2001). Las principales actividades humanas fuentes de As son la minería, la siderurgia, la agricultura, la silvicultura, las plantas de tratamiento de combustibles fósiles, los desechos urbanos y la ganadería (Koellensperger *et al.*, 2002). En los procesos de minería y siderurgia el arsénico se presenta frecuentemente como un subproducto con poco mercado, lo que ocasiona que se convierta en residuo. Se presentan concentraciones elevadas de As en las cercanías de los escombros mineros (hasta 3% As), que decrece rápidamente con la distancia a dichos escombros (Zhang y Selim, 2008). La formulación de numerosos plaguicidas, fungicidas y biocidas utilizados para controlar enfermedades en cultivos tanto agrícolas como forestales solían contener As (Lepp, 1981). A su vez, algunos fertilizantes pueden suponer un aporte de arsénico al suelo (Matschullat, 2000). Los residuos Urbanos que derivan en la obtención de lodos de depuradora y compost, que son usados ocasionalmente como enmiendas orgánicas de suelos, pueden contener arsénico en cantidades variables. Por último, los combustibles fósiles contienen también concentraciones de arsénico que pueden provocar a largo plazo

un enriquecimiento en la zona afectada por los gases originados en la combustión. Todo ello provoca una liberación del elemento al ambiente y puede enriquecer los suelos en As.

**d) Arsénico y efectos a la Salud**

Por medio de numerosos estudios se sabe que una exposición a largo plazo causa lesiones características en la piel, incluyendo modificaciones en la pigmentación, principalmente en el tronco y las extremidades, queratosis en las palmas de las manos y plantas de los pies, hiperqueratosis, hiperpigmentación y cáncer a la piel (Shannon y Strayer, 1989). La hiperpigmentación ha sido descrita como manchas decoloradas en forma de gotas de lluvia, manchas difusas color marrón oscuro o como el oscurecimiento generalizado de la piel en los miembros y el tronco. Poblaciones expuestas al arsénico muestran esas lesiones en la piel, siendo éstas una manifestación tardía de su toxicidad. La prevalencia de estas lesiones cutáneas no cancerosas ha sido relatada en más del 80% de las poblaciones estudiadas (Meek y Hughes, 1992). La ingestión de agua con arsénico puede llevar a un incremento de abortos espontáneos y de recién nacidos muertos. Una exposición prolongada a concentraciones de arsénico inorgánico dentro del valor sugerido por la OMS en el agua de bebida puede causar efectos cardiovasculares, incluyendo arritmias, hipertensión, isquemia cardíaca y cerebral, diabetes mellitus y alteraciones arteriales periféricas como la enfermedad del “pie negro” que resulta en gangrena. Los estudios sobre el potencial neurotóxico y desarrollo de efectos reproductivos adversos asociados con la ingestión de arsénico en el agua de bebida son inconclusivos (Buchet y Lison, 2000). Efectos cardiovasculares adversos tales como: infarto del miocardio y problemas arteriales, han sido observados en la población de niños en Chile, que consumen agua con un contenido de arsénico en el agua de bebida superior a 600 µg/L. Sin embargo estos efectos no han sido observados en estudios de poblaciones expuestas

concentraciones de arsénico similares en otras partes del mundo (Meek y Hughes, 1992). En Taiwán fue observada una relación entre la exposición a arsénico y la prevalencia de cáncer en la piel como también una relación entre la concentración de arsénico en el agua y la enfermedad denominada “pie negro” (Tseng, 1977). Sin embargo, ha sido sugerido que otros compuestos presentes en el agua sean los responsables de esta enfermedad (Buchet y Lison, 2000).

Por algún tiempo se pensó que una población indígena del norte de Chile que ha bebido agua con concentraciones de arsénico entre 750-800  $\mu\text{g/L}$  y con nutrición adecuada, tenía una bio transformación diferente del arsénico, que la hacía menos susceptibles a desarrollar enfermedades, cuando comparada con poblaciones en otras partes del mundo como Taiwán y la India. Un grupo de investigadores llevó a cabo un estudio en este pueblo indígena de Chile y encontraron lesiones cutáneas en los hombres y niños de la población estudiada. Esta prevalencia fue similar a lo relatado, con la correspondiente concentración de arsénico en agua de bebida, en las poblaciones de la India y Taiwán, donde existe mala nutrición, que era el factor que las hace diferente de este pueblo de indígenas atacameños (Smith *et al.*, 2000). También fueron encontrados algunos casos de cáncer en la vejiga y en el pulmón, y la presencia de micro núcleos en células de la vejiga lo cual proporciona la evidencia de que existe daño genético inducido por el consumo de agua con concentraciones de arsénico tan altas como 700  $\mu\text{g/L}$ . Por otra parte, el análisis de los productos de la bio transformación de los compuestos arsenicales en muestras de orina de esta población de indígenas mostró un patrón similar al encontrado en otras poblaciones estudiadas, lo que sugiere que el proceso de bio transformación no sería diferente del conocido hasta ahora (Smith *et al.*, 1998). En este estudio, sin embargo, no es considerado cuál es el aporte del arsénico que se tiene por el consumo de vegetales, granos, frutas y carne que son la principal fuente de alimentación

de los pueblos atacameños en el norte de Chile. En otro estudio realizado en dos pueblos indígenas, en Chile, fue encontrado un contenido de arsénico de 1 850  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en maíz en el pueblo de Socaire y 860  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en papas en el pueblo de Talabre, siendo que ambos valores sobrepasan el patrón nacional para alimentos que es de 500  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (Queirolo *et al.*, 2000). No se tiene información concluyente sobre cuáles son las especies de arsénico presentes en esos alimentos, ni tampoco se dispone de antecedentes sobre la toxicidad de estos compuestos

### **2.1.2. Sedimentación**

Crites, Tchobanoglous y Camargo (2000) Indica que la sedimentación se usa para la remoción de arenas en unidades de pre tratamiento, de SST en sedimentadores primarios, de flóculos biológicos en sedimentadores de lodo activado y de flóculos químicos formados en el proceso de coagulación con agentes químicos. Asimismo, se usa para la concentración de sólidos en espesadores de lodos. En muchos casos, el principal propósito de la separación por gravedad es producir un efluente clarificado, pero también promover la formación de un lodo con una concentración de sólidos que pueda manejarse y tratarse fácilmente.

Con base en la concentración de partículas y la tendencia de estas a interactuar entre si, se pueden presentar cuatro clases de sedimentación: 1) Sedimentación de partículas discretas, 2) Sedimentación de partículas floculentas, 3) Sedimentación interferida o zonal, 4) Sedimentación por compresión. La sedimentación acelerada y la flotación se consideran también parte de la remoción de partículas por gravedad.

### **Teoría de la sedimentación de partículas**

La sedimentación de partículas discretas no floculentas se puede analizar por medio de las leyes clásicas de sedimentación formuladas por Newton y Stokes. La ley de

Newton, para la velocidad terminal de una partícula, se obtuvo al igualar la fuerza de gravedad y la fuerza de resistencia al movimiento, o fuerza de arrastre ejercida sobre una partícula de material en suspensión. La fuerza de gravedad, tomando en cuenta el efecto flotación, está dada por la expresión:

$$F_G = (\rho_s - \rho_w)gV_p \quad \text{Ecuación N° 1}$$

Dónde:

$F_G$  = Fuerza de gravedad

$\rho_s$  = Densidad de partícula

$\rho_w$  = Densidad del agua

$g$  = Aceleración debida a la gravedad

$V_p$  = Volumen de partícula

La fuerza de arrastre debida a la fricción es función de la velocidad de la partícula, de la densidad del fluido, del diámetro de la partícula y del coeficiente de arrastre  $C_d$  (adimensional), como se puede apreciar en la ecuación (2). (-GRITES,, 2000).

$$F_d = \frac{C_d A_p \rho_w v_p^2}{2} \quad \text{Ecuación N° 2}$$

Dónde:

$C_d$  = Coeficiente de arrastre

$v_p$  = Velocidad de partícula

$A_p$  = Área de la sección Transversal o área de la proyección de la partícula sobre el plano normal a  $v_p$

Al igualar la fuerza de gravedad a la fuerza de arrastre para partículas esféricas se obtiene la ley de Newton:

$$v_p = \sqrt{\frac{4g}{3C_d} \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) d_p} = \sqrt{\frac{4g}{3C_d} (sg_p - 1) d_p} \quad \text{Ecuación N° 3}$$

Dónde:  $v_p =$  Velocidad terminal de la partícula

$d_p =$  Diámetro de la Partícula

$sg_p =$  Gravedad específica de la partícula

El coeficiente de arrastre  $C_d$  toma diferentes valores dependiendo de si el régimen de flujo alrededor de la partícula es laminar o turbulento según número de Reynolds tiene: Laminar ( $N_R < 1$ ), y de transición ( $N_R < 1$  a 2000), y turbulento. ( $N_R > 2000$ ). El coeficiente de arrastre para partículas esféricas se puede expresar en forma aproximada por medio de la siguiente ecuación válida para valores de  $N_R = 10^4$ .

$$C_d = \frac{24}{N_R} + \frac{3}{\sqrt{N_R}} + 0.34 \quad \text{Ecuación N° 4}$$

El Número de Reynolds para partículas que sedimentan se define como:

$$N_R = \frac{\phi_p v_p d_p \rho_w}{\mu} = \frac{\phi_p v_p d_p}{\nu} \quad (2.5) \quad \text{Ecuación N° 5}$$

Dónde:  $\phi_p =$  factor de forma de la partícula

$\mu =$  viscosidad dinámica

$\rho_w =$  densidad del Agua

$\nu =$  Viscosidad cinemática, definida como  $\frac{\rho_w}{\mu}$

El factor de forma adimensional es definido como la relación, entre el área superficial de una esfera equivalente y el área superficial de partículas como igual volumen:

$$\Phi_p = \frac{\text{área superficial de una esfera equivalente}}{\text{área superficial de la partícula}} \quad \text{Ecuación N° 6}$$

Vale la pena anotar que el factor de forma  $\Phi_p$  se conoce también como factor de esfericidad. Los valores usuales del factor de forma para partículas esféricas tales como arenas redondas, carbón aplanado y arenas angulares, son 1.0, 0.82, y 0.73, respectivamente.

-Sedimentación de partículas en régimen laminar.

Para números de Reynolds menores que 1.0, la sedimentación está gobernada principalmente por las fuerzas de viscosidad y, por tanto, el primer término de la ecuación (4) es el más importante. Si se supone que se trata de partículas esféricas se obtiene la expresión de la ley de Stokes:

$$v_p = \frac{g(\rho_s - \rho_w)d_p^2}{18\mu} = \frac{g(sg_p - 1)d_p^2}{18\nu} \quad \text{Ecuación N° 7}$$

Donde  $\nu$ =viscosidad cinemática. Los demás términos conservan su definición anterior. Para condiciones de flujo laminar, Stokes encontró que la fuerza de arrastre se puede expresar como:

$$F_d = 3\pi\mu v_p d_p \quad \text{Ecuación N° 8}$$

- Sedimentación de partículas en régimen de transición.

Para encontrar la velocidad de sedimentación en la región de transición se puede hacer uso de la expresión completa del coeficiente de arrastre [ecuación (4)]. Dada la

forma de la expresión, se necesita recurrir a un proceso iterativo para encontrar la velocidad de sedimentación.

- Sedimentación de partículas en régimen turbulento.

En la región de régimen turbulento predominan las fuerzas de inercia, es por eso que en la sedimentación de partículas bajo condiciones de régimen turbulento se usa un valor de 0.4 para el coeficiente de arrastre. Al reemplazar  $C_d$  por 0.4 en la ecuación (3), se tiene:

$$v_p = \sqrt{3.33g \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) d_p} = \sqrt{3.33g(sg_p - 1)d_p} \quad \text{Ecuación N° 9}$$

- Sedimentación de partículas discretas (Tipo 1).

En el diseño de tanques de sedimentación, el procedimiento de cálculo consiste en elegir una partícula con velocidad terminal de sedimentación  $v_c$  y diseñar el tanque para garantizar la remoción de todas las partículas con velocidad terminal de sedimentación mayor o igual a  $v_c$ . El caudal de agua clarificada es igual a:

$$Q = Av_c \quad \text{Ecuación N° 10}$$

Donde A es el área superficial del sedimentador. Reordenando se obtiene:

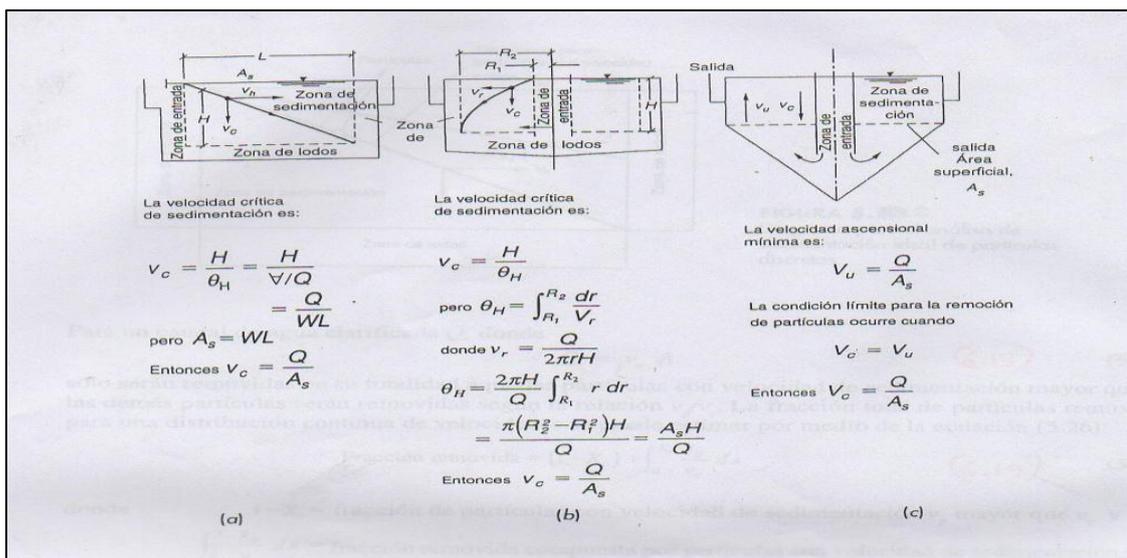
$$v_c = \frac{Q}{A} = \text{carga superficial, } \frac{\text{gal}}{\text{pie}^2} \cdot d \left( \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot d} \right) \quad \text{Ecuación N° 11}$$

Se observa entonces que la velocidad terminal de sedimentación es igual a la carga superficial, parámetro usado con frecuencia en el diseño de tanques para sedimentación de tipo 1, donde la capacidad de producción de agua clarificada es independiente de la profundidad.

En la figura 2. Se puede observar tres clases de sedimentadores basados en la teoría de sedimentación ideal del tipo 1. Si se supone que las partículas de diferente tamaño se encuentran uniformemente distribuidas a lo largo de la profundidad en la entrada del sedimentador, como se puede observar en el análisis de la trayectoria de las partículas de la figura 3 algunas particular con velocidad de sedimentación menor que  $v_c$  serán removidas de acuerdo con la siguiente relación:

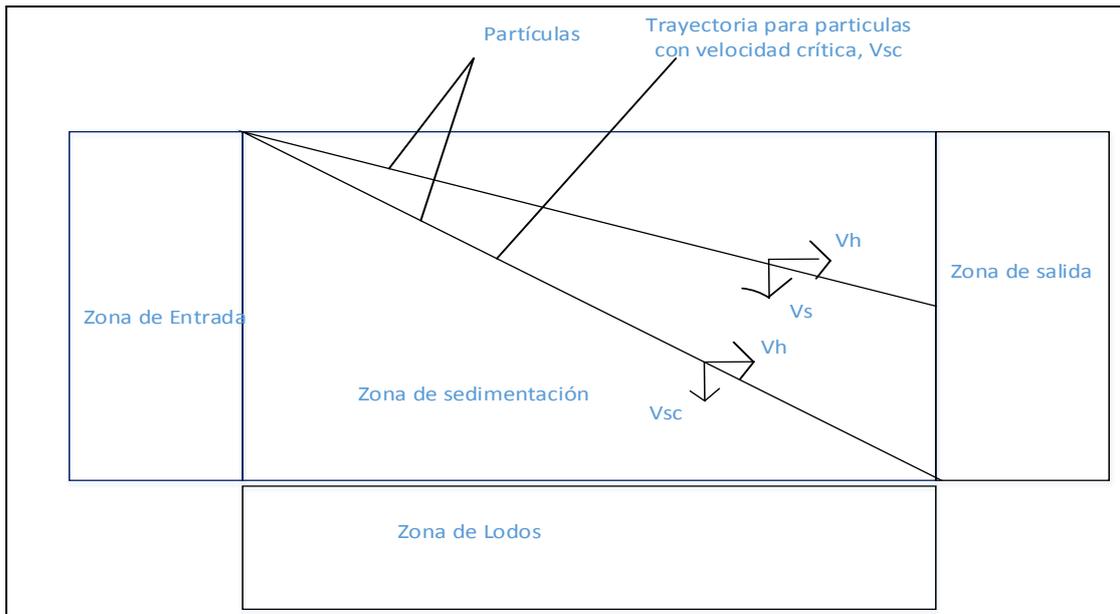
$$X_f = \frac{v_p}{v_c} \tag{Ecuación N° 12}$$

Donde  $X_f$  es la fracción de partículas con velocidad de sedimentación  $v_p$  que son removidas. Para determinar la eficiencia de remoción asociada a un tiempo de sedimentación dado se requiere estudiar la totalidad del intervalo en que varía la velocidad de sedimentación de las partículas presentes en el sistema. Esta velocidad de sedimentación se puede obtener mediante 1) el análisis granulométrico y ensayos con hidrómetro junto con la ecuación (5 o 2) realizando ensayos en columna de sedimentación como la que se aprecia en la figura 3.



**Figura 2:** Diagrama de sedimentación ideal de partículas discretas en tres diferentes clases de sedimentadores: (a) Rectangular, (b) Circular (c) De flujo ascendente.

FUENTE: Adaptado de Barnes *et al*, 1980.



**Figura 3:** Diagrama para análisis de sedimentación ideal de partículas discretas.

FUENTE: Adaptado de Barnes *et al*, 1980.

Para un caudal de agua clarificada Q donde

$$Q = v_c A \tag{Ecuación N° 13}$$

Solo serán removidas en su totalidad aquellas partículas con velocidad de sedimentación mayor que  $v_c$ , las demás partículas serán removidas según relación  $v_p/v_c$ .

La fracción total de partículas removidas para una distribución continua de velocidades se puede estimar por medio de la ecuación (14):

$$\text{Fracción removida} = (1 - X_c) + \int_0^{X_c} \frac{V_p}{V_c} dx \tag{Ecuación N° 14}$$

Dónde:

$1 - X_c =$  Fracción de partículas de sedimentación  $v_p$  mayor que  $V_c$  y

$\int_0^{X_c} \frac{V_p}{V_c} dx =$  Fracción removida compuesta por partículas con velocidad

de sedimentación  $v_p$  menor que  $V_c$

En el caso de partículas discretas con velocidades de sedimentación que varían dentro de un intervalo determinado, la siguiente expresión se puede emplear para calcular la fracción removida:

$$\text{Total fracción removida} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{v_{ni}}{v_c} (n_i)}{\sum_{i=1}^n n_i} \quad \text{Ecuación N° 15}$$

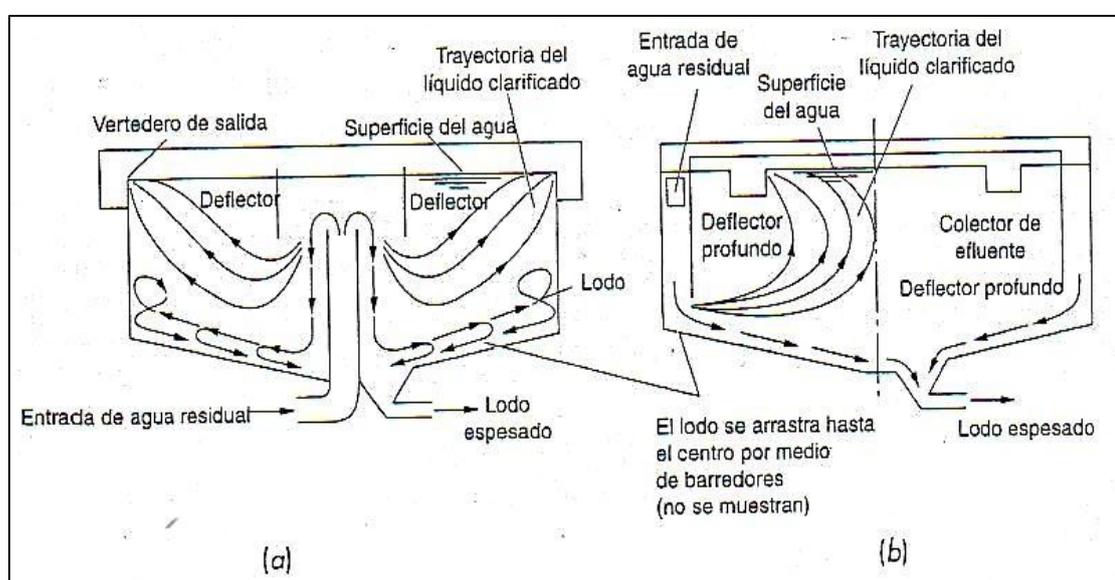
Donde:  $v_n$  es la velocidad promedio de sedimentación de partícula en el  $i$ -ésimo intervalo de velocidad y  $n_i$  es el número de partículas con velocidad de sedimentación dentro del  $i$ -ésimo intervalo de velocidad.

### **Sedimentación primaria**

El objetivo del tratamiento por sedimentación es de remover rápidamente los residuos sedimentables y material flotante para así disminuir la concentración de sólidos suspendidos. La sedimentación primaria se emplea como parte del pre tratamiento dentro del procesamiento integral de aguas. Los sedimentadores primarios, diseñados y operados pacientemente, remueven 50% y 70% de sólidos suspendidos y entre 25% y 40% de DBO.

**Tanques rectangulares.** En los sedimentadores horizontales predomina el flujo horizontal diferencia del flujo radial que se da en sedimentadores circulares. Los sedimentadores rectangulares cuentan con sistemas para recolección de lodo sedimentado, en los sedimentadores rectangulares la distribución del caudal de entrada es crítica, la entrada de agua al sedimentador se realiza empleando uno de los siguientes diseños: 1) Canales que ocupan la totalidad del ancho del sedimentador, con vertedero de entrada, 2) canales de entrada con orificios sumergidos, 3) canales de entrada con compuertas grandes y deflectoras. Las espumas se recolectan por lo general en el extremo de salida de los sedimentadores rectangulares.

**Tanques circulares.** - El flujo en los tanques circulares es de tipo radial, a diferencia de los tanques rectangulares donde existe flujo de tipo horizontal. Para lograr este tipo de flujo, el agua a tratar se introduce en el sedimentador por el centro o por la periferia del tanque tal como se observa en la figura 4 ambas configuraciones de flujo promueven por lo general resultados satisfactorios, aunque el centro de alimentación central es el más usado. El agua a tratarse fluye alrededor del tanque a manera espiral hasta pasar por debajo del deflector, mientras que el agua clarificada se recoge por medio de unos vertederos colocados a ambos lados de un canal ubicado en la parte central.



**Figura 4:** Tanques circulares de sedimentación (a) alimentación central (b) alimentación perimetral.

FUENTE: Adaptado de Barnes *et al*, 1980.

### Desempeño de los sedimentadores

La eficiencia de los tanques de sedimentación respecto a la remoción de DBO y SST se ve afectada por: 1) corrientes arremolinadas formadas por la inercia del fluido en la entrada, 2) corrientes inducidas por acción del viento en tanque sin cubierta, 3) corrientes de convección térmica, 4) corrientes de densidad originadas por el acceso de aguas calientes o frías que promueven el movimiento de las capas de aguas calientes

desde el fondo hacia la superficie del tanque, 5) estratificación térmica propia de climas calientes y áridos,(Guzmán, Granada y Calderon, 2014).

### **2.1.3. Floculación**

El termino floculación se refiere a la aglomeración de partículas coaguladas en partículas floculentas; es el proceso por el cual, una vez desestabilizado los colides, se provee una mezcla suave de las partículas para incrementar la tasa de encuentros o colisiones entre ellas sin romper o disturbar los agregados preformados. De la misma manera que la coagulación, la floculación es influenciada por fuerzas químicas y físicas tales como la carga eléctrica de las partículas, la capacidad de intercambio, el tamaño y la concentración del floculo, el pH, la temperatura del agua y la concentración del electrolito. En partículas muy pequeñas el movimiento Browniano provee cierto grado de transporte de ellas creando la floculación pericinética, pero en partículas grandes en movimiento Browniano es muy lento y se requiere algún mecanismo de transporte que induzca la colisión de las partículas creando la floculación orto cinética.

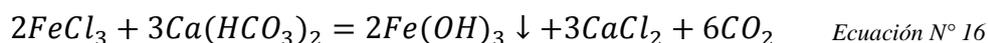
Teniendo en cuenta que la influencia y magnitud del efecto de cada uno de los factores que participan en la floculación no están aún definidas exactamente, es importante conocer el comportamiento del agua mediante ensayos de jarras o experiencias previas en plantas de tratamiento. En la floculación, una vez inducido y mezclado el coagulante, las partículas diminutas coaguladas son puestas en contacto una con otra y con las demás partículas presentes, mediante agitación lenta o prolongada, floculación durante la cual las partículas se aglomeran, incrementan su tamaño y adquieren mayor densidad. El floculador es, por lo tanto, un tanque con algún medio de mezcla suave y lenta, con un tiempo de retención relativamente prolongado.

### Coagulación química del agua

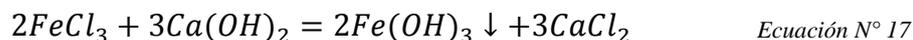
Los compuestos de hierro y aluminio usados como coagulantes reaccionan con la alcalinidad propia del agua, disminuyéndola. Si el agua no posee suficiente alcalinidad, se busca aumentarla añadiendo cal o soda-hash. La adición de coagulantes produce también transformaciones en la dureza del agua cruda e incremento de la corrosividad. A continuación se presentan las reacciones correspondientes a las principales sustancias usadas en coagulación (Molina-Morales, Flores-García, Balza-Quintero, Benítez-Díaz y Miranda-Contreras, 2012).

#### CLORURO FERRICO

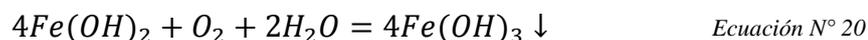
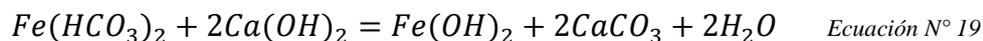
Con la alcalinidad:



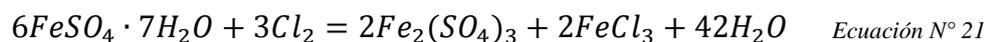
Al añadir cal:



#### SULFATO FERROSO Y CAL



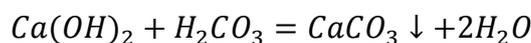
#### SULFATO FERROSO Y CLORO



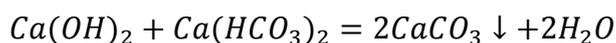
Y las demás reacciones del sulfato férrico y del cloruro férrico

*Ecuación N° 22*

### ***CAL***



*Ecuación N° 23*



*Ecuación N° 24*

#### **2.1.4. Filtración**

Filtración es un proceso en el cual partículas sólidas que se encuentran en un fluido líquido o gaseoso se separan mediante un medio filtrante, o filtro, que se permite el paso del fluido a su través, pero retiene las partículas sólidas. Unas veces, interesa recoger el fluido; otras, las partículas sólidas. Unas veces interesa recoger el fluido; otras de las partículas sólidas y en algunos casos, ambas cosas.

Los elementos que intervienen en la filtración son:

- Un medio filtrante
- Un fluido con sólidos en suspensión
- Una fuerza o una diferencia de presión que obligue al fluido a avanzar.
- Un dispositivo mecánico, llamado filtro que sostiene el medio filtrante que contiene el fluido y permite la aplicación de la fuerza de diferencia de presiones.

Medios filtrantes

Se puede dividir en dos grupos:

1. Los que actúan formando una barrera delgada que permite el paso solo del fluido y no de las partículas sólidas en suspensión en él.

2. Los que actúan formando una barrera gruesa al paso del fluido.

Entre los primeros que se encuentran los filtros de tela para agua, los de criba y el de papel de filtro común de los laboratorios.

Entre los segundos mencionaremos los filtros de lecho de arena, los de cama de coque, de cerámica porosa, metal poroso y los de pre capa empleados en ciertas filtraciones industriales que contiene precipitados gelatinosos.

El medio filtrante acaba cegándose por las partículas acumuladas, se deben entonces lavar con fluido claro para limpiarlo y permitir que siga la filtración. Los medios filtrantes delgados también pueden cegarse cuando por ellos se filtran líquidos gelatinosos o que contienen partículas blandas y elásticas en suspensión.

Como medio filtrantes, para temperaturas menores de 100°C, se emplean filtros de algodón o lana; ciertas fibras sintéticas hasta los 150°C; vidrio, grava - arena y amianto o sus mezclas hasta 350°C. Para temperaturas muy altas se usan mallas metálicas, elementos porosos cerámicos de acero inoxidable.

### **Fuerza de filtración del agua**

El fluido atravesara el medio filtrante solo cuando se le aplique una fuerza, que puede ser causada por la gravedad, centrifuga, la aplicación de una presión sobre el fluido por encima del filtro, o de un vacío debajo del mismo o por una combinación de estas dos cosas.

### **Tipos de filtros para agua**

Los filtros se pueden clasificar, de acuerdo con la naturaleza de la fuerza que causa la filtración, en filtros de gravedad, de presión y de vacío. También se clasifican, según

sus características mecánicas, entre filtros de platos y marcos de tambor rotario, de discos, de lecho de arena y de pre-capas, entre otros.

***Filtros para agua en base a la gravedad.*** Son los más antiguos y también los más sencillos; entre ellos citaremos los filtros de lecho de arena, instalados en plantas depuradoras de agua de las ciudades, que funcionan con un excelente rendimiento. Están formados por tanques de cisternas que tienen en su parte inferior una rejilla o falso fondo sobre el que hay una capa de arena o grava de igual tamaño.

***Filtros de agua en base a presión o de vacío*** Son los más usados en la industria, con preferencia a los de gravedad. La fuerza impulsora es suplida por presión o vacío y es muchas veces mayor que la de la gravedad, lo que permite más altos rendimientos de filtración. El tipo más común de filtros de presión es el filtro prensa, del que hay diferentes tipos. Dispone de una elevada superficie filtrante en poco espacio, por lo que su eficacia es muy grande.

#### **2.1.4.1. Filtro de grava en columna**

Filtro lento definidas, distribución de tamaño y partículas. El medio es de arena/antracita. La remoción se produce sobre la superficie del medio y entre los poros de una acción de tamizado.

Usando una cama de arena filtradora es muy simple. El agua de la fuente de riego es presurizada e introducida en la parte superior de la cama de arena del reactor. Un tubo difusor en la parte superior del tanque sirve para reducir la velocidad del agua y distribuir uniformemente el agua a través de la parte superior de la cama filtrante. La cama de arena es una capa de arena sílica de tamaño graduado de aproximadamente 16" de profundidad. Los contaminantes en el agua son capturados en la cama de arena y el agua filtrada pasa dentro de del colector de descarga, ubicado en el fondo de los tanques.

La filtración de agua y sus componentes, es la remoción del material suspendido; medido en la práctica como turbiedad, compuestos de floculo, partículas del suelo, metales oxidados y microorganismos es de gran importancia puesto que muchos de ellos son extremadamente resistentes a la desinfección y sin embargo son removibles mediante filtración. En la práctica, la operación de filtración se considera que el propósito perseguido es remover la turbiedad (STD) y partículas sólidas existentes en el seno del agua; debido a acciones físicas, químicas y biológicas ocurrentes en el filtro, en el que juega un rol importante la adsorción de las partículas suspendidas sobre la superficie de los granos del medio o sobre el material previamente depositado (Romero-Aguilar, Colín-Cruz, Sánchez-Salinas y Ortiz-Hernández, 2009).

#### **2.1.4.2. Sistema de filtración**

Muchos son los sistemas de filtración propuesta y construida, sin embargo, se puede hacer una clasificación de acuerdo con la dirección del flujo, el tipo de lecho filtrante, la fuerza impulsora, la tasa de filtración y el método de control de la tasa de filtración.

*Dirección de flujo.* - De acuerdo con la dirección de flujo, los filtros pueden ser de flujo hacia abajo, hacia arriba o de flujo dual.

*Tipo de lecho filtrante.* - Los filtros utilizan generalmente un solo medio, arena o antracita; un medio dual, arena y antracita, o un lecho mezclado: arena, antracita y granate o ilmenita, medios filtrantes comúnmente usados en el tratamiento de aguas.

*Fuerza impulsora.* - La fuerza impulsora utilizada es para vencer la resistencia fricción ofrecida por el lecho filtrante, los filtros se clasifican como filtros de gravedad o de presión. El filtro por gravedad es el más usado en plantas de purificación de aguas. El

filtro a presión se ha usado principalmente en la filtración de aguas para pequeñas plantas donde su instalación es ventajosa.

Tasa de filtración. - Filtro rápido, filtro de arena, generalmente con lavado ascensional, con tasas de filtración mucho mayores y, por consiguiente, con requerimientos de área mucho menores. Posteriormente, con el uso de medios filtrantes duales o lechos mezclados, se lograron diseños mucho más económicos en área, al usar tasas de filtración todavía mayores que las de los filtros rápidos convencionales. En la tabla 2 resume algunas de las principales características de los filtros por gravedad más utilizados en nuestro medio.

**Tabla 2:** Principales características de filtros.

Características	Filtros rápidos de arena	Filtros de alta tasa
Tasa de filtración	120 m/d	180-480 m/d
Medio	Arena	Arena y antracita
Distribución del medio	Estratificado: fino a grueso	Estratificado: fino a grueso
Duración Carrera	12 – 36 horas	12 a 36 horas
Pérdida de Carga	Inicial. 0.3 m ; final:2.4 - 3 m	Inicial 0,3m; final: 2,4–3m
Agua de lavado	2 – 4 % del agua filtrada	6% de agua filtrada
Profundidad del medio	Arena	Arena y antracita
Profundidad de Grava	Si	Si
Drenaje	Tubería perforada	Tubería perforada

FUENTE: Romero, (2002).

### 2.1.4.3. Método de control de filtración

La tasa de filtración puede expresarse así:

$$\text{Tasa de Filtración} = \frac{\text{Fuerza impulsora}}{\text{Resistencia del filtro}}$$

**Tabla 3:** Principales variables en filtración.

Variables
1. Características del medio filtrante
a. Tamaño del grano
b. Distribución granulométrica
c. Forma, densidad y comportamiento del grano
d. Carga del medio
2. Densidad del lecho filtrante
a. Densidad del lecho filtrante
b. Profundidad del lecho filtrante
3. Profundidad del lecho filtrante
4. Tasa de filtración
5. Perdida de carga disponible
6. Características del efluente
a. Concentración de sólidos suspendidos
b. Tamaño y distribución del floculante
c. Resistencia del floculo
d. Propiedades

---

FUENTE: Ramalho (2003).

### 2.1.5. Caracterización de la cal cao

Sitio de extracción de la Cal artesanal CaO

La cal artesanal se ha adquirido en las canteras de procesamiento de cal, en el Distrito de Samán Provincia de San Román Región Puno. El centro de procesamiento de la cal está ubicado a 3 Km de la población urbana de Samán.

**Accesibilidad:** La vía de acceso principal a la zona de producción de cal se realiza por la carretera Asfaltada Juliaca – Huancané, en el kilómetro 33.

En la caracterización de la cal artesanal se han determinado sus características físico-químico de:

- Componente Oxido de Calcio CaO
- Componente hidróxido de Calcio Ca(OH)<sub>2</sub>
- Humedad
- Pureza de:

Oxido de Calcio % CaO

Hidróxido de Calcio % Ca(OH)<sub>2</sub>

**Tabla 4:** Propiedades físicas y químicas del óxido de calcio cao.

Formula Química	CaO
Peso molecular	56 g/mol
Estado	Sólido
Apariencia	Blanco
Densidad	g/ml
pH	7,5 -11,80
Solubilidad en agua	g/L a °C
Pureza cal útil %	%
Pureza Ca(OH) <sub>2</sub> %	%

FUENTE: (Guzmán, Granada y Calderon, 2014).

**A. Tratamiento de la Cal CaO (Oxido de Calcio)**

Para utilizar la cal artesanal CaO (Oxido de Calcio) como material adsorbente, se ha seleccionado y sometido a la operación de remolienda y tamizado. A partir de la cal tamizada se prepararon disoluciones acuosas a concentración C<sub>1</sub>% y por dilución a concentraciones al C<sub>2</sub>% de óxido de calcio cuyo producto en disolución viene a ser el hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub>, (Lechada de cal)

**B. Tratamiento físico - químico de la cal CaO**

Para el tratamiento físico - químico de la cal artesanal, se realizó las siguientes operaciones: Adquisición de la materia prima, selección, secado, remolienda, tamizado y preparación de disoluciones de cal para procesos de floculación.

- Adquisición de la materia prima cal artesanal: La cal artesanal se ha adquirido en el centro de procesamiento de la cal en el Distrito de Samán Provincia San Román Región Puno.
- Selección: La cal artesanal se procedió a seleccionar de otras impurezas, separando de estas, tales como de restos de piedra calcárea no procesado y de otros componentes no deseados.
- Secado: Seguidamente se dejaron secar la cal artesanal a temperatura ambiente por 2 días, hasta no tener contenido de humedad.
- Molienda y Tamizado: Para la operación de remolienda se realizó utilizando un molino de disco manual, luego se procedió a tamizar en malla M de serie estándar ASTM para obtener granulometría de alta finura de mm de cal artesanal.

- Las diferentes operaciones de preparación de la cal artesanal y su acondicionamiento para la adsorción de arsénico del agua por proceso de oxidación y floculación se presentan en el siguiente diagrama.



**Figura 5:** Proceso de tratamiento de la cal artesanal cao.

### C. Disoluciones de Hidróxido de Calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Se prepararon dos clases de disoluciones de cal  $\text{CaO}$  al  $C_1\%$  y por dilución, cal  $\text{CaO}$  al  $C_2\%$  de concentración.

Procedimiento.

- Para una concentración de disolución del  $C_1\%$ , Pesar  $X, g$  de Cal y disolver en 100ml de agua, que equivale a pesar  $X, g$  de Cal y disolver en 1Litro de agua

- Considerando la pureza de la cal CaO en %; se debe recalcular el peso de la cal CaO:

Pesar X gramos de cal impura y disolver en un litro de agua, por lo tanto se tendrá disolución de cal CaO al C<sub>1</sub>%.

- Disolución de cal CaO, al C<sub>2</sub>%

Datos:

Volumen V: 1 L

[CaO]: al C<sub>1</sub>%,

Pureza CaO: 55,52%

Procedimiento.

- Para una concentración de disolución del C<sub>1</sub>%, Pesar X,g de Cal y disolver en 100ml de agua, que equivale a pesar (X)10g de Cal y disolver en 1Litro de agua.

- Disolución de cal CaO, al C<sub>2</sub>%

Datos:

Volumen V: 2 L

[CaO]: al C<sub>2</sub>%

Pureza CaO: 55,52%

Procedimiento.

- Para una concentración de disolución del C<sub>2</sub>%, se procederá a obtener por dilución, a partir de la disolución de concentración del C<sub>1</sub>%.

$$- \quad V_1C_1 = V_2C_2$$

Se determina

$$V_1 = \text{mL}$$

Tomar  $V_1$  mL de la disolución del  $C_1\%$  de concentración de cal y diluir hasta 2 litros con agua y tendremos disolución de cal de concentración al  $C_2\%$ .

- Se debe tener en cuenta que: cada 1 mL de la disolución de cal al  $C_2\%$ , de concentración contiene 10mg de cal.
- Con la disolución de cal al  $C_2\%$ , de concentración se dosificara y determinara la dosis optima de cal en forma de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o lechada de cal listo para la floculación del agua con contenido de arsénico As.

### **2.1.6. Caracterización del agua superficial de rio contaminada con arsénico**

#### **Muestreo de agua superficial de rio**

La toma de muestras de agua superficial se realizó en recipientes de polietileno de alta densidad, lavados previamente en el laboratorio con solución de ácido nítrico al 1%, de acuerdo al protocolo de muestreo. Las muestras se tomaron próximos al centro del cauce del rio a una altura del 60% de la profundidad.

El punto de muestreo se zonifico y determino en la Unión de los ríos Llallimayo y Macarimayo, Afluentes de descarga al rio Ayaviri en coordenadas UTM, X: 314682.62m, Y: 8362441.88m, Hemisferio Sur, a 72 km de la ciudad de Ayaviri, en la Provincia Melgar de la Región Puno.

- Accesibilidad

La vía de acceso principal a la zona de muestreo de agua, es por la carretera Afirmada Ayaviri – Ocuvi, a 72 kilómetros de la ciudad de Ayaviri:

- Características Físico – Químicas del Agua superficial de río

Los análisis físico químicas de la muestra del agua superficial de río se realizaron en los laboratorios de la empresa SGS Laboratorio Químico Pucamarca, para el cual se analizaron los parámetros que se exponen en la tabla 5 y así mismo ser interpretados según los límites máximo permisibles LMP establecidos en el D.S. 031-2010 SA.

**Tabla 5:** Características físico – químicas de agua superficial de río.

PARAMETROS	Unidad de Medida	L.M.P. D.S. 031 – 2010 SA.	VALORES OBTENIDOS
Turbidez	NTU		
Potencial de Hidrogeno	pH		
Conductividad eléctrica	uS/cm		
Solidos Totales Disueltos	mg/L		
Temperatura	°C		
Arsénico	mg/L		

FUENTE: Elaboración Propia.

### **2.1.7. Proceso de adsorción de arsénico de muestras de agua por oxidación, floculación, sedimentación y filtración**

- Las pruebas experimentales de adsorción de arsénico de muestras de agua por oxidación, floculación, sedimentación y filtración; se realizaron siguiendo el siguiente procedimiento:
- Las pruebas experimentales de adsorción de arsénico se realizaron mediante procesos en discontinuo o batch.

- Se han utilizado disoluciones acuosas con agua destilada, conteniendo arsénico As (III) con concentraciones de 0,08 mg/L y así mismo se tomaron muestras de agua superficial de río con contenido contaminante de arsénico As (III).
- Las pruebas experimentales se realizaron en tres etapas:
  - Etapa de Oxidación con cloruro férrico  $\text{FeCl}_3$
  - Etapa de floculación con cal  $\text{CaO}$  artesanal
  - Etapa de Sedimentación y filtración.
- Las pruebas Oxidación, floculación se realizaron a nivel de laboratorio y las pruebas de Sedimentación y filtración se realizaron a nivel de planta piloto en el equipo de sedimentación y filtración en columna.
- Se determinaron las variables que más influyen para el proceso de adsorción siendo los siguientes parámetros: Cantidad del oxidante y del floculante mg/L, pH del proceso, tiempo de adsorción y tiempo de sedimentación en minutos.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Para la presente investigación” análisis de factores de la participación laboral de los jóvenes en el Distrito de Juliaca”: se utilizará los métodos inductivo y deductivo.

*Método inductivo:* Primero se reunieron los datos de los variables en estudio y se procedieron a su tratamiento mediante un modelo.

*Método deductivo:* Con resultado de la aplicación del modelo y contrastando con la teoría económica se dedujeron las conclusiones en correspondencia a las hipótesis planteadas.

*Tipo de investigación:* Para interpretar la relación entre las variables, se tomará en cuenta la investigación explicativa.

##### 3.1.1. Ámbito de estudio

El estudio de investigación para la remoción de arsénico en soluciones acuosas y en aguas naturales por el proceso de oxidación floculación sedimentación y filtración, se desarrolló en el Laboratorio de Tecnología de Aguas de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del altiplano Puno, a condiciones ambientales de 460 mm de Hg, a la altitud de 3812 metros sobre el nivel del mar (msnm) y a una temperatura variable de 12 a 15 °C.

##### 3.1.2. Muestreo de agua superficial de río

Técnica de Muestreo de aguas y naturales

Los procedimientos de muestreo de aguas naturales fueron por el Método de “Muestreo Compuesto o Puntual por cada 06 Horas/día a profundidades al 20% y al 60%

de la Profundidad en los puntos de muestreo, para la determinación de los análisis físico-químicos; para muestras de aguas naturales del río Ayaviri de la ciudad de Ayaviri.

### **3.1.3. Definición del plan de muestreo**

Este aspecto es primordial, pues posibilita la obtención de muestras representativas del fenómeno que se deseó estudiar. El tipo (puntual o compuesto) con número de muestras determinadas para un volumen definido a recolectar y determinar los parámetros en cada una de ellas, se realizaron en frascos con códigos definidos, así mismo se detallaron los modelos y características técnicas de los equipos de medición y muestreo necesarios. Para aquellos parámetros que requirieron preservante, estos se añadieron previamente a los frascos de recolección. Cuando las muestras implicaron conservarse en neveras diferentes estas dispusieron del requerimiento.

### **3.1.4. Ejecución del muestreo**

Identificación de las muestras y registro de las condiciones de muestreo: cada frasco será rotulado con el nombre del punto de muestreo. En lo posible se recomienda establecer puntos de muestreo permanentes, tratando de asegurar condiciones de muestreo reproducibles (Garay, 2003)

Determinación de parámetros in situ: se medirán directamente en el cuerpo de agua. los parámetros deben medirse a la prontitud posible directamente en dicho dispositivo para así minimizar cualquier error.

Muestras puntuales: se recolectarán directamente en los frascos asignados o con el dispositivo de muestreo adecuado, según resulte más conveniente. Antes de ser llenados, los frascos deben ser enjuagados por lo menos tres veces con la muestra a analizar, siempre y cuando no tengan preservativo o estén previamente esterilizados, en

cuyos casos, se omite el enjuague. Cuando eventualmente deba obtenerse la muestra en el frasco y esto resulte irrealizable, se obtendrá una alícuota del dispositivo de muestreo empleado, previo a medición de parámetros in situ y/u obtención de otras alícuotas. Toda situación que se desvíe del procedimiento de muestreo establecido, debe consignarse en la planilla de muestreo (Garay, 2003).

Muestras compuestas: se observarán las precauciones descritas previamente para las muestras puntuales. Las muestras compuestas se preparan mezclando varias muestras puntuales o mediante la recolección de una fracción continua de la descarga o cuerpo de agua a muestrear; las porciones individuales se recogen a intervalos de tiempo previamente establecidos, preferiblemente en envases de boca amplia y volumen en función de los análisis a realizar.

Para los casos de corrientes o descargas, existen dos posibilidades para su recolección, en función de que se considere o no iguales volúmenes, a medida que se van obteniendo o al colectarse la última muestra.

En función del flujo: con los datos de su comportamiento durante el tiempo de muestreo, se calcula la proporcionalidad entre las alícuotas y con base a ésta y el volumen de muestra compuesta necesaria, se determinan los volúmenes de cada alícuota y se procede a su mezcla (Azqueta, Ramírez y Villalobos, 2007).

Conservación y almacenaje, Inmediatamente recolectadas, las muestras se almacenan según lo establecido para cada parámetro. Para las que requieran refrigeración, se emplearán neveras portátiles. Para muestras compuestas, mientras dure el tiempo de recolección, se seguirán las indicaciones para garantizar su integridad. La verificación del pH a las muestras que lo requieran, se realizará con electrodos de indicador de pH y de

ser necesario, se ajustará el mismo; una vez en el laboratorio, será nuevamente verificado por el analista al recibir las muestras

El muestreo y manipulación de las muestras de agua se realizaron según protocolos instructivos de control de calidad: Environmental Quality-Analytical Services S.A. – EQUAS S.A. para monitoreo de calidad de agua (Ver Anexo: 01).

El muestreo de aguas del río Ayaviri se realizó en el punto:

**Tabla 6:** Puntos de toma de muestreo del río Ayaviri.

Parámetro	Punto de Muestreo	Ubicación Coordenadas	Ubicación UTM	Volumen (mL)	Agente Preservante
Arsénico	M1:	Latitud:	X:314682.62m	1 000	HNO <sub>3</sub> (c) concentrado
As (III)	Unión de los ríos Afluentes Llallimayo y Macarimayo de descarga al río Ayaviri	-14°47'20" S Longitud: -70°42'19" W	Y:8362441.88m Hemisferio: S		

FUENTE: Elaboración propia.

Las tomas de muestras de Agua superficial se realizaron en el punto Unión de los ríos Afluentes Llallimayo y Macarimayo que descargan al río Ayaviri a una distancia en carretera afirmada a 72 km de la ciudad de Ayaviri, en la Provincia Melgar Región Puno.

### 3.1.5. Proceso de remoción de arsénico as de aguas

El proceso de remoción de arsénico As en soluciones acuosas y en aguas naturales fue por el proceso de oxidación floculación sedimentación y filtración para el cual se utilizaron materiales de cloruro férrico FeCl<sub>3</sub> para oxidación, cal CaO artesanal para floculación y lecho de grava-arena IF para filtración. Las pruebas de análisis físico-químico para determinación de arsénico As fueron realizadas en los laboratorios de la

EPS SEDA Juliaca la determinación de arsénico As cal CaO fueron realizadas en el Laboratorio Químico SGS Pucamarca.

### **3.2. MATERIALES**

#### **Materia prima**

Para el proceso de oxidación de arsénico As en el agua se utilizó Cloruro Férrico  $FeCl_3$  de calidad reactivo químico comercial del 86 % de pureza.

Para el proceso de floculación del agua, se utilizó cal artesanal CaO del 55,52 % de pureza, procedente de las canteras del Distrito Samán, Provincia de San Román, Región Puno.

#### **Material de laboratorio, equipos y reactivos**

A continuación, se detallan los equipos y reactivos empleados:

##### **a) Equipos**

- Balanza analítica, (METTLER TOLEDO).
- Juego de Tamices, (TYLER ASTM 200)
- Agitadores magnéticos con control de temperatura. ( LMIM LE 306 )
- Equipo de absorción atómica, (Perkin Elmer, modelo 3110 )
- Equipo de Evaluación de Jarras. (Test Jarr UNICO M.4)
- pH-metro, (Orion)
- Filtro en columna Lecho Graba-arena IF.(AQUOS M. 32X8 )
- GPS digital

**b) Reactivos e Insumos**

- Muestras de agua superficial de río, contaminada con arsénico
- Adquisición de cal artesanal CaO
- Cloruro férrico comercial FeCl<sub>3</sub>
- Agua destilada y bidestilada.

**3.3. METODOLOGÍA**

La parte experimental se realizó de acuerdo a las siguientes experiencias:

- Caracterización de la cal, CaO artesanal
- Caracterización de agua subterránea contaminada con arsénico.
- Proceso de adsorción/precipitación del ion arsénico.
- Diseño experimental de la adsorción/precipitación del ion arsénico.
- Isoterma de adsorción
- Cinética de adsorción.

**3.3.1. Evaluación de las variables influyentes en el proceso de remoción de arsénico de aguas superficiales de río**

Se evaluaron las variables influyentes en el proceso de adsorción para remoción del arsénico As, por oxidación con cloruro férrico FeCl<sub>3</sub>, floculación con cal CaO artesanal, sedimentación y filtración en columna IF, grava-arena. Las pruebas se realizaron con la finalidad de obtener el valor cuantificable favorable para el proceso de adsorción y remoción del arsénico As.

### A. Efecto de la cantidad de adsorbente cal CaO

Las pruebas se realizaron en matraces Erlenmeyer de 300 mL; se tomaron 100 mL de agua que contiene mg As(III)/L y cantidades diferentes en peso del floculante cal CaO artesanal de granulometría de malla M, en base al ensayo de la pruebas de jarras o test jarra, determinando la dosis optima del floculante por litro (del C<sub>2</sub>% de cal) para muestra de agua con arsénico, valor equivalente a que cada mililitro del floculante contiene 10 mg del floculante cal por cada litro de agua (10 mg/L). En base a esta cantidad de cal se tomaron 8 valores de mg de cal por 100 mL de solución de agua con 0,08 mg As/L, así mismo se adiciono (X) mg del oxidante FeCl<sub>3</sub> por cada por 100 mL de muestra de agua; se trabajó a temperatura constante con agitación de 200 rpm durante (t) minutos, a pH constante. El contenido de cada matraz se de dejo precipitar durante (y) min y seguidamente se filtró y se llevó para su análisis de arsénico al laboratorio de la EPS SEDA JULIACA.

**Tabla 7:** Efecto de la cantidad de cal CAO para adsorción de AS.

N° Muestras	[As] mg/L	Masa (mg)	Volumen (mL)	pH	Agitación (min)	Temperatura (°C)
8	0,08	-----	100	básico	-----	-----

FUENTE: Elaboración Propia.

### B. Efecto de pH

El efecto del pH para la adsorción del As con cal artesanal se evaluó en soluciones acuosas y muestras de agua con concentración de 0,08 mg/L de As (III), utilizando adsorbente cal artesanal y oxidante FeCl<sub>3</sub>, con peso constante; para las pruebas se utilizaron 8 matraces Erlenmeyer de 300 mL, adicionándoles a cada uno de ellos 100 mL de agua que contiene 0,08 mg As(III)/L; y para la evaluación se variaron los valores de pH de: 7,50 a 10,00; a una temperatura de 25 °C, con un tiempo de agitación por 25

minutos. El contenido de cada matraz de dejo sedimentar y luego se somete a filtración; de estos efluentes se tomaron muestras para su análisis de arsénico en el laboratorio de: SGS del Perú Laboratorio Químico Pucamarca, y de esta evaluación se determinó el pH óptimo del proceso. En la tabla siguiente se exponen los diferentes parámetros que influyen en el control del efecto del pH en la adsorción del Arsénico As.

**Tabla 8 :** Efecto del PH para adsorción de AS.

Nº Muestras	[As] mg/L	Masa Cal (g)	Masa FeCl <sub>3</sub> (g)	pH	Agitación (min)	Temperatura (°C)
8	0.08	-----	-----	7,5 – 10	-----	25

FUENTE: Elaboración Propia.

### C. Efecto del tiempo de proceso

El efecto del tiempo de proceso se evaluó para determinar el tiempo de equilibrio que se debe alcanzar entre el adsorbente cal artesanal para la remoción del adsorbato As. Para el proceso se utilizaron 8 matraces Erlenmeyer, en cada uno de ellos se tomó un volumen de 100 ml de la solución de agua con contenido de As de 0.08 mg/L y a cada matraz se adicione cal CaO, con tamaño granulométrico de Malla 100 y oxidante FeCl<sub>3</sub> variando el rango de tiempo de agitación desde 10 a 50 minutos, proceso que se lleva a temperatura constante de 25 °C, para un tiempo y velocidad determinado de agitación, seguidamente el contenido de cada matraz se dejó sedimentar por un tiempo determinado y luego proceder a su filtración y de estos efluentes se tomaron muestras para su análisis de arsénico en el laboratorio de: SGS del Perú Laboratorio Químico Pucamarca, para determinar el tiempo óptimo de proceso. En la tabla siguiente se exponen los diferentes parámetros que influyen en el control del efecto del tiempo de proceso para la adsorción de Arsénico As.

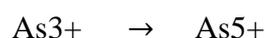
**Tabla 9:** Efecto de tiempo de contacto.

Nº Muestras	[As] mg/L	Volumen (mL)	Masa Cal (g)	Masa FeCl <sub>3</sub> (g)	pH	agitación (min)	Temperatura (°C)
8	0.08	100	-----	-----	----	-----	25

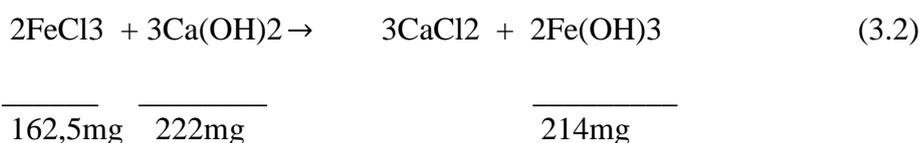
FUENTE: Elaboración Propia.

**D. Influencia de la cantidad del Oxidante FeCl<sub>3</sub>**

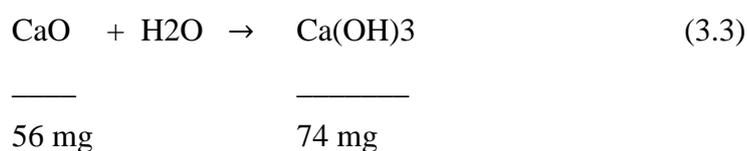
Para aguas de consumo humano Esparza (2004) indica que los materiales solidos que incluyen a floculos de Fe(OH)<sub>3</sub> y el de Al(OH)<sub>3</sub> adsorben al As en sus superficies y coprecipita con el Fe(OH)<sub>3</sub> o el de Al(OH)<sub>3</sub> o con oxidación con FeCl<sub>3</sub>, en el que el As (V) es adsorbido y coprecipitan a pH de 6,5 a 8 según las reacciones de:



Con respecto a la oxidación del arsénico As con FeCl<sub>3</sub> en medio del floculante con cal CaO, se tiene el siguiente proceso:

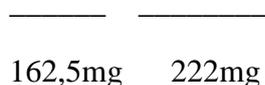


Se debe evaluar la dosis óptima de floculación con lechada de cal Ca(OH)<sub>3</sub>, y en base a este valor se determina la cantidad de cal CaO según la siguiente reacción química:



Evaluado la cantidad de Ca(OH)<sub>3</sub> en base a esta cantidad se determina la cantidad de CaO; y con este valor se determina la cantidad del oxidante FeCl<sub>3</sub> requerido para la

adsorción de As (III). En base a la siguiente reacción química se determina la cantidad del oxidante  $\text{FeCl}_3$



El valor del oxidante  $\text{FeCl}_3$  requerido para la adsorción de As (III), se adiciona a las pruebas de oxidación, floculación, sedimentación y filtración para la remoción del As (III) en muestras acuosas y de aguas superficiales de río.

### 3.3.2. Diseño experimental de la adsorción/precipitación del ion arsénico

Diseño experimental central compuesto ortogonal

### 3.3.3. Cinética de adsorción

El proceso experimental de la cinética de adsorción se ha realizado en base a la influencia de las variables de operación de: concentración de arsénico As (III) en la solución acuosa, cantidad de la adsorbente cal CaO, cantidad del oxidante  $\text{FeCl}_3$ , volumen definido de la solución acuosa y de las muestras del agua superficial de río, pH constante de la solución, temperatura del proceso, y homogenización mediante agitación; las variables se exponen en la siguiente tabla.

**Tabla 10:** Cinética de adsorción y variables experimentales de proceso.

N° Muestras	Volumen (mL)	Cantidad Sorbente (g/L)	Cantidad Oxidante (g/L)	Tiempo Agitación (min)	Temperatura (°C)
8	100	0,02	0,014	25	25

### Evaluación de la capacidad máxima de adsorción de As

La evaluación de la capacidad máxima de adsorción de arsénico As, se realizaron utilizando en 8 matraces Erlenmeyer de un volumen de 300 mL, para cada uno se tomaron un volumen de 100 mL de solución acuosa con concentración inicial  $C_o$  de As de 0.08 mg/L; a cada uno de los matraces se les adiciono a peso constante cantidades de adsorbente cal artesanal y del oxidante  $FeCl_3$ , con control de pH 8,5 constante, con agitación a velocidad constante de 200 rpm, por un tiempo determinado y al final del proceso los contenidos de los matraces se dejan sedimentar por un tiempo determinado y luego se someten a filtración cuyas muestras de estas son enviados para su análisis de arsénico As, en el laboratorio de: SGS del Perú Laboratorio Químico Pucamarca. Para evaluar la capacidad y el porcentaje de adsorción se emplearon las siguientes ecuaciones:

Capacidad de adsorción:

$$q = \frac{V * (C_o - C_f)}{W} \quad (3.5)$$

Donde:

q: Capacidad de adsorción de As (mg/g).

$C_o$ : Concentración inicial del adsorbato (mg/L).

$C_f$ : Concentración final del adsorbato (mg/L).

V: Volumen de la solución (L).

W: Cantidad de adsorbente cal CaO (g).

Porcentaje de adsorción:

$$\%A = \frac{(C_o - C_f)}{C_i} * 100 \quad (3.6)$$

Donde:

%A: Porcentaje de adsorción de As (%).

C<sub>o</sub>: Concentración inicial del adsorbato As (mg/L).

C<sub>f</sub>: Concentración final del adsorbato As (mg/L).

Rendimiento de la Remoción de Arsénico As

$$\%E = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} 100 \quad (3.7)$$

Donde:

%E: Porcentaje de remoción de As (%).

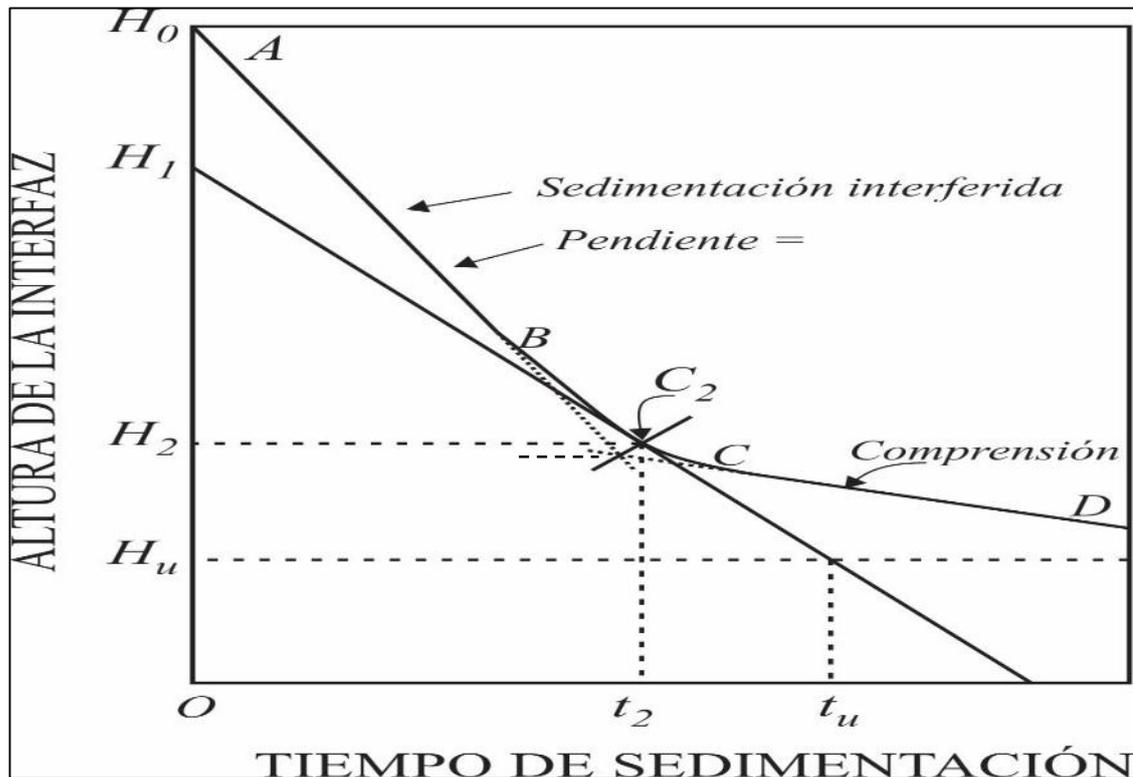
C<sub>o</sub>: Concentración inicial del adsorbato As (mg/L).

C<sub>f</sub>: Concentración final del adsorbato As (mg/L).

### 3.3.4. Evaluación de la sedimentación

Se realizaron en base a ensayos de sedimentación en flujo intermitente batch; para suspensión concentrada de flóculos a sedimentar, los que presentan interferencia en las trayectorias de velocidad de asentamiento de las partículas, definidos como sedimentación interferida que al final del proceso forman los lodos sedimentados. En la figura 6 se localizan las interfaces con respecto al tiempo: zona A–B asentamiento interferido de la interfaz líquido–partículas, con velocidad de asentamiento ( $v_s$ ); entre B–C, desaceleración o transición de compresión, en la zona C–D se forma la compresión del

manto de lodos. A medida que el tiempo pasa todas las zonas desaparecen excepto la que contiene líquido clarificado y la de lodos. Para este propósito se utilizan ensayos de sedimentación de flujo intermitente o batch para determinar el tiempo de residencia ( $t_u$ ) para la sedimentación tal como se expone en la figura 6



**Figura 6:** Curva de asentamiento para un ensayo de sedimentación en cochada.

### 3.3.5. Evaluación de la filtración grava-arena IF

#### Cálculos en el filtro de arena a presión constante

- Tamaño del grano de arena – Grava

La AWWA (2002) indica que el tamaño del grano de arena, se analiza y evalúa por medio de la norma de cribado norma Test C136 – 92 ASTM (American Society for Testing and Material).

$$d_{90} = d_{10}(10^{1.67 \log uc})$$

Ecuación N° 25

Donde:

$d_{90}$  = Tamaño de malla de tamiz de la alimentación que pasa el 90% de una malla por lo tanto es el diámetro o tamaño promedio del grano de arena en mm

$d_{10}$  = Tamaño de la malla del tamiz del producto, que pasa el 10% de una malla.

$uc$  = Coeficiente de uniformidad del grano de arena.

- Profundidad Equivalente para el lecho de arena esférica

Para arena fina ordinaria se tiene

$$L = \frac{(d_e)^{d_{10}}(1.80)}{d^2} \text{ (m)} \quad \text{Ecuación N° 26}$$

Donde:

$D$  = Diámetro de la columna del filtro

$L$  = Altura del lecho de arena (m)

$d_e$  = Diámetro promedio de la arena (mm)

$d_{10}$  = Diámetro de la arena que pasa la malla 10 en (mm)

Velocidad de Filtración ( $u$ )

Para evaluar la velocidad de filtración se tiene

$$u = \frac{p^3 \epsilon \times 10^{-3}}{5(1 - \epsilon)s^2 L(1 - \epsilon)\mu} \quad \text{Ecuación N° 27}$$

Donde:

$U$  = Velocidad lineal de filtración (m/s)

$S =$  Superficie específica del material granos de arena ( $m^2$ )

$L =$  Altura del lecho de arena (m)

$\epsilon =$  Porosidad ( $m^3$ ) de (40 – 50)%

$\mu =$  Viscosidad del fluido agua a temperatura ( $^{\circ}C$ )

$P =$  Presión de trabajo del reactor filtro en  $Kg/cm^2$

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se da a conocer los resultados y la discusión de resultados que se han obtenido de las pruebas experimentales de la remoción de arsénico As en muestra de disoluciones acuosas y de aguas superficiales por proceso de oxidación, floculación, sedimentación y filtración; las mismas que se exponen en tablas y figuras, que son interpretadas y discutidas en base a el marco teórico, marco conceptual y de antecedentes expuestos en el presente trabajo.

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CAL ARTESANAL

En la caracterización de la cal artesanal se han determinado sus componentes físico-químicos de:

- Componente Oxido de Calcio  $\text{CaO}$
- Componente hidróxido de Calcio  $\text{Ca(OH)}_2$
- Humedad
- Pureza de:

Oxido de Calcio %  $\text{CaO} = 55,52$

Hidróxido de Calcio %  $\text{Ca(OH)}_2 = 57,57$

Fuente: SGS Laboratorio Químico Pucamarca.

**Tabla 11:** Propiedades físicas y químicas del óxido de calcio CAO.

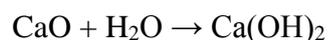
Formula Química	CaO
Peso molecular	56 g/mol
Estado	Sólido
Apariencia	Blanco
Densidad	0,69 g/ml
pH	11,80
Aluminio Al%	20,86
Magnesio Mg%	01,89
Hierro Fe%	01,12
Solubilidad en agua	1,5 g/L a 12 °C
Pureza cal útil %	55,52 %
Pureza Ca(OH) <sub>2</sub> %	57,57 %

FUENTE: Laboratorio Control de Calidad Facultad de Ingeniería Química UNA- Puno.

De la evaluación de los análisis de la cal CaO artesanal, expuestos en la tabla 4 se tiene el contenido de elementos químicos de aluminio 20,86%, magnesio 01,89% y hierro 01,12% y la pureza como hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub>; entre otros componentes químicos, cuyos contenidos de estos elementos y sustancias ayudan en la remoción de arsénico contenido en el agua.

#### 4.1.1. Tratamiento de la Cal CaO (Oxido de Calcio)

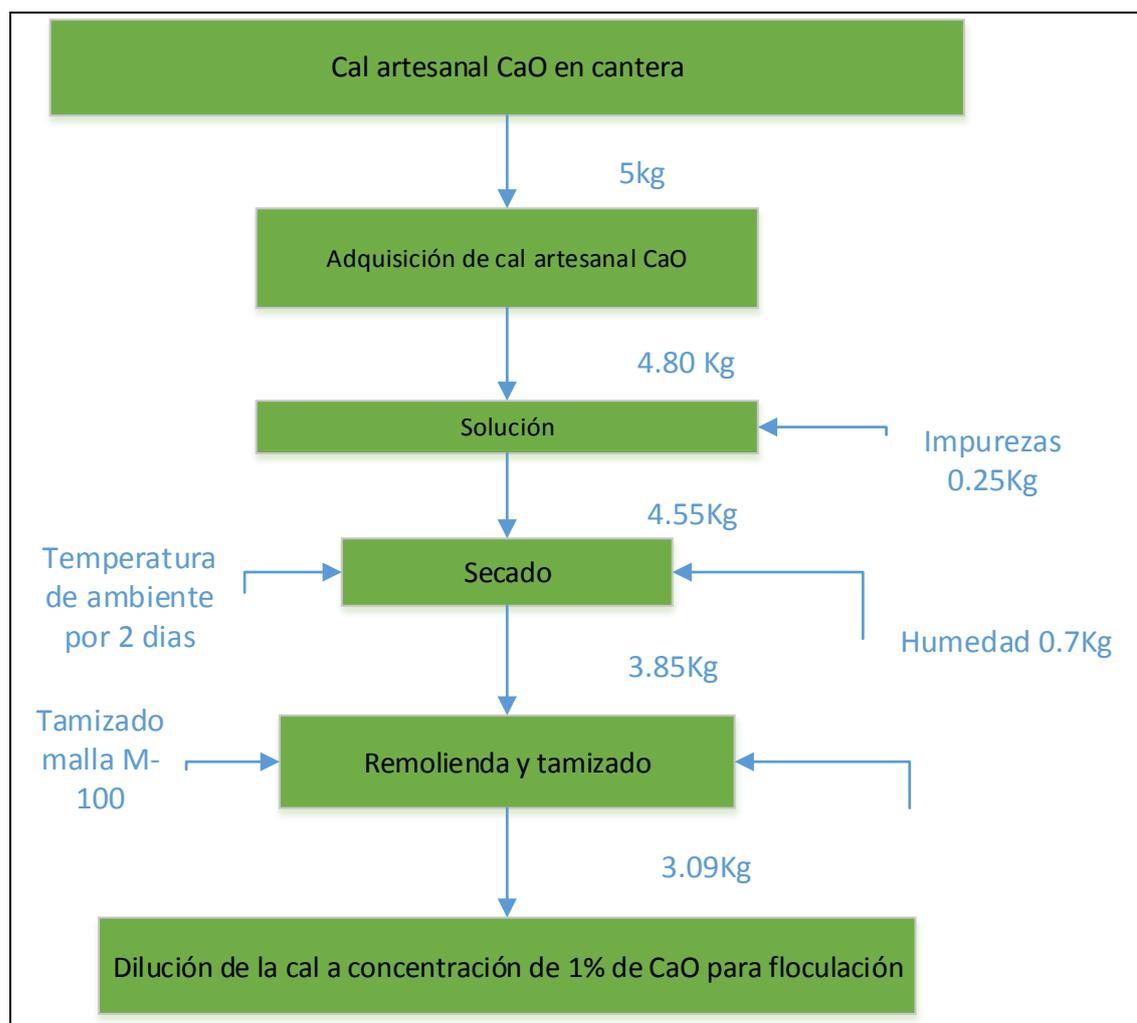
La cal artesanal CaO (Oxido de Calcio) como material adsorbente se ha seleccionado y sometido a la operación de remolienda y tamizado a malla M: 100 de la serie estándar ASTM de 0,147 mm de granulometría. A partir de la cal tamizada se prepararon disoluciones acuosas al 5% de concentración y por dilución contracciones al 1% de óxido de calcio cuyo producto viene a ser el hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub>, (Lechada de cal) según la siguiente reacción química.



*Ecuación N° 28*

#### 4.1.2. Tratamiento físico - químico de la cal CaO

Para el tratamiento físico - químico de la cal artesanal, se realizó las siguientes operaciones: Adquisición de la materia prima, selección, secado, remolienda, tamizado y preparación de disoluciones al 1% de cal para procesos de floculación.



**Figura 7:** Balance de materia del tratamiento de la cal artesanal cao.

#### 4.1.4. Disoluciones de Hidróxido de Calcio Ca(OH)<sub>2</sub>

Se prepararon dos clases de disoluciones de cal CaO de concentración al 5% y por dilución, cal CaO al 1%.

- Dilución de cal CaO, al 5%:

Datos:

Volumen V: 1 L

[CaO]: al 1%

Pureza CaO: 55,52%

Procedimiento.

- Para una concentración de disolución del 5%, Pesar 5g de Cal y disolver en 100 ml de agua, que equivale a pesar 50 g de Cal y disolver en 1 litro de agua.
- Para la pureza de la cal CaO del 55,52 %; se debe recalcular el peso de la cal CaO:

$$\frac{50g}{0,5552L} = 90,06g/L \quad \text{Ecuación N° 29}$$

Pesar 90,06 gramos de cal impura y disolver en un litro de agua, por lo tanto se tendrá una disolución de cal CaO al 5%.

- Disolución de cal CaO, al 1%:

Datos:

Volumen V: 2 L

[CaO]: al 1%

Procedimiento.

- Para una concentración de disolución del 1%, se procederá a obtener por dilución, a partir de la disolución de concentración del 5%, según la siguiente ecuación:

$$V1C1 = V2C2$$

$$V1 [5\%] = (2000 \text{ mL}) [1\%]$$

$$V1 = 400 \text{ mL}$$

Tomar 400 mL de la disolución del 5% de concentración de cal y diluir con agua hasta 2 litros y tendremos disolución de cal de concentración al 1%.

- Se debe tener en cuenta que: cada 1 mL de la disolución de cal al 1% de concentración contiene 10 mg de cal por litro de disolución
- Con la disolución de cal al 1% de concentración se dosifico y determino la dosis optima de cal en forma de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Método test Jarr) o lechada de cal listo para la floculación del agua con contenido de arsénico As.

#### **4.2. CARACTERIZACIÓN DE AGUA SUPERFICIAL DE RIO CONTAMINADA CON ARSENICO**

- Muestreo de agua superficial de rio

La toma de muestras de agua superficial se realizó en recipientes de polietileno de alta densidad, lavados previamente en el laboratorio con solución de ácido nítrico al 1%, de acuerdo al protocolo de muestreo. Las muestras se tomaron próximas al centro del cauce del rio a una altura del 60% de la profundidad. Se zonifico y determino el punto de muestreo en la Unión de los ríos Llallimayo y Macarimayo, afluentes de descarga al rio Ayaviri en coordenadas UTM, X: 314682,62m Y: 8362441,88m Hemisferio: Sur, a 72 km de la ciudad de Ayaviri, en la Provincia Melgar Región Puno.

- Accesibilidad

La vía de acceso principal a la zona de muestreo de agua, es por la carretera Afirmada Ayaviri – Ocuvi, a 72 kilómetros de la ciudad de Ayaviri:

- Características Físico – Químicas del Agua superficial de río

Los análisis físico-químicos de la muestra de agua superficial de río se realizaron en los laboratorios de la empresa SGS Laboratorio Químico Pucamarca.

**Tabla 12:** Características físico – químicas de agua superficial del río ayaviri.

PARAMETROS	Unidad de Medida	L.M.P. D.S. 031 – 2010 SA.	VALORES OBTENIDOS
Turbidez	NTU	5	2.80
Potencial de Hidrogeno	pH	6.5-8.5	7.21
Conductividad eléctrica	uS/cm	1500	1311
Solidos Totales Disueltos	mg/L	1000	395
Temperatura	°C	-	13.50
Arsénico	mg/L	0.01	0.080

FUENTE: Laboratorio SGS Del Perú. Laboratorio Químico Pucamarca, Tacna.

Los valores obtenidos del control de calidad del agua que se muestran en la tabla 4.1, respecto a los parámetros de Turbidez, Potencial de Hidrogeno pH, Conductividad eléctrica, Solidos Totales Disueltos y Temperatura, los valores de control de calidad reportan concentraciones menores respecto a los valores de los límites máximos permisibles L.M.P. D.S. 031– 2010 SA, y D.S. 004-2017 MINAN, calificados como agua no apta para consumo humano; debido a la alta concentración de arsénico As (As: 0,08 mg/L), valor que supera a los L.M.P. (0,01 mg/L), por lo tanto el agua es calificado como agua no apto para consumo humano.

#### 4.3. PROCESO DE ADSORCIÓN DE ARSÉNICO DE MUESTRAS DE AGUA POR OXIDACIÓN, FLOCULACION, SEDIMENTACION Y FILTRACIÓN

Las pruebas experimentales de adsorción de arsénico de muestras de agua por oxidación, floculación, sedimentación y filtración; se realizaron siguiendo el siguiente procedimiento:

- Las pruebas experimentales de adsorción de arsénico se realizaron mediante procesos en discontinuo o batch.
- Se han utilizado disoluciones acuosas con agua destilada, conteniendo arsénico As (III) con concentraciones de 0,08 mg/L y así mismo se tomaron muestras de agua superficial de río con contenido contaminante de arsénico As (III).
- Las pruebas experimentales se realizaron en tres etapas:
  - Etapa de Oxidación con cloruro férrico  $\text{FeCl}_3$
  - Etapa de floculación con cal  $\text{CaO}$  artesanal
  - Etapa de Sedimentación y filtración.
- Las pruebas Oxidación, floculación se realizaron a nivel de laboratorio y las pruebas de Sedimentación y filtración se realizaron a nivel de planta piloto en el equipo de sedimentación y filtración en columna IF.
- Se determinaron las variables que más influyen para el proceso de adsorción siendo los siguientes parámetros: Cantidad del oxidante y del floculante en mg/L, pH del proceso, tiempo de adsorción y tiempo de sedimentación en minutos.

#### **4.3.1. Evaluación de las variables influyentes en el proceso de remoción de arsénico en disoluciones acuosas y aguas superficiales de río**

Se evaluaron las variables influyentes en el proceso de adsorción para remoción del arsénico As, por oxidación con cloruro férrico  $\text{FeCl}_3$ , floculación con cal  $\text{CaO}$  artesanal, sedimentación y filtración en columna IF, grava-arena. Las pruebas se realizaron con la finalidad de obtener el valor cuantificable favorable para el proceso de adsorción y remoción del arsénico As en soluciones acuosas y muestra de agua superficial del río Ayaviri.

##### **A. Efecto de la cantidad de adsorbente cal $\text{CaO}$**

Las pruebas se realizaron en ocho matraces Erlenmeyer de 300 mL; se tomaron 100 mL de agua que contiene 0,08 mg As(III)/L y diferentes cantidades en peso del floculante cal  $\text{CaO}$  artesanal de granulometría de malla 100, en base al ensayo de las pruebas de jarras o test jarr, cuya dosis óptima determinado corresponde a 2 mililitros de floculante por litro (del 1% de cal) para muestra de agua con arsénico, valor equivalente a que cada mililitro del floculante contiene 10 mg del floculante cal por cada litro de agua (10 mg/L); por lo tanto para la dosis óptima de 2 mL/L le corresponde el peso base de 2 mg  $\text{CaO}/100\text{mL}$ . En base a esta cantidad base de cal se tomaron valores de 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2; 2,5; 3 y 4 mg de cal por 100 mL de disolución de agua con 0,08 mg As/L, así mismo se adiciono 1,46 mg del oxidante  $\text{FeCl}_3$  por cada por 100 mL de muestra de agua; se trabajó a temperatura constante de 25 °C con agitación de 200 rpm durante 25 minutos, a pH 8,5 constante. El contenido de cada matraz se dejó precipitar durante 30 min y seguidamente se filtró y se llevó para su análisis de arsénico al laboratorio de la EPS SEDA JULIACA. Las pruebas experimentales se muestran en la tabla 13 (ver Anexo 3).

**Tabla 13:** Efecto de las cantidades de cal cao para adsorción de as en muestras acuosas.

N	W (g/L)	Co (mg/L)	Cf (mg/L)	q (mg/g)	A(%)
1	0.012	0.08	0.010	0.49	73.50
2	0.014	0.08	0.020	0.43	75.00
3	0.016	0.08	0.020	0.40	75.00
4	0.018	0.08	0.010	0.38	87.50
5	0.020	0.08	0.010	0.35	87.50
6	0.025	0.08	0.010	0.28	87.50
7	0.030	0.08	0.015	0.22	81.25
8	0.040	0.08	0.010	0.17	87.50

FUENTE: Elaboración propia.

Donde:

n: N° de experimentos

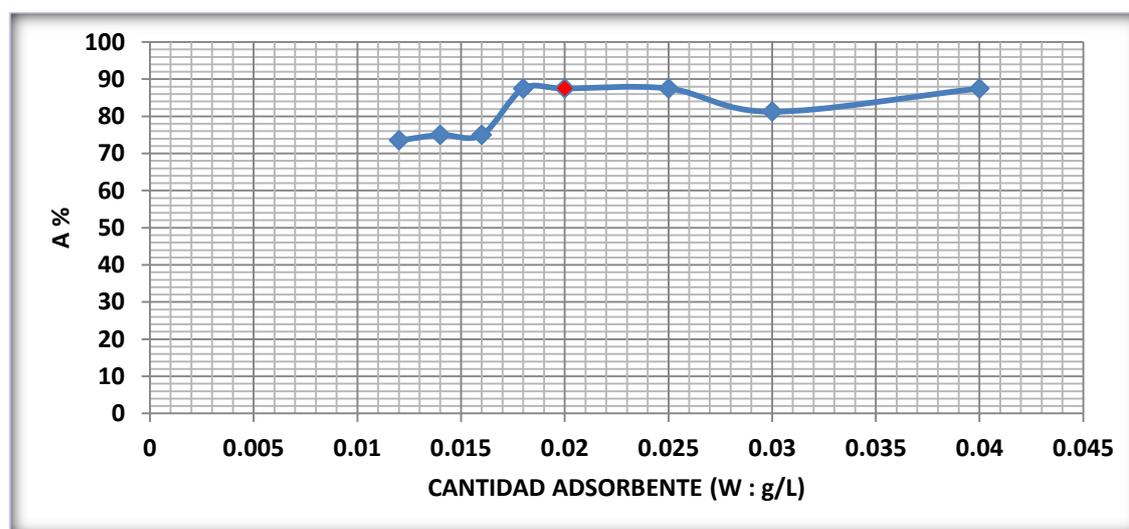
W: Masa del adsorbente Cal CaO (g/L)

Co: Concentración inicial de As (mg/L)

Cf: Concentración final de As (mg/L)

q: Capacidad de adsorción (mg/L, mg de As por g de adsorbente cal)

A%: % de adsorción de Arsénico As.



**Figura 8:** Efecto de cantidades de cal cao para adsorción de as en muestras acuosas.

Figura 9 nos muestra el proceso de adsorción de As (III) a diferentes cantidades de adsorbente cal y el valor de 0,02 g/L muestra el % de adsorción más alto de As (85,7% A). Por lo tanto para las pruebas experimentales se consideró el peso óptimo del sorbente cal en la cantidad de 0,02 g/L.

**Tabla 14:** Análisis estadístico de cal cao para adsorción de as en muestras acuosas.

Código	niveles	W (g/L)	Co (mg/L)	Cf (mg/L)	q (mg/g)	A(%)
v-1	1	0.012	0.08	0.01	0.49	73.5
v-2		0.014	0.08	0.02	0.43	75
v-3	2	0.016	0.08	0.02	0.4	75
v-4		0.018	0.08	0.01	0.38	87.5
v-5	3	0.02	0.08	0.01	0.35	87.5
v-6		0.025	0.08	0.01	0.28	87.5
v-7	4	0.03	0.08	0.015	0.22	81.25
v-8		0.04	0.08	0.01	0.17	87.5

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

**Tabla 15:** Tabla a nova para CF (MG/L) POR W (G/L).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.000034375	3	0.0000114583	0.41	0.7567
Intra grupos	0.0001125	4	0.000028125		
Total (Corr.)	0.000146875	7			

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

La tabla ANOVA descompone la varianza de Cf (mg/L) en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 0.41, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Cf (mg/L) entre un nivel de W (g/L) y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

**Tabla 16:** Pruebas de múltiple rangos para CF (MG/L) POR W (G/L).

Método: 95.0 porcentaje LSD

W (g/L)	Casos	Media	Grupos Homogéneos
3	2	0.01	X
4	2	0.0125	X
2	2	0.015	X
1	2	0.015	X

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95.0% de confianza

**Tabla 17:** Tabla anova para Q (MG/G) POR W (G/L).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Entre grupos</b>	0.0771	3	0.0257	18.04	0.0087
<b>Intra grupos</b>	0.0057	4	0.001425		
<b>Total (Corr.)</b>	0.0828	7			

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

La tabla ANOVA descompone la varianza de q (mg/g) en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 18.0351, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de q (mg/g) entre un nivel de W (g/L) y otro, con un nivel del 95.0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, seleccione Pruebas de Múltiples Rangos, de la lista de Opciones Tabulares.

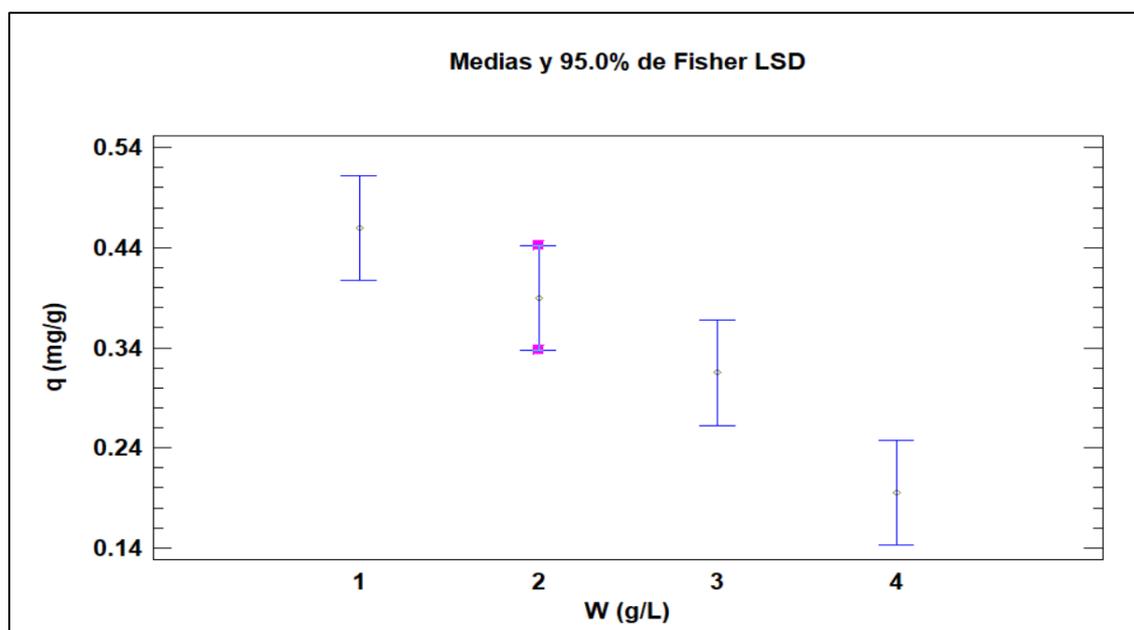
**Tabla 18:** Pruebas de múltiple rangos para Q (MG/G) POR W (G/L).

Método: 95.0 porcentaje LSD

W (g/L)	Casos	Media	Grupos Homogéneos
4	2	0.195	X
3	2	0.315	X
2	2	0.39	XX
1	2	0.46	X

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 4 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. tal como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 9:** Diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles.

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

### 4.3.2. Efecto de pH

El efecto del pH para la adsorción del As con cal artesanal se evaluó en soluciones acuosas y muestras de agua con concentración de 0,08 mg/L de As (III), utilizando adsorbente cal artesanal con peso constante de 0,02 mg/L y 14,6 mg/L del oxidante FeCl<sub>3</sub>; para las pruebas se utilizaron 8 matraces Erlenmeyer de 300 mL, adicionándoles a cada uno de ellos 100 mL de agua que contiene 0,08 mg As(III)/L; para valores de pH de: 6; 8; 8,5; 9; 9,18; 9,30; 9,50 y 10,00 a una temperatura de 25 °C, con un tiempo de agitación por 25 minutos a una velocidad de 200 rpm. El contenido de cada matraz se dejó sedimentar durante 30 minutos y luego se filtró y de esta se tomaron muestras para su análisis de arsénico en el laboratorio de: SGS del Perú Laboratorio Químico Pucamarca; los resultados de las pruebas experimentales se muestran en la tabla 14, (ver Anexo 6).

**Tabla 19:** Efecto de diferentes PH para adsorción de as en muestras acuosas y agua superficial del rio Ayaviri.

n	pH	Co (mg/L)	Cf (mg/L)	q (mg/g)	A(%)
1	6.00	0.08	0.016	0.32	80.00
2	8.00	0.08	0.009	0.35	88.75
3	8.50	0.08	0.009	0.35	88.75
4	9.00	0.08	0.010	0.35	87.50
5	9.18	0.08	0.013	0.33	58.75
6	9.30	0.08	0.013	0.33	58.75
7	9.50	0.08	0.017	0.32	60.00
8	10.00	0.08	0.020	0.30	62.50
Mco		0.08			
Mcf			0.012	0.34	85.00

FUENTE: Elaboración propia.

Donde:

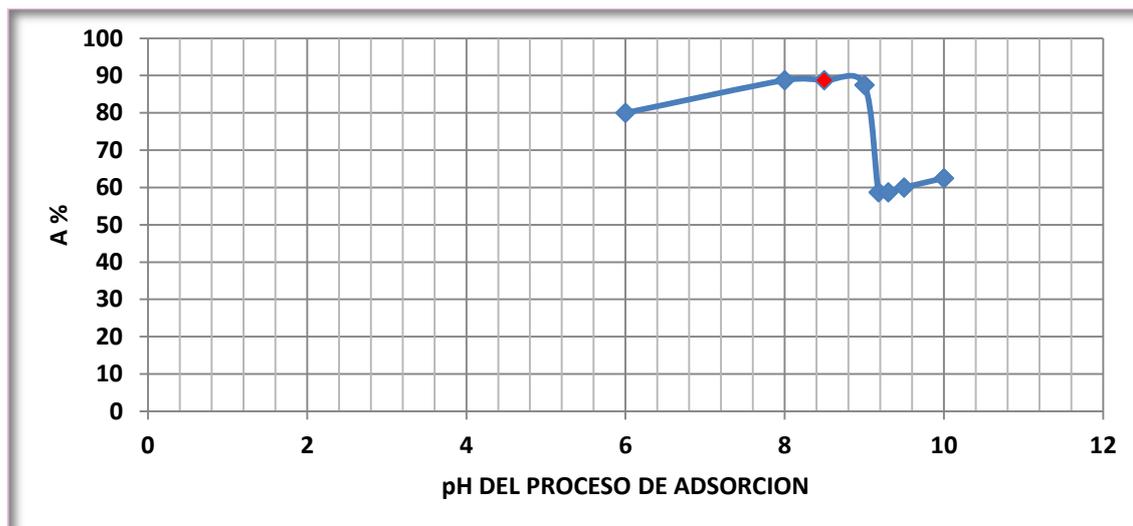
n: N° de experimentos

pH: Potencial de hidrogenión

Co: Concentración inicial de As (mg/L)

Cf: Concentración final de As (mg/L)

q: Capacidad de adsorción (mg/L, mg de As por g de adsorbente cal)



**Figura 10:** Efecto del PH para adsorción de as en muestras acuosas.

En la figura 9, se observa que el proceso de adsorción del As (III) por la masa del adsorbente cal CaO a pH: 6 medio ácido muestra una adsorción en bajas valores debido a la existencia de cantidades de iones  $H_3O^+$  en la disolución, lo que hace que compiten con el  $As^{3+}$  y a medida que aumenta el pH, también aumenta la cantidad adsorbido de As(III), debido a la disolución de  $Ca(OH)_2$  que es de pH básico, alcanzando a remover valores altos de As, del 88,75 %A, a pH: 8,50 con altas cantidades de capacidad de adsorción q: 0,35 mg/g.

**Tabla 20:** Análisis estadístico de PH para adsorción de as en muestras acuosas y agua superficial del rio Ayaviri.

n	niveles	pH	Co (mg/L)	Cf (mg/L)	q (mg/g)	A(%)
1	1	6	0.08	0.016	0.32	80
2		8	0.08	0.009	0.35	88.75
3	2	8.5	0.08	0.009	0.35	88.75
4		9	0.08	0.01	0.35	87.5
5	3	9.18	0.08	0.013	0.33	58.75
6		9.3	0.08	0.013	0.33	58.75
7	4	9.5	0.08	0.017	0.32	60
8		10	0.08	0.02	0.3	62.5

FUENTE: Elaboración Propia.

**Tabla 21:** Tabla anova para CF (MG/L) POR PH.

Fuente	Suma de	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Entre grupos</b>	0.000084375	3	0.000028125	3.81	0.1144
<b>Intra grupos</b>	0.0000295	4	0.000007375		
<b>Total (Corr.)</b>	0.000113875	7			

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

La tabla ANOVA descompone la varianza de Cf (mg/L) en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 3.81, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Cf (mg/L) entre un nivel de pH y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

**Tabla 22:** Tabla anova para Q (MG/G) POR PH.

Fuente	Suma de	Gl	Cuadrado	Razón-F	Valor-P
<b>Entre</b>	0.0016375	3	0.000545833	3.36	0.1362
<b>Intra grupos</b>	0.00065	4	0.0001625		
<b>Total</b>	0.0022875	7			

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

La tabla ANOVA descompone la varianza de q (mg/g) en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este

caso es igual a 3.36, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de  $q$  (mg/g) entre un nivel de pH y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

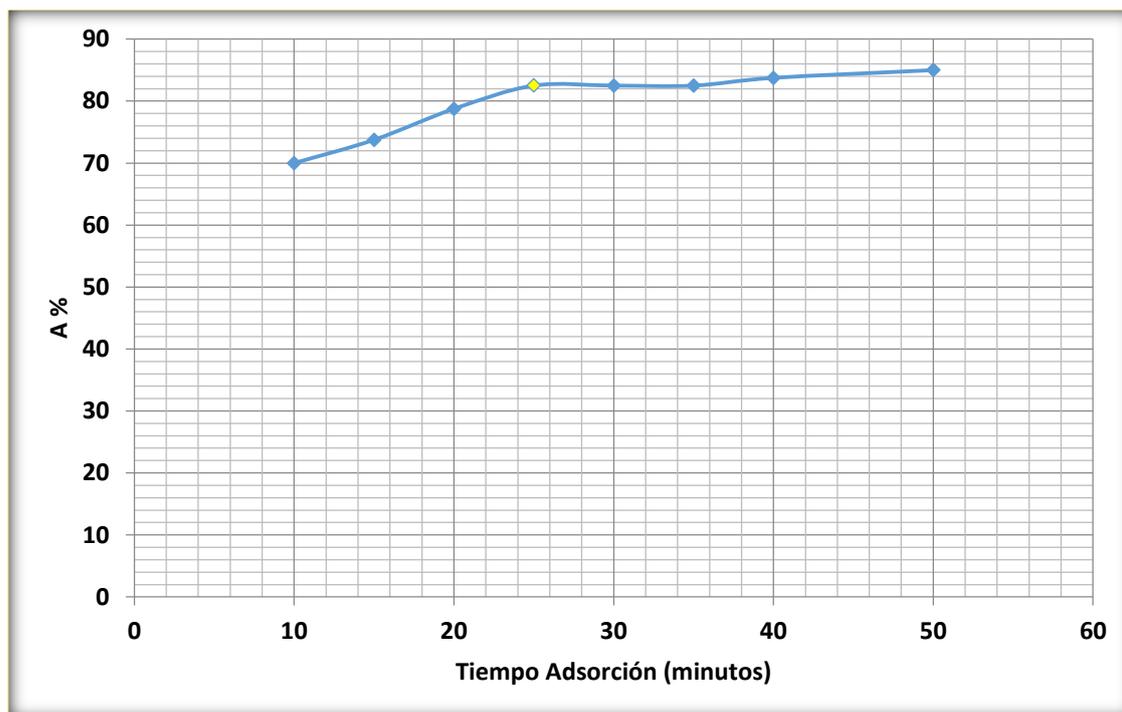
#### 4.3.3. Efecto del tiempo de proceso para remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río

El efecto del tiempo de proceso se evaluó para determinar el tiempo de equilibrio que se debe alcanzar entre el adsorbente cal artesanal para la remoción del adsorbato As. Para el proceso se utilizaron 8 matraces Erlenmeyer, en cada uno de ellos se tomó un volumen de 100 ml de la solución de agua con contenido de As de 0.08 mg/L y a cada matraz se le adiciono 0,20 mg del adsorbente cal CaO, con tamaño granulométrico de Malla 100 y 1,46 mg del oxidante  $FeCl_3$  variando el rango de tiempo de agitación de 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 y 50 minutos a temperatura de 25 °C, para un tiempo de agitación por 25 minutos a una velocidad de agitación de 200 rpm, el contenido de cada matraz se dejó sedimentar por 30 min y luego se filtró y de esta se tomaron muestras para su análisis de arsénico en el laboratorio de: SGS del Perú Laboratorio Químico Pucamarca. En la tabla 8 se muestran los resultados experimentales del tiempo de proceso para remoción del arsénico, los resultados experimentales se muestran en la tabla 15, (ver Anexo 4).

**Tabla 23:** Efecto de tiempo de contacto.

N	t (min)	Co (mg/L)	Cf (mg/L)	q (mg/g)	%A
1	10	0.08	0.024	0.028	70.00
2	15	0.08	0.021	0.029	73.75
3	20	0.08	0.017	0.031	78.75
4	25	0.08	0.014	0.033	82.50
5	30	0.08	0.014	0.033	82.50
6	35	0.08	0.014	0.033	82.50
7	40	0.08	0.013	0.034	83.75
8	50	0.08	0.012	0.034	85.00
M(Rio)		0.08	0.01		86.25

FUENTE: Elaboración Propia.



**Figura 11:** Efecto del tiempo de proceso para remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río.

FUENTE: Elaboración Propia.

En la figura 10 se observa que el proceso de adsorción del As (III) por la masa del adsorbente cal CaO que en el tiempo de 25 minutos alcanza el equilibrio a una capacidad de adsorción de 0,033 mg/g arsénico, adsorbente cal; por lo tanto se toma un tiempo de 25 minutos para el proceso de remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales del río Ayaviri.

**Tabla 24:** Análisis de varianza del efecto del tiempo de proceso para remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río.

n	Niveles	t (min)	Co (mg/L)	Cf (mg/L)	q (mg/g)	%A
1	1	10	0.08	0.024	0.028	70
2		15	0.08	0.021	0.029	73.75
3	2	20	0.08	0.017	0.031	78.75
4		25	0.08	0.014	0.033	82.5
5	3	30	0.08	0.014	0.033	82.5
6		35	0.08	0.014	0.033	82.5
7	4	40	0.08	0.013	0.034	83.75
8		50	0.08	0.012	0.034	85

FUENTE: Elaboración Propia.

**Tabla 25:** Tabla anova para CF (MG/L) POR T (MIN).

Fuente	Suma de	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.000117375	3	0.000039125	16.47	0.0102
Intra grupos	0.0000095	4	0.000002375		
Total (Corr.)	0.000126875	7			

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

La tabla ANOVA descompone la varianza de Cf (mg/L) en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 16.47, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Cf (mg/L) entre un nivel de t (min) y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

**Tabla 26:** Pruebas de múltiple rangos para CF (MG/L) POR T (MIN).

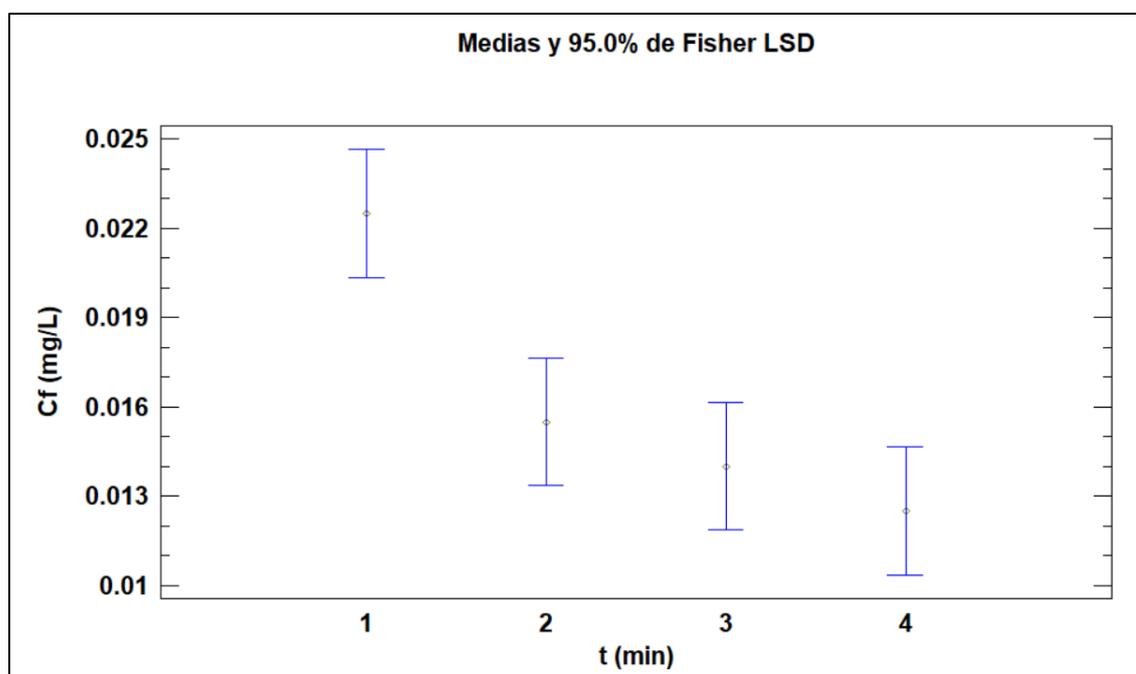
Método: 95.0 porcentaje LSD

t (min)	Casos	Media	Grupos Homogéneos
4	2	0.0125	X
3	2	0.014	X
2	2	0.0155	X
1	2	0.0225	X

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las

medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. Tal como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 12:** Diferencias estadísticamente del tiempo vs concentración de As.

FUENTE: Elaboración Propia.

**Tabla 27:** Tabla anova para Q (MG/G) POR T (MIN).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.000034375	3	0.0000114583	18.33	0.0084
Intra grupos	0.0000025	4	6.25E-7		
Total (Corr.)	0.000036875	7			

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

La tabla ANOVA descompone la varianza de q (mg/g) en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 18.3333, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia

estadísticamente significativa entre la media de  $q$  (mg/g) entre un nivel de  $t$  (min) y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

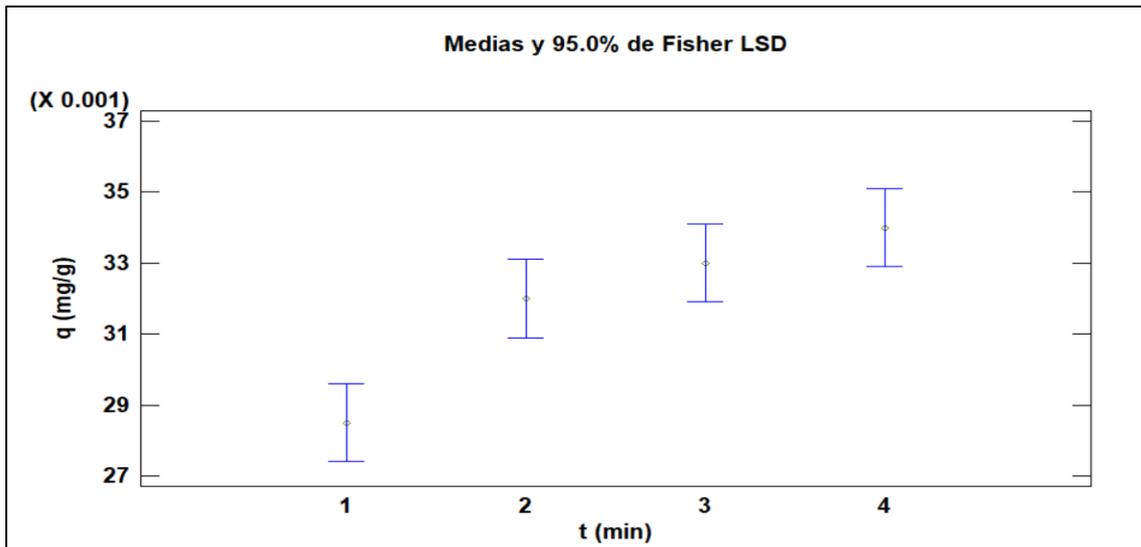
**Tabla 28:** Pruebas de múltiple rangos para  $Q$  (MG/G) POR  $T$  (MIN).

Método: 95.0 porcentaje LSD

$t$ (min)	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1	2	0.0285	X
2	2	0.032	X
3	2	0.033	X
4	2	0.034	X

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 3 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. Tal como se aprecia en el siguiente figura.

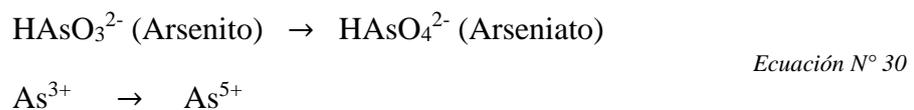


**Figura 13:** Diferencias estadísticamente del tiempo Vs concentración de As.

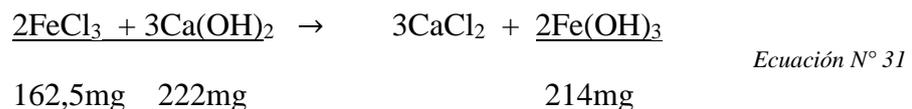
FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

**4.3.4. Influencia de la cantidad del oxidante fecl3 para proceso de remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río**

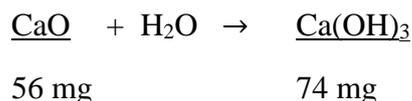
Esparza (2004) indica que los materiales solidos que incluyen a floculos de Fe(OH)<sub>3</sub> y el de Al(OH)<sub>3</sub> adsorben al As en sus superficies y coprecipita con el Fe(OH)<sub>3</sub> o el de Al(OH)<sub>3</sub> en el que el As (V) se adsorbe y coprecipitan a pH de 6,5 a 8 según las reacciones de:



Con respecto a la oxidación del arsénico As con FeCl<sub>3</sub> en medio del floculante con cal CaO, se tiene el siguiente proceso:

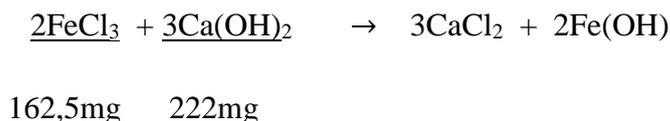


Para la dosis óptima para la floculación con lechada de cal Ca(OH)<sub>3</sub> que fue de 2ml/L, equivalente a 20mg/L de Ca(OH)<sub>3</sub> en base a este valor se determina la cantidad de cal CaO según la siguiente reacción química:



Ecuación N° 32

Para 20 mg/L de Ca(OH)<sub>2</sub> se requiere 15,135 mg/L de CaO; con este valor se determina la cantidad del oxidante FeCl<sub>3</sub> requerido para la adsorción de As (III), que en base a la siguiente reacción química se determina la cantidad del oxidante FeCl<sub>3</sub>.



Ecuación N° 33

Para 20 mg/L de Ca(OH)<sub>2</sub> se requiere 14,64 mg/L de FeCl<sub>3</sub>; que es el valor del oxidante FeCl<sub>3</sub> requerido para la adsorción de As (III), valor que se adiciona a las pruebas de oxidación, floculación, sedimentación y filtración para la remoción del As (III) desde aguas superficiales de río.

#### **4.4. REMOCIÓN DE ARSÉNICO AS DE DISOLUCIONES ACUOSAS Y AGUAS SUPERFICIALES DE RÍO POR PROCESO DE OXIDACIÓN, FLOCULACIÓN, SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN**

##### **4.4.1. Remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación y floculación**

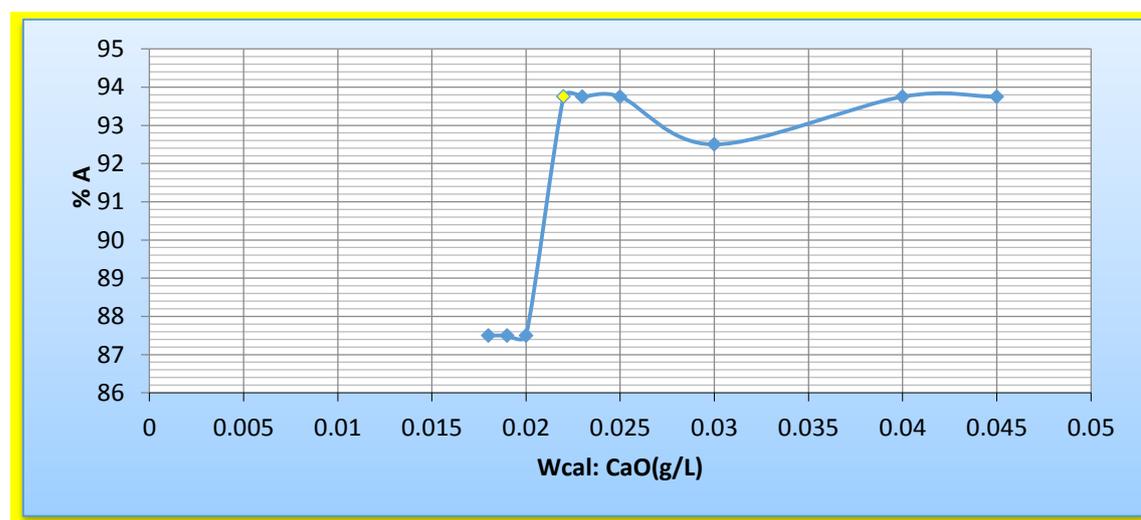
Las pruebas se realizaron en ocho matraces Erlenmeyer de 300 mL; se tomaron 100 mL de agua que contiene Co: 0,08 mg As(III)/L y diferentes cantidades en peso del floculante cal CaO artesanal de valores próximos al valor determinado al ensayo de las pruebas de jarras o test jarr, cuya dosis optima corresponde a 2 mililitros de floculante por litro (del 1% de cal) equivalente a 2 mg CaO/100mL (0,02g/L CaO) para muestra de agua con arsénico; en base a esta cantidad de cal se tomaron valores comprendidos entre la cantidad de 0,018 a 0,045 g CaO/L adsorbente que se disolvió 100 mL de disolución de agua con 0,08 mg As/L, así mismo se adiciono en peso constante 14,6 mg/L del

oxidante  $\text{FeCl}_3$  para cada muestra; se trabajó a temperatura constante de  $25\text{ }^\circ\text{C}$  y agitación constante de 200 rpm durante 25 minutos, a pH 8,5 constante. El contenido de cada matraz se dejó precipitar durante 30 min y se llevó para su análisis de arsénico al laboratorio de la EPS SEDA JULIACA. Las pruebas experimentales se muestran en la tabla 16 y la figura 11, (ver Anexo 5).

**Tabla 29:** Remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación constante y floculación.

Código	n	W cal (g/L)	W $\text{FeCl}_3$ (mg/L)	Co (As) (mg/L)	Cf (As) (mg/L)	q (mg/g)	% A
18	1	0.018	14.64	0.08	0.01	0.38	87.5
19	2	0.019	14.64	0.08	0.01	0.36	87.5
20	3	0.020	14.64	0.08	0.01	0.35	87.5
21	4	0.022	14.64	0.08	0.005	0.34	93.75
22	5	0.023	14.64	0.08	0.005	0.326	93.75
23	6	0.025	14.64	0.08	0.005	0.3	93.75
24	7	0.030	14.64	0.08	0.007	0.243	91.25
25	8	0.040	14.64	0.08	0.005	0.187	93.75
26	9	0.045	14.64	0.08	0.005	0.166	93.75
27	Mco			0.078			
28	Mcf				0.005	0.365	93.58

FUENTE: Elaboración Propia.



**Figura 14:** Remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación constante y floculación.

FUENTE: Elaboración Propia.

Donde:

n: N° de experimentos

W cal: Masa de adsorbente Cal CaO (g/L)

W FeCl<sub>3</sub>: Masa de oxidante Cloruro férrico FeCl<sub>3</sub> (mg/L) Masa Constante

Co: Concentración inicial de As (mg/L)

Cf: Concentración final de As (mg/L)

q: Capacidad de adsorción (mg/L, mg de As por g de adsorbente cal)

A%: % de adsorción de Arsénico As.

t: Tiempo de proceso con agitación constante (minutos)

En la Tabla 9 y figura 12, se reportan los resultados del proceso de adsorción máxima de As (III) por la masa del adsorbente cal CaO de 0,022 g/L, a pH 8,5 y para una cantidad constante de 14,4 mg/L del oxidante cloruro férrico FeCl<sub>3</sub>, con un proceso con agitación por un tiempo de 25 minutos, alcanzándose el equilibrio de adsorción con una capacidad de 0,37 mg/g, miligramo de arsénico adsorbido por gramo de adsorbente cal, valor equivalente a una adsorción de arsénico As del 93,75 %A; por lo tanto para pruebas posteriores se debe tomar una cantidad de 0,022 g/L de cal CaO, para el proceso de remoción de arsénico de disoluciones acuosas y para aguas superficiales del río Ayaviri.

**Tabla 30:** Análisis estadístico para remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación constante y floculación.

n	niveles	W cal (g/L)	W FeCl3 (mg/L)	Co (As) (mg/L)	Cf (As) (mg/L)	q (mg/g)	% A
1		0.018	14.64	0.08	0.01	0.38	87.5
2	1	0.019	14.64	0.08	0.01	0.36	87.5
3		0.02	14.64	0.08	0.01	0.35	87.5
4		0.022	14.64	0.08	0.005	0.34	93.75
5	2	0.023	14.64	0.08	0.005	0.326	93.75
6		0.025	14.64	0.08	0.005	0.3	93.75
7		0.03	14.64	0.08	0.007	0.243	91.25
8	3	0.04	14.64	0.08	0.005	0.187	93.75
9		0.045	14.64	0.08	0.005	0.166	93.75

FUENTE: Elaboración Propia.

**Tabla 31:** Tabla anova para CF (MG/L) POR W CAL (G/L).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.0000442222	2	0.0000221111	49.75	0.0002
Intra grupos	0.00000266667	6	4.44444E-7		
Total (Corr.)	0.0000468889	8			

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

La tabla ANOVA descompone la varianza de Cf (mg/L) en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 49.75, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Cf (mg/L) entre un nivel de W cal (g/L) y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

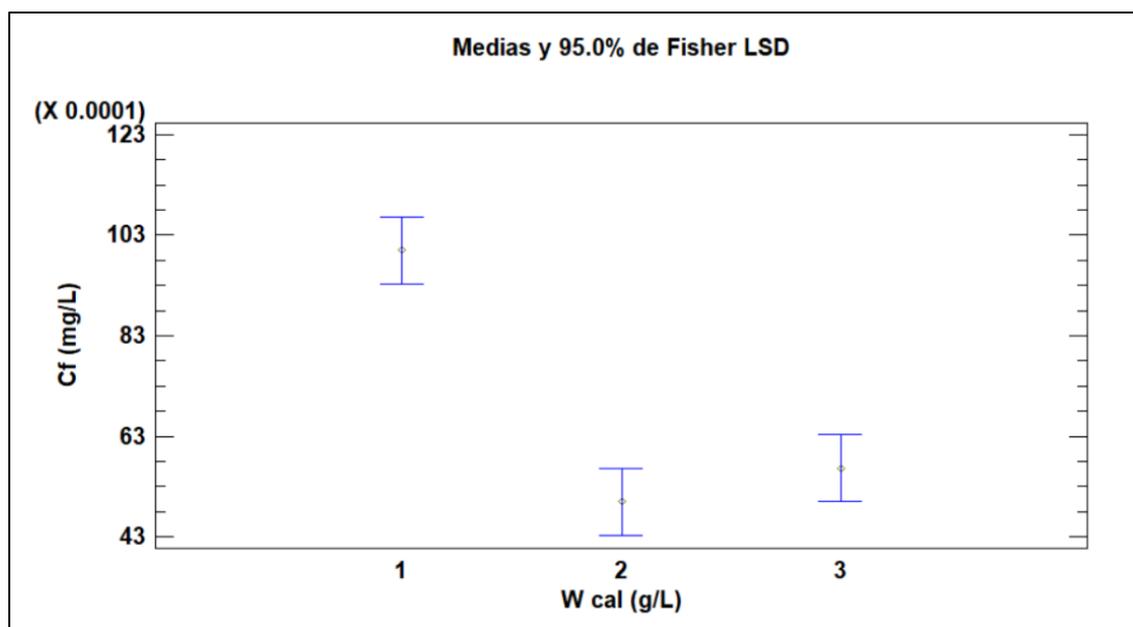
**Tabla 32:** Pruebas de múltiple rangos para CF (MG/L) POR W CAL (G/L)

Método: 95.0 porcentaje LSD

W cal (g/L)	Casos	Media	Grupos Homogéneos
2	3	0.005	X
3	3	0.00566667	X
1	3	0.01	X

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. Tal como se muestra en el siguiente figura.



**Figura 15:** Diferencias estadísticamente del tiempo vs concentración de As.

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.0.

**Tabla 33:** Tabla anova para Q (MG/G) POR W CAL (G/L).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.0440347	2	0.0220173	29.62	0.0008
Intra grupos	0.00445933	6	0.000743222		
Total (Corr.)	0.048494	8			

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

La tabla ANOVA descompone la varianza de q (mg/g) en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 29.62, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de q (mg/g) entre un nivel de W cal (g/L) y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

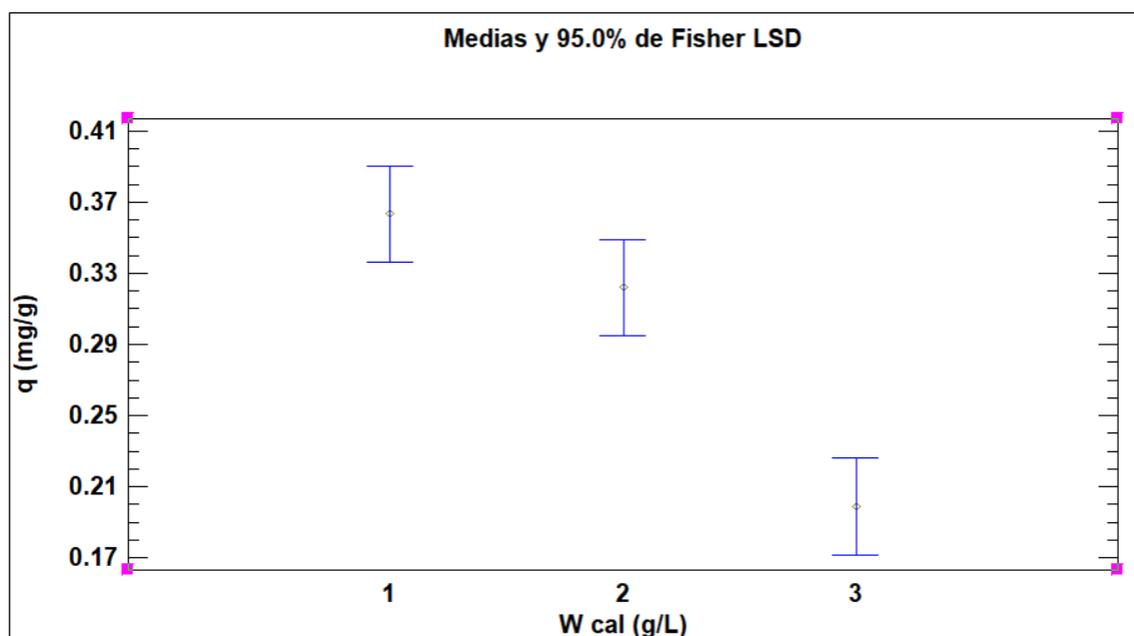
**Tabla 34:** Pruebas de múltiple rangos para Q (MG/G) POR W CAL (G/L).

Método: 95.0 porcentaje LSD

W cal (g/L)	Casos	Media	Grupos Homogéneos
3	3	0.198667	X
2	3	0.322	X
1	3	0.363333	X

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. Tal como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 16:** Diferencias estadísticamente de cal VS concentración de As.

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.0.

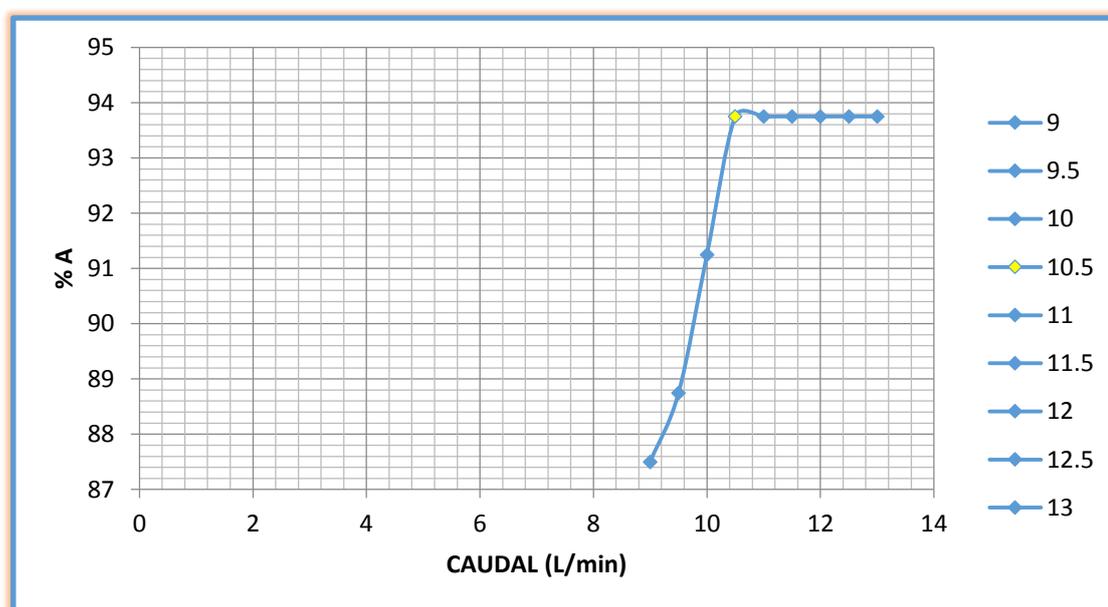
#### 4.4.2. Remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación, floculación y filtración

Las pruebas se realizaron en ocho volúmenes de 20 Litros de agua con concentración inicial de Co: 0,08 mg As(III)/L y las cantidades constantes de 0,022 g/L en peso del adsorbente-floculante cal CaO artesanal determinado en la prueba de oxidación constante y floculación, así mismo se adiciono 14,6 mg/L del oxidante  $\text{FeCl}_3$  para cada volumen muestra; se trabajó a temperatura constante de 25 °C y a agitación de 200 rpm durante 25 minutos, a pH 8,5 constante. Para el proceso de filtración en columna de grava y arena se filtraron a velocidades de flujo variable de 9,0 - 9,5 -10 - 10,5 – 11 – 11,5 – 12 -12,5 y 13 L/minuto; luego las muestras se llevaron para su análisis de arsénico al laboratorio de la EPS SEDA JULIACA. Las pruebas experimentales se muestran en la tabla 10 y figura 13.

**Tabla 35:** Remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación, floculación y filtración.

Código	n	Caudal (L/min)	W cal (g/L)	W FeCl3 (mg/L)	Co (As) (mg/L)	Cf (As) (mg/L)	q (mg/g)	% A
9	1	9	0.022	14.64	0.08	0.01	0.410	87.5
10	2	9.5	0.022	14.64	0.08	0.009	0,394	88.75
11	3	10	0.022	14.64	0.08	0.007	0.375	91,25
12	4	10.5	0.022	14.64	0.08	0.005	0.340	93.75
13	5	11	0.022	14.64	0.08	0.005	0.326	93.75
14	6	11.5	0.022	14.64	0.08	0.005	0.300	93.75
15	7	12	0.022	14.64	0.08	0.005	0.250	93.75
16	8	12.5	0.022	14.64	0.08	0.005	0.187	93.75
17	9	13	0.022	14.64	0.08	0.005	0.166	93.75
9	Mco	10.5	0.022	14.64	0.078			
10	Mcf	10.5	0.022			0.005	0.331	93.75

FUENTE: Elaboracion Propia.



**Figura 17:** Remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación, floculación y filtración.

FUENTE: Elaboración Propia.

En la tabla 17 y la figura 12, se reportan los resultados del proceso de adsorción máxima de As (III) por la masa del adsorbente cal CaO de 0,022 g/L, a pH 8,5 y para una cantidad constante de 14,4 mg/L del oxidante cloruro férrico FeCl<sub>3</sub>, con un proceso con agitación por un tiempo de 25 minutos, alcanzándose el equilibrio de adsorción con una capacidad de 0,34 mg/g, miligramo de arsénico adsorbido por gramo de adsorbente cal, valor equivalente a una adsorción de arsénico As del 93,75 %A; por el proceso de oxidación-floculación y filtración en columna para un volumen de 20 litros de soluciones acuosas y muestras de agua superficial del río Ayaviri. Por lo tanto para pruebas posteriores se debe tomar un flujo de caudal de 10,5 L/min, para lograr el mayor % de adsorción de Arsénico de soluciones acuosas y muestras de agua.

**Tabla 36:** Análisis de varianza para la remoción de arsénico de disoluciones acuosas y aguas superficiales de río por proceso de oxidación, floculación y filtración.

n	niveles	Caudal (L/min)	W cal (g/L)	W (mg/L)	Co (As) (mg/L)	Cf (As) (mg/L)	q (mg/g)	% A
1	1	9	0.022	14.64	0.08	0.01	0.41	87.5
2		9.5	0.022	14.64	0.08	0.009	0,394	88.75
3		10	0.022	14.64	0.08	0.007	0.375	91,25
4	2	10.5	0.022	14.64	0.08	0.005	0.34	93.75
5		11	0.022	14.64	0.08	0.005	0.326	93.75
6		11.5	0.022	14.64	0.08	0.005	0.3	93.75
7	3	12	0.022	14.64	0.08	0.005	0.25	93.75
8		12.5	0.022	14.64	0.08	0.005	0.187	93.75
9		13	0.022	14.64	0.08	0.005	0.166	93.75

FUENTE: Elaboración Propia.

**Tabla 37:** Tabla anova para CF (AS) (MG/L) POR CAUDAL (L/MIN)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>Entre grupos</b>	0.0000268889	2	0.0000134444	17.29	0.0032
<b>Intra grupos</b>	0.00000466667	6	7.77778E-7		
<b>Total (Corr.)</b>	0.0000315556	8			

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

La tabla ANOVA descompone la varianza de Cf (As) (mg/L) en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 17.2857, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Cf (As) (mg/L) entre un nivel de Caudal (L/min) y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

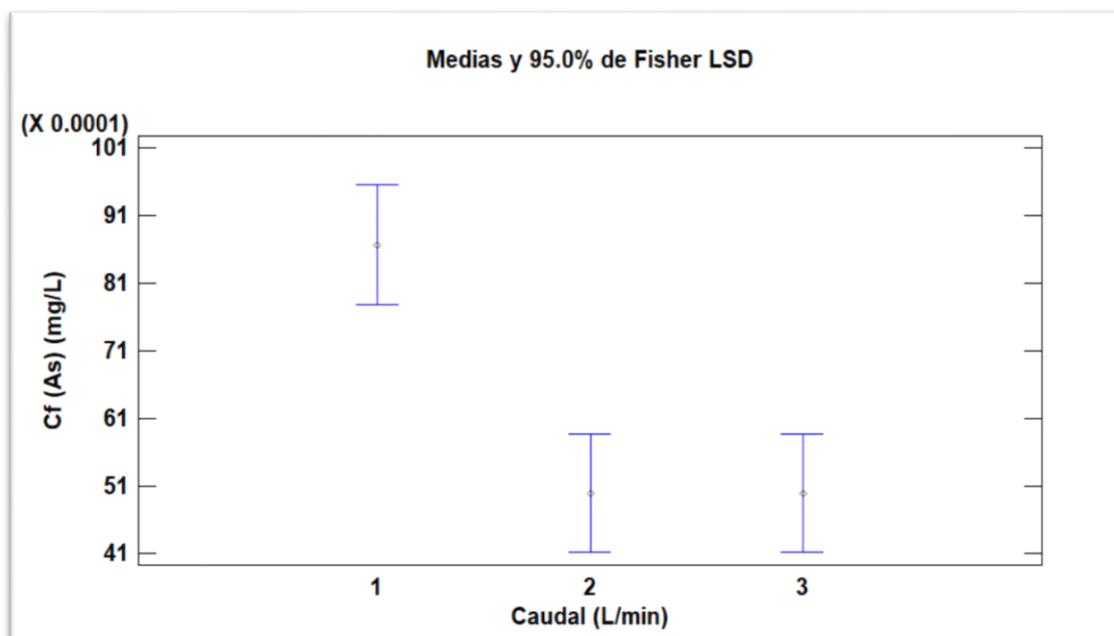
**Tabla 38:** Pruebas de múltiple rangos para CF (AS) (MG/L) Por caudal (L/MIN).

Método: 95.0 porcentaje LSD

Caudal (L/min)	Casos	Media	Grupos Homogéneos
2	3	0.005	X
3	3	0.005	X
1	3	0.00866667	X

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95.0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. Tal como se muestra en el siguiente figura.



**Figura 18:** Diferencias estadísticamente de caudal vs concentración de As.

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.0.

**Tabla 39:** Tabla anova para Q(MG/G) Por caudal (L/MIN).

Fuente	Suma de	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	34497.0	2	17248.5	1.00	0.4212
Intra grupos	103285.	6	17214.1		
<b>Total (Corr.)</b>	<b>137782.</b>	<b>8</b>			

FUENTE: Salida STATGRAPHICS Centurion XVI Version 16.1.03.

La tabla ANOVA descompone la varianza de q(mg/g) en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 1.002, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de q(mg/g) entre un nivel de Caudal (L/min) y otro, con un nivel del 95.0% de confianza.

#### 4.5. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES

En el siguiente cuadro se muestra el resumen de las muestras que no pasaron el límite máximo permisible (ver Anexo 3-7).

**Tabla 40:** Resumen límites máximos permisibles.

	Muestra	As	límite máximo permisible	Niveles (Para el análisis Estadístico)
<b>Efecto de Cal CaO para absorción de As</b>	M-1	0.01	Si	1
	M-2	0.02	No	
	M-3	0.02	No	2
	M-4	0.01	Si	
	M-5	0.01	Si	3
	M-6	0.01	Si	
	M-7	0.015	No	4
	M-8	0.01	Si	
<b>Efecto de pH para la absorción de As</b>	M-1	0.016	No	1
	M-2	0.009	Si	
	M-3	0.009	Si	2
	M-4	0.01	Si	
	M-5	0.013	No	3
	M-6	0.013	No	
	M-7	0.017	No	4
	M-8	0.02	No	
<b>Efecto del tiempo</b>	Mco	0.08	No	-
	T-10	0.024	No	1
	T-15	0.021	No	
	T-20	0.017	No	2
	T-25	0.014	No	
	T-30	0.014	No	3
	T-35	0.014	No	
	T-40	0.013	No	4
	T-50	0.012	No	
	<b>Oxidación constante y Floculación</b>	V-1	0.01	Si
V-2		0.01	Si	1
V-3		0.01	Si	
V-4		0.005	Si	
V-5		0.005	Si	2
V-6		0.005	Si	
V-7		0.007	Si	
V-8		0.005	Si	3
V-9		0.005	Si	
Mco		0.078	No	-
<b>Efecto de caudal</b>	V-1- Cau	0.01	Si	
	V-2- Cau	0.009	Si	1
	V-3- Cau	0.007	Si	
	V-4- Cau	0.005	Si	
	V-5- Cau	0.005	Si	2
	V-6- Cau	0.005	Si	
	V-7- Cau	0.005	Si	
	V-8- Cau	0.005	Si	3
	V-9- Cau	0.005	Si	
	mcf- Cau	0.005	Si	-

#### 4.6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

- Al evaluar el efecto de la cantidad de adsorbente cal CaO. Se dio como resultado que las cantidades aplicadas proporcionan el mismo efecto en la absorción de As. Al igual que en el efecto del Ph. Por lo que se recomienda usar las cantidades mínimas ya que se obtendrá el mismo resultado, se llegó a una remoción del As de 87.5 %, en cuanto al efecto de pH. Se dio como resultado que las cantidades aplicadas proporcionan el mismo efecto, llegando a una remoción del As de 88.75 %, a su vez se llega a un resultado similar con (Ahoranta, Kokko, Papirio, Özkaya, y Puhakka, 2016) en donde obtuvo una eliminación de arsénico de 99.5%, 80.1% y 7.1%, si embargo los resultados de (Adriana Saldaña-Robles *et al.*, 2018) sugieren la necesidad de incluir los efectos de la materia orgánica en todos los análisis posteriores de eliminación de arsénico
- En cuanto al efecto del tiempo de proceso para remoción de arsénico si existe un efecto significativo entre los niveles 1(10-15 min) con el resto sin embargo entre los niveles 2(20-25 min),3(30-35 min),4(40-50 min) estos proporcionan el mismo efecto. Por lo cual se recomienda tomar en cuenta el tiempo de 210 min, llegando a una remoción del As de 82.5 %, más en la investigación de (Mohora *et al.*, 2018) sugiere El cambio de polaridad del electrodo de Fe el cual a los 30 min controló exitosamente la pasivación de los electrodos de Fe
- En el análisis para la remoción de arsénico para CF (MG/L) por W CAL (G/L) si existe diferencia significativa entre los niveles 1(0.018 - 0.02 g/l W cal) con el resto sin embargo los niveles 2(0.022 - 0.025 g/l W cal)) y 3(0.03 – 0.045 g/l W cal)) proporcionan el mismo efecto, por lo cual se recomienda usar una concentración de W cal de 0.022 g/l. llegando a una remoción del As de 93.75 %,

superando a (Zhu, Qiao, Ye y Yan, 2018) que obtuvo una alta eficacia de eliminación de As (III) (91,6%) y a (Rodríguez, 2008). Uq que obtuvo una remoción de 75% de As mas no a Franco, Carro y Magali (2014) que obtuvo una remoción de 95% con floculante

- En el análisis para la remoción de arsénico para CF (AS) (MG/L) por caudal (L/MIN) si existe diferencia significativa entre los niveles 1(9-10min) y el resto mas no entre los nivele 2 (10.5 – 11.5 min) y 3 (12 – 13 min). Por los que se recomiendo tomar en cuenta un caudal de 10.5 (L/min), llegando a una remoción del As de 93.75 %.

Mohora *et al.* (2018) fue capaz de eliminar un 96% de As, sin embargo (Nidheesh y Singh, 2017) sugiere la utilización de la electrocoagulación usando varios ánodos de metal de sacrificio como aluminio, hierro, magnesio, etc. efectiva para la descontaminación de arsénico.

## V. CONCLUSIONES

**PRIMERA:** En la caracterización del floculante cal CaO se determinó una pureza del 52,52 % de óxido de calcio CaO. Para la oxidación óptima de arsénico As, se utilizó 14,64 mg/L de FeCl<sub>3</sub>. Para la remoción del As, se filtró en columna de grava y arena IF, a un caudal de 10,5 L/min; lográndose una remoción de arsénico As, del 93,75% en soluciones acuosas y en muestras de agua superficial del río Ayaviri. Los resultados cuentan con valores menores a las Normas Nacionales de Calidad Ambiental de Límites Máximo Permisibles LMP ECA 004-2017. MINAM.

**SEGUNDA:** El rendimiento de la remoción de As, de soluciones acuosas y en muestras de agua superficial del río Ayaviri, fue del 93,75% de absorción de As, para ambas muestras; para el cual se utilizó 14,64 mg/L de FeCl<sub>3</sub> para el proceso de oxidación; 0,022 g/L, de óxido de calcio CaO para floculación; utilizando un tiempo de 25 minutos para sedimentación y su posterior filtración en columna de grava-arena IF tratado a un caudal de 10,5 L/min.

**TERCERA:** Según Normas Nacionales D.S. N° 004-2017 MINAM, el LMP, para contenido de As, en aguas naturales para consumo humano, 0,01 mg/L. En muestras de aguas del río Ayaviri sin tratamiento se determinó 0,078 mg/L de As, y con tratamiento por proceso de adsorción se logró hasta 0,005 mg/L de As, con una remoción del 93,75 % de As; valor por debajo de los LMP; utilizando procesos de oxidación con FeCl<sub>3</sub>, floculación con óxido de calcio CaO, sedimentación y filtración en columna de grava y arena IF.

## VI. RECOMENDACIONES

**PRIMERA:** Se recomienda para futuras investigación realizar un diseño experimental multifactorial o mejor aún un diseño experimental greco latino.

**SEGUNDA:** Se sugiere también incluir efectos de la materia orgánica.

**TERCERA:** Como variable interviniente se sugiere la utilización de electrocoagulación usando varios ánodos de metal de sacrificio como aluminio, hierro, magnesio, etc.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Adriano, C. (2001). Arsenic. In *Trace elements in terrestrial environments* (pp. 219–261). Springer.
- Ahoranta, H., Kokko, E., Papirio, S., Özkaya, B. y Puhakka, A. (2016). *Arsenic removal from acidic solutions with biogenic ferric precipitates*. *Journal of Hazardous Materials*, 306, 124–132.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.012>
- Albores, A., Quintanilla, B., Razo, L. y Cebrián, M. (1997). Capítulo 15: Arsénico. *Introducción a La Toxicología Ambiental*. Retrieved from  
<http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-03a15.pdf>
- Azqueta, D., Ramírez, A. y Villalobos, D. (2007). *Introducción a la economía ambiental*.
- Banerji, T. y Chaudhari, S. (2016). *Arsenic removal from drinking water by electrocoagulation using iron electrodes- an understanding of the process parameters*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(4), 3990–4000.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.09.007>
- Baran, J. (1995). *Química bioinorgánica*. McGraw-Hill Madrid, Spain:
- Bissen, M. y Frimmel, H. (2003). Arsenic—a review. Part I: occurrence, toxicity, speciation, mobility. *CLEAN—Soil, Air, Water*, 31(1), 9–18.
- Buchet, P. y Lison, D. (2000). *Clues and uncertainties in the risk assessment of arsenic in drinking water*. *Food and Chemical Toxicology*, 38, S81–S85.
- Caussy, D., Gochfeld, M., Gurzau, E., Neagu, C. y Ruedel, H. (2003). *Lessons from case studies of metals: investigating exposure, bioavailability, and risk*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 56(1), 45–51.

- Crites, R., Tchobanoglous, G. y Camargo, M. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*.
- Fan, S., Tseng, C., Li, C. y Hou, H. (2016). *Electro-removal of arsenic(III) and arsenic(V) from aqueous solutions by capacitive deionization*. *Journal of Hazardous Materials*, 312(Iii), 208–215.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.055>
- Guzmán, G., Granada, V. y Calderon, A. (2014). *Eficiencia de remoción en sistemas de tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (Coffea arabica)*. *Colombia Forestal*, 17(2), 151–159.  
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a02>
- Hashim, A., Kundu, A., Mukherjee, S., Mukhopadhyay, S., Redzwan, G. y Sen, B. (2018). *Arsenic removal by adsorption on activated carbon in a rotating packed bed*. *Journal of Water Process Engineering*, (March), 0–1.  
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.03.006>
- He, Y., Liu, J., Han, G. y Chung, S. (2018). *Novel thin-film composite nanofiltration membranes consisting of a zwitterionic co-polymer for selenium and arsenic removal*. *Journal of Membrane Science*.  
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.055>
- Kamde, K., Pandey, A., Thul, T., Dahake, R., Shinde, M. y Bansawal, A. (2018). *Microbially assisted arsenic removal using Acidithiobacillus ferrooxidans mediated by iron oxidation*. *Environmental Technology and Innovation*, 10, 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.01.010>
- Koellensperger, G., Nurmi, J., Hann, S., Stingeder, G., Fitz, J. y Wenzel, W. (2002). *CE-ICP-SFMS and HPIC-ICP-SFMS for arsenic speciation in soil solution and soil water extracts*. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17(9), 1042–1047.

- Kundu, K., Gupta, A., Mol, J., Rahman, M. y Van, D. (2018). *Experimenting with a novel technology for provision of safe drinking water in rural Bangladesh: The case of sub-surface arsenic removal (SAR)*. *Technology in Society*.  
<https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2018.01.010>
- Lepp, W. (1981). *Copper*. In *Effect of heavy metal pollution on plants* (pp. 111–143). Springer.
- Li, D., Guo, X., Tian, Q., Xu, Z., Xu, R. y Zhang, L. (2017). *Synthesis and application of Friedel's salt in arsenic removal from caustic solution*. *Chemical Engineering Journal*, 323, 304–311. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.073>
- Linlin, H., Wang, N., Wang, C. y Li, G. (2018). *Arsenic removal from water and river water by the combined adsorption - UF membrane process*. *Chemosphere*.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.159>
- Lu, W. hong. y Yin, Z. lan. (2016). *Study on thermal decomposition and arsenic removal of a silver bearing copper ore*. *International Journal of Mineral Processing*, 153, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.05.016>
- Luong, T., Cañas, E., Hellriegel, U., Luu, L., Hoinkis, J. y Bundschuh, J. (2018). *Iron-based subsurface arsenic removal technologies by aeration: A review of the current state and future prospects*. *Water Research*, 133, 110–122.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.007>
- Ma, D., Wu, H., Deng, Y. y Zhao, X. (2018). *Arsenic removal from water by nanometer iron oxide coated single-wall carbon nanotubes*. *Journal of Molecular Liquids*, 259(2017), 369–375. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.03.052>
- Mandal, K. y Suzuki, T. (2002). *Arsenic round the world: a review*. *Talanta*, 58(1), 201–235.

- Mandal, P., Debbarma, R., Saha, A. y Ruj, B. (2016). *Disposal Problem of Arsenic Sludge Generated During Arsenic Removal from Drinking Water*. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 943–949.  
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.084>
- Matschullat, J. (2000). Arsenic in the geosphere—a review. *Science of the Total Environment*, 249(1–3), 297–312.
- Meek, E. y Hughes, K. (1992). *Arsenic in the general environment evaluation of risks to health*. In International seminar proceeding. arsenic in the environment and its incidence on health. Vol. 1, pp. 173–181.
- Mohora, E., Rončević, S., Agbaba, J., Zrnić, K., Tubić, A. y Dalmacija, B. (2018). *Arsenic removal from groundwater by horizontal-flow continuous electrocoagulation (EC) as a standalone process*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.042>
- Molina-Morales, Y., Flores-García, M., Balza-Quintero, A., Benítez-Díaz, P. y Miranda-Contreras, L. (2012). *Niveles de plaguicidas en aguas superficiales de una región agrícola del estado Mérida, Venezuela, entre 2008 y 2010*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(4), 289–301.
- Nidheesh, V. y Singh, A. (2017). *Arsenic removal by electrocoagulation process: Recent trends and removal mechanism*. *Chemosphere*, 181, 418–432.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.082>
- Prum, C., Dolphen, R. y Thiravetyan, P. (2018). *Enhancing arsenic removal from arsenic-contaminated water by Echinodorus cordifolius–endophytic Arthrobacter creatinolyticus interactions*. *Journal of Environmental Management*, 213, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.060>

- Queirolo, F., Stegen, S., Restovic, M., Paz, M., Ostapczuk, P., Schwuger, J. y Munoz, L. (2000). *Total arsenic, lead, and cadmium levels in vegetables cultivated at the Andean villages of northern Chile*. *Science of the Total Environment*, 255(1–3), 75–84.
- Rodriguez, R., Basta, T., Casteel, W., Armstrong, P. y Ward, C. (2003). *Chemical extraction methods to assess bioavailable arsenic in soil and solid media*. *Journal of Environmental Quality*, 32(3), 876–884.
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E. y Ortiz-Hernández, A. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(3), 157–167.
- Saldaña-Robles, A., Damian-Ascencio, E., Guerra-Sanchez, J., Saldaña-Robles, L., Saldaña-Robles, N., Gallegos-Muñoz, A. y Cano-Andrade, S. (2018). Effects of the presence of organic matter on the removal of arsenic from groundwater. *Journal of Cleaner Production*, 183, 720–728.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.161>
- Saldaña-Robles, A., Saldaña-Robles, N., Saldaña-Robles, L., Damian-Ascencio, C., Rangel-Hernández, H. y Guerra-Sanchez, R. (2017). Arsenic removal from aqueous solutions and the impact of humic and fulvic acids. *Journal of Cleaner Production*, 159, 425–431. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.074>
- Shannon, L. y Strayer, S. (1989). Arsenic-induced skin toxicity. *Human Toxicology*, 8(2), 99–104.
- Smedley, L. y Kinniburgh, G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517–568.

- Smith, H., Arroyo, P., Mazumder, N., Kosnett, J., Hernandez, L., Beeris, M. y Moore, E. (2000). *Arsenic-induced skin lesions among Atacameno people in Northern Chile despite good nutrition and centuries of exposure*. *Environmental Health Perspectives*, 108(7), 617.
- Tripathi, D., Srivastava, S., Mishra, S., Singh, N., Tuli, R., Gupta, K. y Maathuis, M. (2007). *Arsenic hazards: strategies for tolerance and remediation by plants*. *Trends in Biotechnology*, 25(4), 158–165.
- Tseng, P. (1977). *Effects and dose-response relationships of skin cancer and blackfoot disease with arsenic*. *Environmental Health Perspectives*, 19, 109.
- Yoon, Y., Zheng, M., Ahn, T., Park, K., Yang, S. y Kang, W. (2017). *Synthesis of magnetite/non-oxidative graphene composites and their application for arsenic removal*. *Separation and Purification Technology*, 178, 40–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.01.025>
- Zhang, H. y Selim, M. (2008). *Reaction and transport of arsenic in soils: equilibrium and kinetic modeling*. *Advances in Agronomy*, 98, 45–115.
- Zhang, M., Jia, J., Huang, K., Hou, X. y Zheng, C. (2018). *Facile electrochemical synthesis of nano iron porous coordination polymer using scrap iron for simultaneous and cost-effective removal of organic and inorganic arsenic*. *Chinese Chemical Letters*, 29(3), 456–460.  
<https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2017.09.062>
- Zhang, X., Fang, X., Li, J., Pan, S., Sun, X., Shen, J. y Zhao, S. (2018). *Developing new adsorptive membrane by modification of support layer with iron oxide microspheres for arsenic removal*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 514, 760–768. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.01.002>

- Zhao, Y., Qiu, W., Yang, C. y Wang, J. (2017). Removal of arsenic from flue gas by using NaClO solution. *Chemical Engineering Journal*, 309, 1–6.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.007>
- Zhou, E., Fan, X., Dong, L., Zhao, Y., Yang, X., Duan, C. y Liu, Q. (2018). Process optimization for arsenic removal of fine coal in vibrated dense medium fluidized bed. *Fuel*, 212(June 2017), 566–575. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.085>
- Zhu, N., Qiao, J., Ye, Y. y Yan, T. (2018). *Synthesis of mesoporous bismuth-impregnated aluminum oxide for arsenic removal: Adsorption mechanism study and application to a lab-scale column*. *Journal of Environmental Management*, 211, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.049>
- Zhu, N., Zhang, J., Tang, J., Zhu, Y. y Wu, Y. (2018). *Arsenic removal by periphytic biofilm and its application combined with biochar*. *Bioresource Technology*, 248, 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.026>
- Zwiener, C. y Frimmel, H. (2004). *LC-MS analysis in the aquatic environment and in water treatment—a critical review*. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 378(4), 851–861.

# ANEXOS

- Anexo 1:** Cal artesanal del distrito de Samán provincia de San Román - Región Puno
  
- Anexo 2:** Aguas Naturales del rio Ayaviri provincia det Melgar distrito de Ayaviri, Región - Puno
  
- Anexo 3:** Efecto de Cal Cao para adsorción de As en agua superficial del Rio Ayaviri
  
- Anexo 4:** Efecto de tiempo en agua superficial del Rio Ayaviri
  
- Anexo 5:** Oxidación Constante y Floculación en agua superficial del Rio Ayaviri
  
- Anexo 6:** Efecto de pH para adsorción de As en agua superficial del Rio Ayaviri
  
- Anexo 7:** Efecto del Caudal en agua superficial del Rio Ayaviri

**Anexo 1.** Cal artesanal del distrito de Samán provincia de San Román - Región Puno

**SGS**  
SGS del Perú S.A.C  
Laboratorio Químico Pucamarca

SOLICITANTE: ANALI PARY HILARI Y MAURICIO WILBER MAMANI PARISUAÑA

ANÁLISIS DE CAL, PRUEBAS DE ENSAYO PARA "REMOCIÓN DE ARSÉNICO (AS) EN AGUAS NATURALES POR PROCESO DE OXIDACIÓN, FLOCULACIÓN, SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN" (TRABAJO DE INVESTIGACIÓN)

TIPO DE MUESTRA: Cal artesanal del distrito de Samán provincia de San Román - Región Puno

Estado	Sólido
Apariencia	Bianco
Densidad	0,69 g/ml
pH	11,80

**METODO DE ENSAYO:** ASTM C25 ITEM 28 PARA LA DETERMINACIÓN DE CAL ÚTIL  
**Job Number:** PU1707026  
**Order No:** CAL ÚTIL  
**Date Recieved:** 10/06/2017 18:02  
**Date Reported:** 20/06/2017 14:02

	<b>Samples</b>	2
--	----------------	---

<b>Analyte</b>		<b>Peso Muestra</b>	<b>al Util</b>	<b>CaO</b>	<b>CaOH2</b>
<b>Scheme</b>		PML_CH	CLA04V	CLA04V	CLA04V
<b>Analysis Unit</b>		g	%	%	%

<b>Sample Ident</b>	<b>External Ident</b>	<b>Description</b>			
PU1707026.001	PCEXT 1	N.A.	55.52	57.57	
PU1707026.002	PCEXT 2	N.A.	55.52	57.57	

**METODO DE ENSAYO:** LECTURA DE ANALITOS POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

<b>Analyte</b>		<b>Peso Muestra</b>	<b>Al</b>	<b>Fe</b>	<b>Mg</b>
<b>Scheme</b>		PML_CH	CLA04V	CLA04V	CLA04V
<b>Analysis Unit</b>		g	%	%	%

<b>Sample Ident</b>	<b>External Ident</b>	<b>Description</b>			
PU1707027.001	PCEXT 1	N.A.	20.86	1.12	1.89
PU1707027.002	PCEXT 2	N.A.			

OFICINA PRINCIPAL : SGS del Perú Av. Elmer Faucett 3348, Perú - Callao, 07031  
 Contactenos t: (511) 5171900  
 La red de SGS engloba más de 2400 oficinas y laboratorios y más de 95 000 empleados en todo el mundo.

**SGS DEL PERU S.A.C.**  
 LUIS RONDÁN TOLEDO  
 JEFE DE LABORATORIO  
 PUCAMARCA - MINSUR



**Anexo 3:** Efecto de Cal Cao para adsorción de As en agua superficial del Rio Ayaviri



**SGS del Perú S.A.C**  
**Laboratorio Químico Pucamarca**

**SOLICITANTE:** ANALI PARY HILARI Y MAURICIO WILBER MAMANI PARISUAÑA  
 ANÁLISIS DE CAL PARA LAS PRUEBAS DE ENSAYO PARA LA TESIS "REMOCIÓN DE ARSÉNICO (AS) EN AGUAS NATURALES POR PROCESO DE OXIDACIÓN, FLOCULACIÓN, SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN" (TRABAJO DE INVESTIGACIÓN)

**TIPO DE MUESTRA:** Efecto de Cal CaO para adsorción de As en agua superficial del Rio Ayaviri  
 Estado: Líquido

**Job Number:** PU1707026  
**Order No:** AAS21V **Samples** 8  
**Date Recieved:** 03/11/2017 07:02  
**Date Reported:** 12/11/2017 15:02

**METODO DE ENSAYO:** LECTURA DE ANALITOS POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Analyte	Peso Muestra	As
Scheme	PML_CH	AAS21V
Analysis Unit	g	ppm

Sample Ident	External Ident	Description		
PU1707067.001	PCEXT 1	M-1	N.A.	0.01
PU1707067.002	PCEXT 2	M-2	N.A.	0.02
PU1707067.003	PCEXT 3	M-3	N.A.	0.02
PU1707067.004	PCEXT 4	M-4	N.A.	0.01
PU1707067.005	PCEXT 5	M-5	N.A.	0.01
PU1707067.006	PCEXT 6	M-6	N.A.	0.01
PU1707067.007	PCEXT 7	M-7	N.A.	0.015
PU1707067.008	PCEXT 8	M-8	N.A.	0.01

**OFICINA PRINCIPAL :** SGS del Perú Av. Elmer Faucett 3348, Perú - Callao, 07031  
**Contactenos** t: (511) 5171900  
 La red de SGS engloba más de 2400 oficinas y laboratorios y más de 95 000 empleados en todo el mundo.



**SGS DEL PERU S.A.C.**  
 LUIS ROSALES TOLEDO  
 JEFE DE LABORATORIO  
 PUCAMARCA

Anexo 4. Efecto de tiempo en agua superficial del Rio Ayaviri



**SGS del Perú S.A.C**  
Laboratorio Químico Pucamarca

**SOLICITANTE:** ANALI PARY HILARI Y MAURICIO WILBER MAMANI PARISUAÑA

ANÁLISIS DE CAL PARA LAS PRUEBAS DE ENSAYO PARA LA TESIS "REMOCIÓN DE ARSÉNICO (AS) EN AGUAS NATURALES POR PROCESO DE OXIDACIÓN, FLOCULACIÓN, SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN" (TRABAJO DE INVESTIGACIÓN)

**TIPO DE MUESTRA:** Efecto de tiempo en agua superficial del Rio Ayaviri  
Estado: Líquido

**Job Number:** PU1707135  
**Order No:** AAS21V  
**Date Received:** 28/11/2017 07:02  
**Date Reported:** 29/11/2017 15:02

**Samples** 8

**METODO DE ENSAYO:** LECTURA DE ANALITOS POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Analyte	Peso Muestra		Scheme	Analysis Unit
	PMI_CH	AAS21V		
	g	ppm		

Sample Ident	External Ident	Description		
PU1707135.001	PCEXT 1	T-10	N.A.	0.024
PU1707135.002	PCEXT 2	T-15	N.A.	0.021
PU1707135.003	PCEXT 3	T-20	N.A.	0.017
PU1707135.004	PCEXT 4	T-25	N.A.	0.014
PU1707135.005	PCEXT 5	T-30	N.A.	0.014
PU1707135.006	PCEXT 6	T-35	N.A.	0.014
PU1707135.007	PCEXT 7	T-40	N.A.	0.013
PU1707135.008	PCEXT 8	T-50	N.A.	0.012

OFICINA PRINCIPAL : SGS del Perú Av. Elmer Faucett 3348, Perú - Callao, 07031  
Contactenos t: (511) 5171900

La red de SGS engloba más de 2400 oficinas y laboratorios y más de 95 000 empleados en todo el mundo.



**SGS DEL PERU S.A.C.**  
C/15 RONDA N TOLEDO  
JEFE DE LABORATORIO  
PUCAMARCA - MINSUR

Anexo 5. Oxidación Constante y Floculación en agua superficial del Rio Ayaviri



**SGS del Perú S.A.C**  
Laboratorio Químico Pucamarca

**SOLICITANTE:** ANALI PARY HILARI Y MAURICIO WILBER MAMANI PARISUAÑA

ANÁLISIS DE CAL PARA LAS PRUEBAS DE ENSAYO PARA LA TESIS "REMOCIÓN DE ARSÉNICO (AS) EN AGUAS NATURALES POR PROCESO DE OXIDACIÓN, FLOCULACIÓN, SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN" (TRABAJO DE INVESTIGACIÓN)

**TIPO DE MUESTRA:** Oxidación Constante y Floculación en agua superficial del Rio Ayaviri  
Estado Líquido

**Job Number:** PU1707123  
**Order No:** AAS21V **Samples** 8  
**Date Recieved:** 15/12/2017 10:02  
**Date Reported:** 17/12/2017 14:02

**METODO DE ENSAYO:** LECTURA DE ANALITOS POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Analyte	Scheme	Analysis Unit	Peso Muestra			
			PMI_CH	AAS21V	PMI_CH	PMI_CH
			g	ppm	g	g
<b>Sample Ident</b>	<b>External Ident</b>	<b>Description</b>				
PU1707123.001	PCEXT 1	V1	N.A.	0.01	14.64	0.018
PU1707123.002	PCEXT 2	V2	N.A.	0.01	14.64	0.019
PU1707123.003	PCEXT 3	V3	N.A.	0.01	14.64	0.02
PU1707123.004	PCEXT 4	V4	N.A.	0.005	14.64	0.022
PU1707123.005	PCEXT 5	V5	N.A.	0.005	14.64	0.023
PU1707123.006	PCEXT 6	V6	N.A.	0.005	14.64	0.025
PU1707123.007	PCEXT 7	V7	N.A.	0.007	14.64	0.03
PU1707123.008	PCEXT 8	V8	N.A.	0.005	14.64	0.04
PU1707123.009	PCEXT 9	V9	N.A.	0.005	14.64	0.045
PU1707123.010	PCEXT 10	Mco	N.A.	0.078		

**OFICINA PRINCIPAL :** SGS del Perú Av. Elmer Faucett 3348, Perú - Callao, 07031  
**Contactenos** t: (511) 5171900  
La red de SGS engloba más de 2400 oficinas y laboratorios y más de 95 000 empleados en todo el mundo.


LEON BONDAN TOLEDO  
JEFE DE LABORATORIO  
PUCAMARCA - MINSUR

Anexo 6. Efecto de pH para adsorción de As en agua superficial del Rio Ayaviri



**SGS del Perú S.A.C**  
**Laboratorio Químico Pucamarca**

**SOLICITANTE:** ANALI PARY HILARI Y MAURICIO WILBER MAMANI PARISUAÑA

ANÁLISIS DE CAL PARA LAS PRUEBAS DE ENSAYO PARA LA TESIS "REMOCIÓN DE ARSÉNICO (AS) EN AGUAS NATURALES POR PROCESO DE OXIDACIÓN, FLOCULACIÓN, SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN" (TRABAJO DE INVESTIGACIÓN)

**TIPO DE MUESTRA:** Efecto de pH para adsorción de As en agua superficial del Rio Ayaviri  
 Estado: Líquido

**Job Number:** PU1707086  
**Order No:** AAS21V **Sample:** 8  
**Date Received:** 28/11/2017 07:02  
**Date Reported:** 29/11/2017 15:02

**METODO DE ENSAYO:** LECTURA DE ANALITOS POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Analyte	Peso Muestra	pH	As
Scheme	PMI_CH		AAS21V
Analysis Unit	g		ppm
<b>Sample Ident</b>	<b>External Ident</b>	<b>Description</b>	
PU1707086.001	PCEXT 1	M-1 N.A.	6 0.016
PU1707086.002	PCEXT 2	M-2 N.A.	8 0.009
PU1707086.003	PCEXT 3	M-3 N.A.	8.5 0.009
PU1707086.004	PCEXT 4	M-4 N.A.	9 0.01
PU1707086.005	PCEXT 5	M-5 N.A.	9.18 0.013
PU1707086.006	PCEXT 6	M-6 N.A.	9.3 0.013
PU1707086.007	PCEXT 7	M-7 N.A.	9.5 0.017
PU1707086.008	PCEXT 8	M-8 N.A.	10 0.02
PU1707086.009	PCEXT 9	Mco N.A.	0.08

OFICINA PRINCIPAL : SGS del Perú Av. Elmer Faucett 3348, Perú - Callao, 07031  
 Contactenos t: (511) 5171900  
 La red de SGS engloba más de 2400 oficinas y laboratorios y más de 95 000 empleados en todo el mundo.

  
**SGS DEL PERU S.A.C.**  
 LUIS RONDÁN TOLEDO  
 JEFE DE LABORATORIO  
 PUCAMARCA - MINSUR

Anexo 7. Efecto del Caudal en agua superficial del Rio Ayaviri



**SGS del Perú S.A.C**  
**Laboratorio Químico Pucamarca**

**SOLICITANTE:** ANALI PARY HILARI Y MAURICIO WILBER MAMANI PARISUAÑA

ANÁLISIS DE CAL PARA LAS PRUEBAS DE ENSAYO PARA LA TESIS "REMOCIÓN DE ARSÉNICO (AS) EN AGUAS NATURALES POR PROCESO DE OXIDACIÓN, FLOCULACIÓN, SEDIMENTACIÓN Y FILTRACIÓN" (TRABAJO DE INVESTIGACIÓN)

**TIPO DE MUESTRA:** Efecto del Caudal en agua superficial del Rio Ayaviri  
 Estado Líquido

**Job Number:** PU1707146  
**Order No:** AAS21V **Samples** 11  
**Date Recieved:** 15/12/2017 10:02  
**Date Reported:** 17/12/2017 14:02

**METODO DE ENSAYO: LECTURA DE ANALITOS POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA**

Analyte	Scheme	Analysis Unit	Peso Muestra		As
			PMI_CH	AAS21V	
			g	ppm	
<b>Sample Ident</b>	<b>External Ident</b>	<b>Description</b>			
PU1707146.001	PCEXT 1	V1- Cau	N.A.		0.01
PU1707146.002	PCEXT 2	V2- Cau	N.A.		0.009
PU1707146.003	PCEXT 3	V3- Cau	N.A.		0.007
PU1707146.004	PCEXT 4	V4- Cau	N.A.		0.005
PU1707146.005	PCEXT 5	V5- Cau	N.A.		0.005
PU1707146.006	PCEXT 6	V6- Cau	N.A.		0.005
PU1707146.007	PCEXT 7	V7- Cau	N.A.		0.005
PU1707146.008	PCEXT 8	V8- Cau	N.A.		0.005
PU1707146.009	PCEXT 9	V9- Cau	N.A.		0.005
PU1707146.010	PCEXT 10	Mco - Cau	N.A.		
PU1707146.011	PCEXT 11	Mcf - Cau	N.A.		0.005

OFICINA PRINCIPAL : SGS del Perú Av. Elmer Faucett 3348, Perú - Callao, 07031  
 Contactenos t: (511) 5171900  
 La red de SGS engloba más de 2400 oficinas y laboratorios y más de 95 000 empleados en todo el mundo.

  
**SGS DEL PERU S.A.C.**  
 LIZ RONDAN TOLEDO  
 JEFE DE LABORATORIO  
 PUCAMARCA - MINSUR