

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela Profesional de Ingeniería Química**

**ESTUDIO DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA**

**DEL RIO SAMA - TACNA, EMPLEANDO Fe<sup>0</sup> Y**

**ÁCIDO CÍTRICO, 2014**

**TESIS**

**presentada por:**

**Bach. Rocío Noemí Zapana Quispe**

**Para optar el Título Profesional de:  
INGENIERO QUÍMICO**

**Tacna – PERÚ**

**2016**

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN-TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

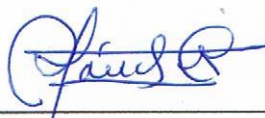
**Escuela Profesional de Ingeniería Química**

**TESIS**

**“ESTUDIO DE REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL AGUA DEL  
RÍO SAMA - TACNA, EMPLEANDO Fe<sup>0</sup> Y ÁCIDO  
CÍTRICO, 2014”**

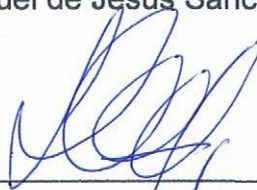
TESIS SUSTENTADA Y APROBADA EL DÍA 18 DE ENERO DEL 2017,  
SIENDO EL JURADO CALIFICADOR:

PRESIDENTE:



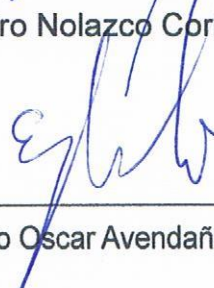
MSc. Manuel de Jesús Sánchez Rosales

SECRETARIO:



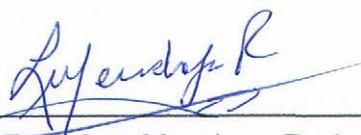
MSc. Pedro Nolazco Cornejo del Carpio

VOCAL:



Dr. Edgardo Oscar Avendaño Cáceres

ASESOR:



MSc. Zoila Luz Mendoza Rodas

## **DEDICATORIA**

A Dios

A mis padres Gregorio y Mercedes que me apoyaron siempre

A mi hermano querido Gustavo

A mis amigos y amigas

A mis compañeros.

## **AGRADECIMIENTOS**

A cada uno de los docentes universitarios de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann por los conocimientos que impartieron en mi persona, permitiendo desarrollar los conocimientos adquiridos en la sociedad y representar con honor mi casa de estudios.

## CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	x
RESUMEN .....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
1.1 Descripción del Problema.....	5
1.1.1 Antecedentes del problema .....	5
1.1.2 Problemática de la Investigación .....	14
1.2 Formulación del problema .....	16
1.3 Justificación e importancia .....	17
1.4 Limitaciones .....	19
1.5 Objetivos .....	20

1.5.1	Objetivo general.....	20
1.5.2	Objetivos específicos .....	20
1.6	Hipótesis.....	20
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....		21
2.1	Bases Teóricas.....	21
2.1.1	Área de estudio.....	21
2.1.2	Arsénico .....	25
2.1.3	El arsénico en el mundo .....	26
2.1.4	Presencia química del arsénico en aguas naturales.....	27
2.1.5	Toxicidad del arsénico .....	30
2.1.6	Cuenca de Sama .....	31
2.1.7	Legislación para la concentración límite de arsénico en agua.....	33
2.1.8	Procesos de remoción de arsénico.....	35
2.1.9	El acero y sus constituyentes .....	49
2.1.10	Limón Sutil .....	51
2.1.11	Reacciones Químicas involucradas en la Remoción de Arsénico .....	52

2.1.12 Base teórica para el modelo matemático.....	56
2.1.13 Prueba de jarras .....	57
2.2 Definición de Términos.....	58
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO .....	60
3.1 Tipo de investigación.....	60
3.2 Población y muestra del estudio.....	60
3.3 Operacionalización de variables.....	61
3.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos .....	63
3.4.1 Equipos, instrumentos y materiales .....	63
3.4.2 Métodos, Técnicas y normas .....	65
3.5 Procesamiento y análisis de datos .....	66
3.5.1 Caracterización del agua del río Sama .....	66
3.5.2 Caracterización de insumos y variables implicadas en la de remoción arsénico.....	67
3.5.3 Acondicionamiento de velocidad y el tiempo de contacto.....	69
3.5.4 Preparación del proceso de filtración.....	71
3.5.5 Influencia de Factores en el Diseño Experimental .....	72
3.5.6 Construcción del modelo matemático .....	74
3.5.7 Procedimiento experimental .....	75

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	78
4.1 Resultados .....	78
4.1.1 Análisis fisicoquímico realizado al agua sin tratar.....	78
4.1.2 Arreglo y resultados experimentales 2 <sup>3</sup> para la remoción de arsénico .....	80
4.1.3 Análisis estadístico para la remoción de arsénico .....	83
4.1.4 Análisis estadísticos de los datos experimentales para la remoción de arsénico - modelo matemático – regresión lineal .....	89
4.1.5 Análisis de los resultados .....	96
4.2 Discusiones .....	98
CONCLUSIONES .....	101
RECOMENDACIONES.....	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
ANEXOS.....	120

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Aspectos generales de la cuenca	23
<b>Tabla 2.</b> Proyecciones de la población	24
<b>Tabla 3.</b> Especies de arsénico importantes por su toxicidad	31
<b>Tabla 4.</b> Regulación para arsénico en agua potable	34
<b>Tabla 5.</b> Estudios reportados del proceso de adsorción de arsénico con nanopartículas de hierro cerovalente	44
<b>Tabla 6.</b> Estudios reportados del proceso de adsorción de arsénico con adsorbentes no convencionales	46
<b>Tabla 7.</b> Ventajas y desventajas de tecnologías emergentes	48
<b>Tabla 8.</b> Resumen de las reacciones en la remoción de arsénico	55
<b>Tabla 9.</b> Operacionalización de variables	61
<b>Tabla 10.</b> Análisis fisicoquímico de muestra de agua del río Sama	66
<b>Tabla 11.</b> Niveles de variables	73
<b>Tabla 12.</b> Delineamiento factorial ( $2^3$ ) con cuatro puntos centrales de la metodología de superficie de respuesta para contenido de arsénico	74
<b>Tabla 13.</b> Valores fisicoquímicos de muestra de agua sin tratar	79
<b>Tabla 14.</b> Análisis de muestra de agua sin tratar	79

<b>Tabla 15.</b> Efecto de las variables: concentración de hierro, ácido cítrico y el tiempo sobre el contenido de arsénico por método semicuantitativo (Test de arsénico)	81
<b>Tabla 16.</b> Resultados de concentración de arsénico y hierro (ICP óptico) de las muestras de agua posterior al tratamiento	82
<b>Tabla 17.</b> Modelo de regresión y grado de significancia de las variables independientes correspondientes a los resultados de la determinación de arsénico	85
<b>Tabla 18.</b> Modelos de regresión y análisis de varianza para los modelos correspondientes a los resultados experimentales del estudio del contenido de arsénico	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Demarcación de cuencas hidrográficas de Tacna	21
<b>Figura 2:</b> Vista satelital del distrito de Sama Inclán, se aprecia en la parte superior el punto de muestreo	22
<b>Figura 3:</b> Localidad de Sama Inclán	22
<b>Figura 4:</b> Esquema de los puntos de monitoreo del agua superficial de la cuenca Sama	23
<b>Figura 5:</b> Presencia de especies de arsénico en agua en el sistema As-O <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O a 298,15 K (25 °C) y 1 atm	30
<b>Figura 6:</b> Complejo de citrato de hierro	54
<b>Figura 7:</b> Reactor del test de jarras	77
<b>Figura 8.A)</b> Diagrama de Pareto	86
<b>Figura 8.B)</b> Diagrama de Superficie de respuesta de la Concentración de Fe y el tiempo, fijando el contenido de ácido cítrico en 1,6 gotas	87
<b>Figura 8.C)</b> Grafica de efectos principales	87

## ÍNDICE DE ANEXOS

**Anexo 1.** Parámetros de calidad de agua

**Anexo 2.** Límites máximos permisibles de parámetro químico inorgánico y orgánico

**Anexo 3.** Niveles de arsénico en el agua de consumo humano provincia de Tacna

**Anexo 4.** Fotos de punto de muestreo de muestra madre río Sama Inclán

**Anexo 5.** Fotos de insumos comerciales usados para remoción de arsénico

**Anexo 6.** Procedimiento experimental de la remoción de arsénico

**Anexo 7.** Diluciones para concentración de limón.

**Anexo 8.** Comportamiento de velocidad de agitación.

**Anexo 9.** Ecuaciones para la regresión múltiple

**Anexo 10.** Modelos Matemáticos de Suma de Cuadrados.

**Anexo 11.** Resultados de análisis agua río Sama al Laboratorio CORPLAB

**Anexo 12.** Resultados de análisis agua tratada en laboratorio CORPLAB

## RESUMEN

En la presente investigación se estudió la remoción de arsénico, de concentración inicial de 0,37 mg As/L, agua proveniente del río Sama, el cual es fuente de abastecimiento de la población de la localidad de Sama Inclán, ubicado al norte de la provincia de Tacna. La finalidad fue presentar un método alternativo, económico, eficiente y práctico, para ello, se empleó insumos de uso comercial como son: lana de acero (hierro) y ácido cítrico (jugo de limón), se empleó el diseño experimental factorial con tres variables independientes, la dosis de hierro, el jugo de limón y el tiempo de contacto. Se realizaron 12 pruebas experimentales, donde se obtuvieron valores de respuesta de remoción de arsénico mayor a 96 %, con lo cual los niveles de presencia del arsénico, se situaban por debajo de lo que estipula la Organización Mundial de Salud (OMS). Con esto afirmamos que el presente estudio permite remover valores muy cercanos al 96 % de arsénico, variando unos a otros en relación a las diferentes condiciones de cada una de las pruebas experimentales, llevadas a cabo para la verificación de los resultados, además, se realizó pruebas a las diferentes muestras tratadas a un laboratorio de ensayo certificado, CORPLAB, quien dio fe de los valores obtenidos, siendo ellos menores al 0,01 mg/L.

**Palabra clave:** remoción de arsénico, agua de río Sama, hierro, ácido cítrico

## **ABSTRACT**

In the present investigation, arsenic removal was studied with an initial concentration of 0,37 mg As/L, water from the Sama River, which is a source of supply for the population of the town of Sama Inclán, located north of Tacna. The purpose was to present an alternative method, economical, efficient and practical, using commercially available assets such as: steel wool (iron) and citric acid (lemon juice), the experimental factorial design was used with three independent variables, iron dose, lemon juice and contact time. A total of 12 experimental tests were performed, where arsenic removal values higher than 96% were obtained, with the presence of arsenic levels below the requirements of the World Health Organization (WHO). With this we affirm that the present study allows to remove values very close to 96% of arsenic, varying to each other in relation to the different conditions of each one of the experimental tests, carried out for the verification of the results, tests were executed with different samples treated to a certified test laboratory, CORPLAB, who gave testimony of the values obtained, being they less than 0,01 mg/L.

**Key words:** arsenic removal, Sama river water, citric acid.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente uno de los grandes desafíos que enfrenta la humanidad es consumir agua limpia, es así que la Organización Mundial de la Salud (OMS) fue acotando y estandarizando las concentraciones de sus contaminantes.

Un tipo de contaminación en el agua es causada por la presencia de metales y metaloides, esto en la actualidad se ha convertido en uno de los problemas ambientales más importantes, ya que la toxicidad de estos representa riesgos fatales.

Se sabe, además, que la contaminación de la biósfera por estos metales tóxicos se ha intensificado rápidamente desde el inicio de la revolución industrial, generando importantes problemas al medio ambiente y la salud.

Uno de los metales contaminantes que representa mayor preocupación en nuestro recurso hídrico y materia del presente estudio, es el arsénico ya que, al día de hoy, se encuentra en mayor cantidad en el medio ambiente a causa de las diversas actividades antropogénicas que se viene realizando en el país. Esto conlleva a que los principales

afluentes de agua de consumo se vean afectados por una concentración cada vez mayor de contaminantes.

En nuestro país existen regiones con diversas características, en muchos casos el origen geológico de las mismas da como resultante que sus reservas acuíferas contengan arsénico y otros metales disueltos en ellas. En las zonas rurales del departamento de Tacna, por ejemplo, el agua de la Cuenca del Río Sama presenta estos materiales contaminantes.

El arsénico es parte de una gran cantidad de contaminantes, generados naturalmente por procesos geoquímicos; así, las sales que contiene el arsénico se solubilizan en los acuíferos. El problema del arsénico es básicamente de origen geológico – sedimentario y afecta a nuestra región, como también afecta a varios lugares del mundo entre ellos Argentina, Chile, México, etc. (Luján, 2001; Nicolli, H. et. al., 1985).

El arsénico aún en concentraciones muy bajas, puede causar a largo plazo enfermedades neoplásicas malignas como: queratosis palmo plantar, atrofia cutánea, conjuntivitis, astenia o trastornos neurológicos y hematológicos, entre otros; lo que justifica la decisión de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de reducir cinco veces el límite máximo admisible: de 0,05 a 0,01 mg/L. (Vega G., 2002; AJE, 1994)

Existen diferentes tecnologías que se utilizan para la remoción de arsénico, tales como coagulación – filtración, ablandamiento con cal, intercambio iónico, adsorción, osmosis inversa y nanofiltración, este tipo de tratamiento es recomendado para sistemas grandes y se emplean exclusivamente para remover al arsénico.

Si se introdujeran en gran escala las tecnologías existentes, como por ejemplo la osmosis inversa para la remoción de arsénico, sería económicamente inviable, por la energía que demanda y el personal especializado para su operación y mantenimiento, es por ello que se busca aplicar una tecnología existente que sea simple, eficiente y de bajo costo para eliminar de manera efectiva la sustancia contaminante.

El estudio de tesis se basó en la revisión de proyectos de investigación y estudios recientes realizados en otros países, como Argentina, Chile, México, etc. y otros estudios realizados recientemente en la región Tacna en los cuales se observó que el agua de las Cuencas presenta alta concentración de arsénico por encima de los límites permisibles (0,01 mg/L).

La remoción de arsénico del agua superficial del río de Sama Inclán, por esta tecnología emergente, generalmente está relacionada a procesos de coagulación y floculación en especial de As (V), el hierro metálico y

sus productos de corrosión, lo que permitió por diferentes pruebas experimentales llegar a valores por debajo de los límites permitidos de acuerdo a la Norma Peruana (0,01 mg/L).

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción del Problema

#### 1.1.1 Antecedentes del problema

##### **Avances en remoción de arsénico por oxidación solar en aguas de Tucumán, Argentina**

Los autores estimaron la eficiencia de la remoción de arsénico por oxidación solar acoplada con la precipitación de hidróxido de hierro en varias condiciones experimentales, en muestras de agua sintética y subterránea de la provincia de Tucumán. La eficiencia es afectada de manera impredecible por cambios en la matriz química, o por las condiciones operativas, que afectan la naturaleza de los óxidos generados, la oxidación del As (III) a As (V) y su incorporación al sólido en formación. Si bien el efecto de la irradiación solar es variable, dependiendo de las condiciones experimentales, un procedimiento versátil para tratar aguas de distintas composiciones debe estar basado en el uso de

la energía solar, que acelera la oxidación de As (III) a As (V). Por otra parte, se estudió la posibilidad de emplear minerales y materiales sencillos para mejorar la eficiencia de remoción. Se estudiaron las eficiencias de remoción en presencia de pelitas y areniscas naturales de la región, y en presencia de alambre de enfardar. (García *et al.*, 2003)

### **Estudio de un método alternativo para la purificación de arsénico del agua**

En este trabajo el autor cuantificó la presencia de arsénico en aguas en una zona rural de São Paulo. Utilizaron lana de acero la cual fue eficiente en la remoción de arsenito y arseniato del agua. La recuperación ocurre en ppm durante los primeros minutos de contacto. La principal ventaja del proceso, se debe al bajo precio y la aplicación domiciliar. La capacidad de la adsorción es debido a los procesos electroquímicos arsénico-hierro. (Campos, 2003)

### **El efecto de la lana de acero al carbono en la eliminación del arsénico del agua potable**

Esta investigación intenta demostrar que es posible la remoción de arsénico del agua potable, esto gracias a una

combinación del carbón activado granular y lana de acero al carbono. El filtro de lana de acero es el más importante en aplicaciones residenciales. La consideración sola más importante es el tiempo de contacto. Extracción de arsénico inorgánico a partes por millón (ppm) o partes por billón (ppb) niveles dentro de 15 a 30 min, es bastante común. Técnicas de inmovilización son propensas a seguir ganando importancia en el mundo. (Campos, 2002)

### **Corrosión del hierro en distintos tipos de aguas: una propuesta experimental**

En esta investigación concluyen: La lana de acero se corroe en todos los tipos de agua, pero varía la intensidad y velocidad del proceso de corrosión. En aguas ácidas, tanto la velocidad como la intensidad de la corrosión del hierro, son mayores que en los otros tipos de agua. El desarrollo de esta actividad, tanto teórica como práctica, permitirá sin duda, reforzar el concepto de corrosión, valorar la importancia y preocupación por este problema en la sociedad. (Chandía & Hernández, 2009)

## **Filtrado de dispositivos para la eliminación de arsénico del agua**

En esta investigación se utilizó un dispositivo de filtración para la eliminación de arsénico del agua de agua / superficie del suelo. El dispositivo de filtración de la presente invención utilizó lana de acero y arena como materia prima para la eliminación de arsénico del agua y todo el cuerpo exterior del dispositivo puede estar hecho de material más barato como el material de plástico o acero inoxidable. El dispositivo de filtración funciona en el simple principio de co-precipitación de arsénico con metales, seguida de adsorción y filtración a través de arena tratada. El metal, lana de acero, que se utiliza en el dispositivo es una pérdida procesado generada a partir de una planta de fabricación de acero de ese modo el dispositivo extremadamente barata y versátil. En el dispositivo de filtración de la presente invención, el arseniato de hierro y arsenito de hierro son co-precipitado por la reacción de lana de acero con arsénico en el agua. El dispositivo utiliza arena de río tratados simultáneamente para la eliminación de hierro lixiviado durante la reacción. (Chandra et al, 2008)

## **Estudio de remoción de arsénico en agua potable a nivel domiciliario mediante oxidación solar y coagulación-floculación**

En Costa Rica, a pesar de que se han hecho esfuerzos por abastecer de agua segura a las comunidades afectadas por la presencia de arsénico en el líquido, una parte de la población aún se encuentra expuesta, posiblemente debido a que no están conectadas a una red de acueductos. Es por ello, que en este estudio se presentan dos soluciones a nivel domiciliario para eliminar el arsénico: una por oxidación solar (SORAS) y otra por un proceso de coagulación floculación. En ambos casos, el arsénico es removido por adsorción o coprecipitación sobre los óxidos hidróxidos de hierro (III) formados.

En el sistema SORAS se encontró que para reducir la concentración de arsénico de 200 µg/L a menos de la norma (10 µg/L), se necesitan entre 2 h y 4 h de exposición en un día soleado o nublado, respectivamente. En el sistema de coagulación floculación, las condiciones óptimas para obtener niveles de arsénico por debajo de la norma fueron las siguientes: con floculante sintético, el pH fue 6 con 1 mg/L

de FK-930-S (polímero de cloruro de polidialil-dimetilamonio) con dosis de  $\text{FeCl}_3$  12 mg/L; con floculante natural, el pH fue 6 con 250 mg/L de mozote (*Triumfetta semitriloba*), con dosis de  $\text{FeCl}_3$  de 14 mg/L. Un prototipo consistente en un recipiente de coagulación-floculación y otro de filtración en arena fue capaz de tratar 15 L de agua sintética con 200  $\mu\text{g/L}$  As y agua natural con 10 y 50  $\mu\text{g/L}$ . A pesar de estos resultados, es necesario evaluar ambas técnicas en las comunidades, incluyendo aspectos de capacitación y aceptación. (Rojas et al., 2015)

### **Remoción del arsénico por oxidación solar en aguas para consumo humano**

En esta investigación se evaluó una alternativa de tratamiento simple: el método de Remoción de Arsénico por Oxidación Solar, RAOS, utilizando alambres de hierro Nro. 16 y jugo de limón, variedad sutil. Se realizó pruebas experimentales con aguas sintéticas de un pH promedio de 6,7 y 0,2 mg/L de arsénico, obteniéndose una reducción de hasta un 98,5 % de arsénico total bajo una irradiación solar promedio de 612,1 W-h/m<sup>2</sup> en seis horas. Para el tratamiento de un litro de agua se empleó seis gramos de alambre de

hierro Nro. 16 y 1,3 mL de jugo de limón de la variedad *Citrus aurantifolia* swingle (sutil). La experimentación en campo se realizó en la región Apurímac con las aguas del río Iscahuaca-Colcabamba que contenían 0,05 mg/L de arsénico, lográndose reducir el 88 % de arsénico total bajo una irradiación solar promedio de 586 W-h/m<sup>2</sup>. Los resultados indican que el método RAOS propuesto puede aplicarse para descontaminar aguas de consumo humano en zonas rurales a nivel familiar, acompañado de un programa de sensibilización y capacitación. (Chavez & Miglio, 2011)

### **Remoción de arsénico en aguas del río Camarones, Arica, Chile, utilizando la tecnología RAOS modificada**

Esta investigación estudia la aplicación de la tecnología RAOS en un área rural de Chile para la descontaminación simple y económica de aguas del río Camarones utilizadas para consumo humano y regadío agrícola. Se realizaron análisis fisicoquímicos para caracterizar el agua, se estudiaron las variables hierro, jugo de limón, tiempo exposición, tanto en muestras sintéticas como reales, comprobándose que la aplicación del método RAOS es

factible con la respectiva adaptación de la tecnología a la realidad geográfica. (Cornejo et al., 2003)

### **Remoción de arsénico de las aguas de consumo humano del Distrito de Huanuara – Tacna**

En nuestra región se han realizado investigaciones por docentes que pertenecen a esta casa superior de estudios, como uso hierro cero y prueba de jarras, a cargo del Dr. Edilberto Mamani López, Profesor Principal del departamento de Química de la Facultad de Ciencias, obteniendo 95 % de remoción. (Mamani, 2014)

### **Remoción de Arsénico del Río Sama utilizando la Metodología de hierro cero Valente (Cuenca del Río Sama, Provincia de Tacna)**

La tecnología hierro cero valente, aplicado al presente trabajo de investigación, se ha complementado con citrato y radiación solar. La fuente de hierro y citrato fueron la lana de acero comercial y el limón del mercado local de Tacna, los cuales son insumos de bajo costo y de fácil acceso, constituyéndose en una alternativa de solución a nivel domiciliario. La tecnología fue aplicada al agua del río Sama.

Se planteó un diseño experimental factorial  $2^2$ , más de tres puntos centrales con el fin de determinar el efecto de los factores: cantidad de hierro (g) y limón (gotas), con ese propósito se mantuvo constante el tiempo de radiación solar y el tiempo de sedimentación. Los resultados obtenidos en el área de exploración indicaron que el único factor significativo en la cantidad de hierro, el comportamiento del proceso fue lineal con un  $r^2 = 75,63 \%$  y la mayor remoción de arsénico que se logró de las cinco diferentes condiciones experimentales aplicando una gota de limón y 2 gramos de lana de acero fue de 98 %. (Avendaño, Mamani & Fabián, 2013)

El presente estudio, trata de aplicar una metodología para remover el Arsénico de las aguas río Sama, de la localidad de Sama Inclán Tacna, basada en el uso de hierro cero Valente utilizando lana de acero y el ácido cítrico a partir del jugo de limón, no se considerará la radiación solar, porque en lugar de ello se empleó la Prueba de Jarras con velocidad de agitación constante para todas las pruebas experimentales.

### **1.1.2 Problemática de la Investigación**

En el 2010, el comité mixto FAO/OMS de expertos en aditivos alimentarios reevaluó los efectos del arsénico en la salud humana, a la luz de los nuevos datos disponibles. Una de sus conclusiones fue que en el caso de algunas regiones del mundo donde las concentraciones de arsénico inorgánico en el agua de consumo humano superan los 50-100 µg/L se pueden evidenciar efectos adversos. En otras regiones, donde las concentraciones de arsénico en el agua ligeramente elevadas (10-50 µg/L), el comité concluyó que, si bien, existe el riesgo de efectos adversos, estos presentarían niveles de incidencia bajos, que serían difíciles de detectar dentro de un estudio epidemiológico.

La presencia de niveles altos de arsénico en aguas naturales y/o subterráneas: en Argentina, México, Chile y Perú, ocasiona la diseminación del Hidroarsenicismo Crónico Endémico (HACRE), enfermedad que se manifiesta por bioindicadores corporales a través de una tríada de síndromes patológicos: Melanodermia, leucodermia y/o queratosis palmoplantar, terminando en alteraciones de la

piel e incluso en cáncer. En Argentina y Perú, las fuentes del arsénico son naturales, en otros países provienen de la actividad minera, y en el norte de Chile (Arica), el origen es mixto, tanto de fuentes naturales como generado por la minería del cobre (Blanco et al., 2005).

Estudios de momias de la cultura Chinchorro, cuyos individuos vivieron de 7 000 a 2 000 años a. C. en una franja costera entre el norte de Chile en Antofagasta y el sur del Perú en Ilo, mostró que los habitantes de esa zona han sufrido arsenicismo causado por la alta exposición al arsénico de origen geogénico de las aguas y sus alimentos. Análisis del pelo de las momias de la estación sanitaria el Morro cerca de Arica, han dado concentraciones de As hasta de  $696 \text{ mg kg}^{-1}$ . (Bundschuh et al., 2012)

En varias regiones de la zona sur del Perú, muchas fuentes de abastecimiento de agua contienen niveles de Arsénico altos, provocados por contaminación natural (como las del río Uchusuma, Sama, Locumba y Curibaya entre otras, que son utilizadas como fuente de abastecimiento de agua para la población) y esto se agudiza por la escasez de

agua. Esto obliga a las diferentes instituciones de saneamiento de cada región a utilizar diversos tipos de tratamiento con el fin de reducir los niveles de contaminación del arsénico hasta el límites máximos permisible: 0,01 mg/L. (DIGESA, 2011)

Por otro lado, las tecnologías tradicionales para la remoción de arsénico en aguas tienen un costo elevado. De ahí la importancia de desarrollar tecnologías simples, eficientes y de bajo costo para eliminar *in situ* la sustancia contaminante. (Avendaño, 2010).

## **1.2 Formulación del problema**

La población de Sama Inclán utiliza el agua del río Sama para diferentes actividades, el agua contaminada con arsénico, esta toxicidad podría ocasionar diversas enfermedades debido a la toxicidad que presenta este metaloide, podría ocasionar diversas enfermedades o trastornos a la salud que sean perjudiciales con el transcurrir del tiempo.

Con la finalidad de remover el arsénico y otros contaminantes, se encuentra en funcionamiento una planta de tratamiento de agua

en la zona, que aplica diversas tecnologías para este proceso (Aireación, cloruro férrico, cal, filtros de carbón activado, etc.), se realizó mediante el proyecto de inversión pública código SNIP 11864; pero a pesar de ello los resultados obtenidos en los monitoreos realizados por el Ministerio de Salud (MINSA), en el periodo 2014-2015 (Sosa Arias, Diciembre 2015), indica que el agua utilizada por la población, presenta un alto valor contaminante mayor a 0,26 mg/L (ver Anexo 3), superando los límites permitidos. (Según Organización Mundial de Salud, 0,01 mg/L)

En el presente estudio se propone aplicar un método eficiente, económico y con insumos disponibles, para remover el arsénico por lo que se formula la siguiente interrogante:

¿Se puede remover arsénico en el agua del río Sama de la localidad de Sama Inclán – Tacna, empleando hierro cero Valente y ácido cítrico?

### **1.3 Justificación e importancia**

La ingestión de agua contaminada con arsénico es un problema de salud pública al que se está haciendo frente a nivel mundial debido a alta toxicidad. La exposición por largo tiempo ocasiona lesiones cutáneas tales como alteraciones de la pigmentación,

hiperqueratosis palmoplantar e hiperqueratosis papular. Se han presentado alteraciones caracterizadas por cianosis y pérdida progresiva de la circulación en las extremidades, que puede dar lugar a un tipo de gangrena llamada gangrena de Reynud (conocida como enfermedad del pie negro) y por consecuencia a amputaciones. También se ha escrito sobre afectaciones como conjuntivitis, miocarditis, problemas vasculares e irritación del aparato respiratorio y la piel. (Rivera, Cortes, Piña & Domínguez, 2003)

El deterioro de la calidad del agua, es uno de los problemas más graves del Perú, lo cual es un impedimento para lograr el uso eficiente del recurso comprometiéndose el abastecimiento en calidad y cantidad. El Perú, es un país con extensas zonas rurales donde los pobladores carecen de agua potable y utilizan agua sin ningún control. El arsénico en el agua, es tóxico y acumulativo, trayendo consigo consecuencias severas para el ser humano. Esto se torna particularmente grave en estas zonas, donde el abastecimiento de agua es provisto por fuentes puntuales, cuyo análisis sistemático esta fuera del alcance de los organismos controladores. (Avendaño, 2010)

Hoy en día existen una serie de tecnologías emergentes que se basan en el uso de la radiación solar como alternativa, con ventajas competitivas frente a las tecnologías tradicionales para el tratamiento de aguas contaminadas. El uso de tecnologías baratas por medio de insumos comerciales es una alternativa sencilla y económica para el tratamiento de agua del río Sama.

El presente proyecto de investigación, se muestra como una alternativa técnica y económicamente viable, que permitirá la remoción de arsénico con insumos comerciales, teniendo como objetivo mejorar la calidad del agua de acuerdo a los límites permisibles establecidos en la norma peruana.

#### **1.4 Limitaciones**

El arsénico presente en el agua del río Sama, por lo general contiene oxioaniones en dos estados de oxidación, arsénico trivalente ( $\text{As}^{+3}$ ) y arsénico pentavalente ( $\text{As}^{+5}$ ), no pudiéndose realizar la especiación antes ni después de tratamiento, puesto que no se cuenta con los equipos necesarios para realizar dichos análisis; por lo que en la presente investigación no se realizará la especiación del arsénico, y se trabajará solamente con arsénico

total, como se describe en los resultados de las muestras enviadas al laboratorio de ensayo acreditado.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

- Remover el arsénico de las aguas del río Sama de la localidad de Sama Inclán de la Región Tacna, utilizando ácido cítrico y hierro cero valente ( $\text{Fe}^0$ ).

### **1.5.2 Objetivos específicos**

**1.5.2.1 Determinar las condiciones más adecuadas de operación (concentración de hierro cero, junta de ácido cítrico y tiempo de contacto) que producen mayor remoción de arsénico.**

**1.5.2.2 Evaluar la eficiencia de remoción del arsénico.**

## **1.6 Hipótesis**

Es posible remover el arsénico en el agua del río Sama de la localidad de Sama Inclán, mediante la utilización de hierro cero valente (lana de acero) y ácido cítrico (limón comercial) con valores aceptables.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Bases Teóricas

##### 2.1.1 Área de estudio

El área de estudio comprende el pueblo de Sama Inclán del distrito de Tacna, provincia de Tacna, el cual forma parte de la Cuenca Locumba Sama. (Ver Tabla 1).

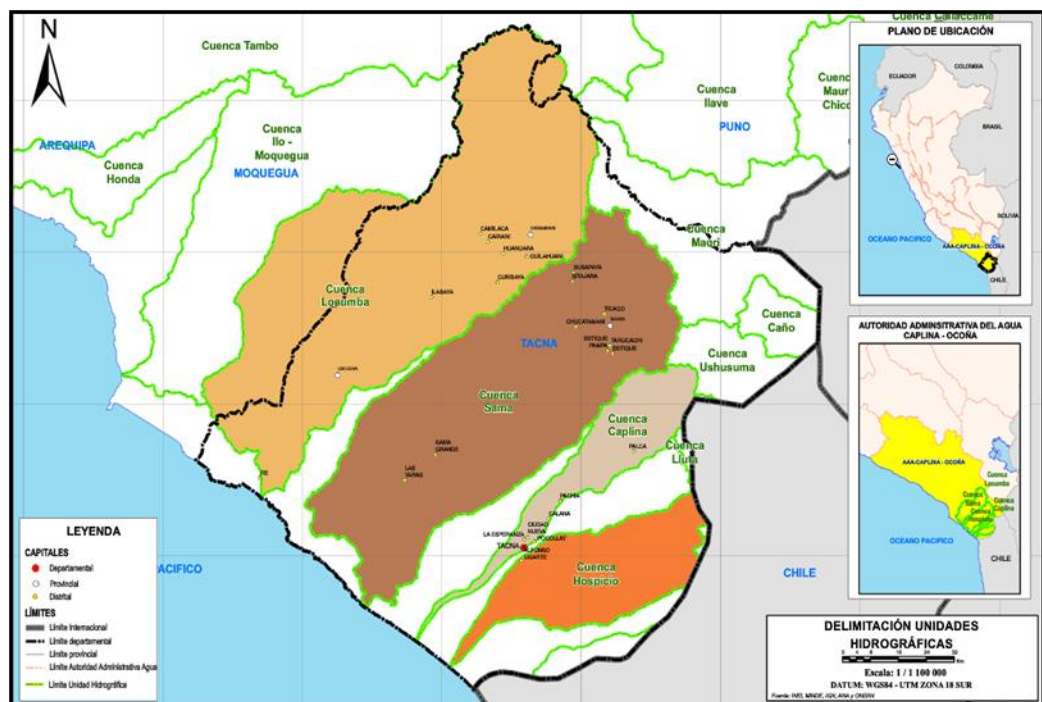
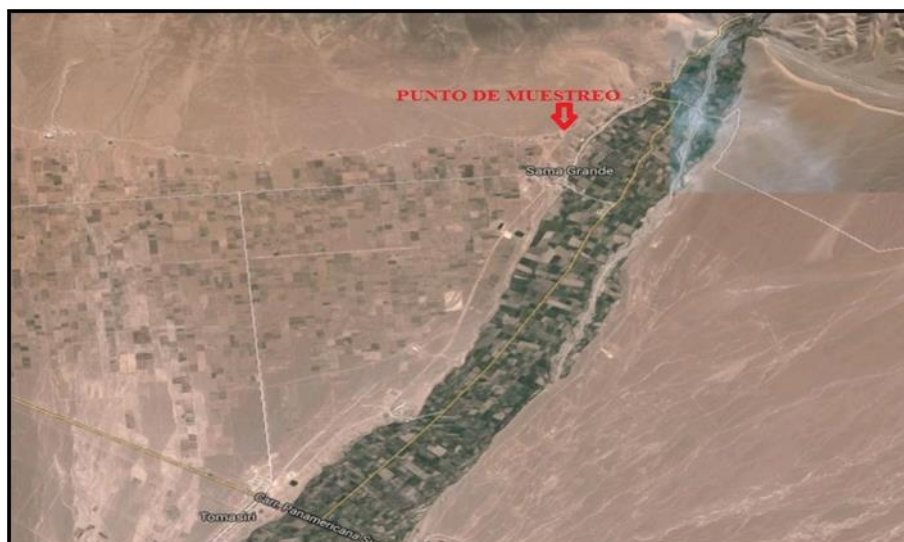


Figura 1. Demarcación de Cuencas Hidrográficas de Tacna

Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2010.



**Figura 2.** Vista satelital del distrito de Sama Inclán, se aprecia en la parte superior el punto de muestreo

**Fuente:** Google Earth, 2015.



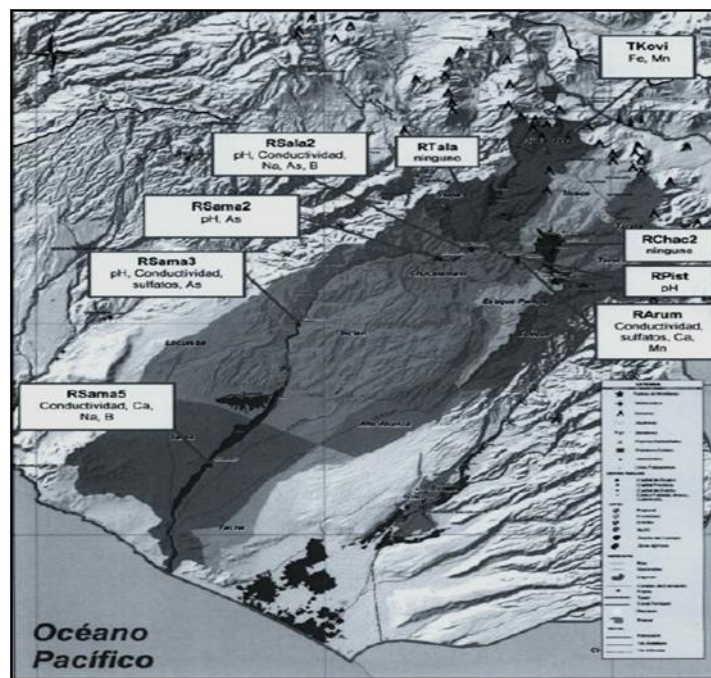
**Figura 3.** Localidad de Sama Inclán

**Fuente:** Elaboración Propia, 2015.

**Tabla 1**  
**Aspectos generales de la cuenca**

Características	Descripción
Nombre de la Cuenca	Sama
Vertiente hidrográfica	Pacífico
Unidad Hidrográfica	1315
Jurisdicción (ALA)	Administración local de agua Locumba Sama
Superficie	4 616,65 Km <sup>2</sup>
Río Principal	Río Pistala. Río Tala y Río Sama
Ríos Tributarios	Río Chacavira. Río Tacalaco. Río Salado. Río Aruma
Principales usos	Población agrícola

Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2010.



**Figura 4.** Esquema de los puntos de monitoreo del agua superficial de la cuenca Sama

**Fuente:** Autoridad Nacional del Agua, 2010.

### 2.1.1.1 Población

En la cuenca Sama la población se concentra mayormente en la provincia Tarata, en los distritos Sama Inclán y las Yaras. Es importante resaltar que en esta cuenca se encuentran los principales sectores de demanda de agua, principalmente para consumo humano y regadío (Autoridad Nacional del Agua, 2010). Las proyecciones de la población por cuencas hidrográficas que conforman las cuencas de región Tacna, se presentan como:

**Tabla 2**  
Proyecciones de la población

Cuenca	Proyecciones de la población				
Caplina - Uchusuma	185 589	229 679	256 280	345 584	436 080
Sama	10 589	15 279	12 956	34 286	58 374
Locumba	20 779	26 260	18 245	54 260	93 035
Maure	1 346	752	1 300	1 834	2 009
Total	218 299	271 970	288 781	435 964	589 498
Ámbito					

Fuente: Autoridad Nacional del Agua, 2010.

### 2.1.2 Arsénico

El arsénico (As) es un elemento natural distribuido extensamente en la corteza terrestre, su concentración en la superficie es de 1,5 a 2,0 mg/L. y están presentes principalmente los compuestos inorgánico; sin embargo, su distribución en el mundo no es uniforme (Jones, 2007). En el ambiente, el arsénico se combina con oxígeno, cloro y azufre para formar compuestos inorgánicos de arsénico. Por el contrario en animales y en plantas el arsénico se combina con el carbono y el hidrógeno para formar compuestos orgánicos de arsénico. A pesar de su distribución natural, el arsénico es un elemento tóxico que causa preocupación, estando clasificado como un carcinógeno humano (*International Agency for Research on Cancer, IARC*). La Agencia para Substancias Tóxicas y Registro de Enfermedades cataloga al arsénico dentro de las 10 sustancias más dañinas, situándola de hecho en la posición número 1. (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR, 2005*).

### **2.1.3 El arsénico en el mundo**

Beber agua contaminada con arsénico se considera un problema mundial de salud pública. En países como Taiwán, Bangladesh, China, Japón, Finlandia, India, Cambodia, Nepal, Mongolia, Nueva Zelanda, Vietnam, Filipinas, Argentina, Chile, Estados Unidos y México se conoce que existe dicha exposición. (Cebrián et al., 1994; Jones, 2007; Yoshida et al., 2004)

En Europa los países más afectados, según el estudio son Hungría, Serbia y Croacia. En Hungría más de un millón de personas beben agua que sobrepasa los límites de contaminación indicados por Naciones Unidas. Según la OMS, el agua es perjudicial si contiene más de 0,01 mg/L de arsénico. A pesar de los estragos de salud que causan las altas concentraciones de arsénico en el agua, solo a partir del 2009 los gobiernos están obligados ante la ONU a hacer cumplir las medidas sanitarias que exigen concentraciones más bajas en los niveles de dicho metaloide.

En América Latina el arsénico también causa estragos; el reporte de la ONU menciona a Argentina, Chile y México

como países en los cuales se han encontrado “aguas subterráneas contaminadas con arsénico”.

La contaminación del agua potable con arsénico puede considerarse en la actualidad como una problemática local ya que afecta a un sinnúmero de personas, monitoreos recientes realizados por la Autoridad Nacional del Agua y Autoridad local del Agua Tacna en las aguas de las cuencas Caplina, Sama y Uchusuma muestran la presencia de Arsénico. (Autoridad Nacional del Agua - Perú, 2010)

#### **2.1.4 Presencia química del arsénico en aguas naturales**

Las fuentes de exposición al arsénico pueden ser tanto naturales como antropogénicas. (Vahter, 1988)

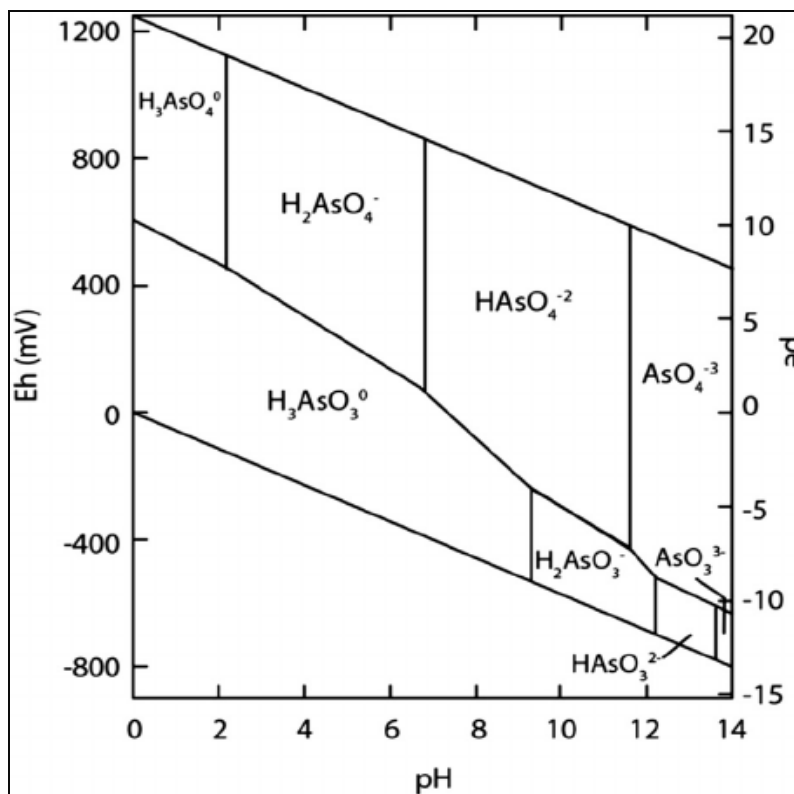
El origen natural del arsénico en el agua subterránea está ligado a la litología de los materiales geológicos que conforman el acuífero y a los procesos de oxidación-reducción que afectan a este elemento. El origen más común del arsénico es la oxidación de minerales con alto contenido en arsénico como pueden ser la arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), la escorodita ( $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), y la oropimenta ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ) que pueden aparecer en diferentes ambientes

geológicos (Peters & Blum. 2003; Scareck et al., 2004). En estos casos generalmente se puede apreciar una estrecha relación entre el pH y las concentraciones de As y Fe en el agua. Debida a las características hidrogeoquímicas de este elemento (Smedley & Kinninbuerg, 2002). Otros orígenes están ligados a factores antrópicos como son la lixiviación de residuos de minas (Armienta et al., 1997) o el uso de plaguicidas (Liu et al., 2003).

En el agua, el arsénico se encuentra en dos estados de oxidación: trivalente (arsenito) y pentavalente (arseniato); en su mayoría está presente en esta última forma; sin embargo en condiciones anaeróbicas sucede lo contrario. Su presencia en el agua se encuentra asociada a la interacción de la roca con el agua; esto ocurre principalmente en aguas subterráneas por los depósitos sedimentarios y de minerales de sulfuro derivados de rocas volcánicas (World Health Organization. 2011). Adicionalmente, los acuíferos por sus características físicas y geoquímicas favorecen la movilización y acumulación del arsénico. Altas concentraciones de arsénico en aguas subterráneas se han

encontrado en áreas geotérmicas (10 hasta 370  $\mu\text{g/L}$ ) o de actividad minera (284  $\mu\text{g/L}$ ). (Smedley & Kinniburgh, 2002)

La abundancia de las especies de arsénico uno sobre la otra, es debido al pH del agua y al potencial redox. A valores de pH altos, mayores a 8,5, se da la desorción del arsénico del suelo o evita que este se vuelva a adsorber. El arsénico pentavalente predomina en condiciones oxidantes, las cuales se dan en aguas superficiales; mientras en condiciones reductoras (aguas subterráneas) el arsénico trivalente se encuentra en mayor cantidad este comportamiento se detalla en la Figura 6 (Smedley & Kinniburgh, 2002).



**Figura 5.** Presencia de especies de arsénico en agua en el sistema As-O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O a 298,15 K (25 °C) y 1 atm  
Fuente: Smedley & Kinniburgh, 2002.

### 2.1.5 Toxicidad del arsénico

En humanos se asocia predominantemente con la exposición a arsénico inorgánico. La forma más común de los compuestos de arsénico inorgánico en el aire es el trióxido de arsénico, mientras que en agua, suelo y/o comida son principalmente los arseniatos y en menor cantidad los arsenitos (Tchounwou et al., 1999); sin embargo, los compuestos de arsénico trivalentes son más tóxicos que los

pentavalentes (Hughes, 2002). En la Tabla 3 se muestran las especies de arsénico más relevantes en cuanto a toxicidad se refiere.

**Tabla 3**  
Especies de arsénico importantes por su toxicidad

Formula	Nombre	Tipo de compuesto	Estado oxidación
<b>As(OH)<sub>3</sub></b>	Ácido arsenioso (arsenito)	Inorgánico	3
<b>H<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub></b>	Ácido arsénico (arsenato)	Inorgánico	5
<b>As<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Trióxido de arsénico	Inorgánico	3
<b>CH<sub>3</sub>-As(O)(OH)<sub>2</sub></b>	Ácido monometilarsenico (MMAs <sup>+5</sup> )	Orgánico	5
<b>CH<sub>3</sub>-As(OH)<sub>2</sub></b>	Ácido monometilarsonoso (MMAs <sup>+3</sup> )	Orgánico	3
<b>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-As(O)(OH)</b>	Ácido dimetilarsenico (DMAs <sup>+5</sup> )	Orgánico	5
<b>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-As(OH)</b>	Ácido dimetilarsenoso (DMAs <sup>+3</sup> )	Orgánico	3

Fuente: Carter et al., 2003.

### 2.1.6 Cuenca de Sama

La cuenca Sama, en lo que a pH se refiere, se encuentra dividido en dos grandes sectores, principalmente el conformado por el sector del lado de las microcuencas de Estique y Tarucachi, con pH muy bajos, debido principalmente a la saturación de CO<sub>2</sub> expresada como acidez, con el recorrer de las aguas a través de la cuenca el contenido de carbonatos en el suelo hace que el pH se vaya

incrementando progresivamente hasta su mezcla con el río Pistala, con pH por encima de 7. Seguidamente con la unión del río Pistala y Aruma se forma el río Tala y con la unión del río Salado se forma el río Sama en el puente de Talapalca, por lo tanto el pH de río Sama mucho depende del caudal de ambos ríos. El contenido de hierro en el agua, por otro lado, está determinado por la concentración de este elemento en los ríos Estique y Tarucachi, diluyéndose con el ingreso de todos los demás afluentes del río Sama. El rápido decrecimiento de los contenidos de hierro, se puede deber a procesos de dilución y a la insolubilidad del mismo, lo cual produce una rápida precipitación de las sales de hierro, conforme el pH se incrementa a lo largo del recorrido del río. En la formación de los manantiales por el sector Tarucachi y Estique las concentraciones de hierro llegan a valores por encima de 50 mg/L Fe, sin embargo este elemento va diluyendo su concentración hasta llegar a valores de 0,12 mg/L Fe. (Franco, Ponce & Rodríguez, 2012)

El contenido de Arsénico en el río Sama está determinado por la concentración de este elemento en el río Salado, el río Tala contiene valores muy bajos de Arsénico

provenientes de los ríos Pistala y Aruma. El río Salado al mezclarse con las aguas del río Tala diluye su concentración a valores de 0,25 a 0,30 m/L As, y que van precipitando progresivamente hasta llegar a la Boca del río Sama. Aún sí los contenidos de Arsénico a lo largo del río Sama son elevados, y sobrepasan la normatividad para aguas de consumo humano. (Franco, Ponce & Rodríguez, 2012).

#### **2.1.7 Legislación para la concentración límite de arsénico en agua.**

Las primeras guías de la OMS relativas a la calidad del agua potable son de 1958 e indicaban una concentración de arsénico máxima de 200 µg/L. En 1963, la concentración permitida se redujo a 50 µg/L. Posteriormente, para prevenir la ingesta de dosis peligrosas de arsénico la organización propuso adoptar una concentración máxima de arsénico igual a 10 µg/L valor que mantiene actualmente y que también se adopta en Estados Unidos y Europa. En este último caso se establece también que la concentración de arsénico en agua cruda para potabilizar debe ser inferior a 10 µg/L ó 0,01mg/L.

A pesar de las recomendaciones de la OMS, muchos países mantienen todavía el viejo estándar de 50 µg/L para el agua potable, como es el caso de Bahrein, Bangladesh, Bolivia, China, Egipto, India, Indonesia, Omán, Filipinas, Arabia Saudita, Sri Lanka. Vietnam y Zimbabwe. Por el contrario, entre los países que adoptaron una norma más estricta está Australia con un umbral de 7 µg/L. (Petrusevski & Sharma, 2007)

**Tabla 4**  
Regulación para arsénico en agua potable.

Medio	Organización o País	[As]máximo permisible
Agua potable	Australia	7 µg/L
Agua potable	OMS. Argentina. India. Canadá. Japón. Nueva Zelanda. Unión Europea. Taiwán. Vietnam	10 µg/L
Agua potable	Bangladesh. Chile. Croacia. Ecuador. Ghana. Nepal. México y Tailandia	25 µg/L

**Fuente:** Mercado, 2013.

En la Tabla 4, se presentan las normas y criterios de concentración máxima permisible de arsénico para agua potable. Como se puede observar, los niveles permisibles de arsénico en agua potable son muy bajos debido al daño potencial que puede ocasionar en la salud humana.

En el Perú, según el Reglamento de la Calidad de Agua para Consumo Humano (DIGESA, 2011) el límite máximo permisible de arsénico es de 0,01 mg/L.

### **2.1.8 Procesos de remoción de arsénico**

A continuación se presentan los antecedentes sobre la remoción de arsénico con diferentes procesos.

#### **2.1.8.1 Procesos físicos**

La remoción a pH neutro en pruebas realizadas a nivel de planta piloto de 96 - 99 % para  $As^{+5}$  y para  $As^{+3}$  de 46 – 84 %; la concentración de arsénico en el efluente cumplió con los criterios recomendados por la OMS (Ning, 2002). Otros procesos también empleados son la nanofiltración y la electrodiálisis (Kartinen & Martin, 1995). No se utiliza microfiltración y ultrafiltración debido a que el tamaño de poro de las membranas de estos procesos no retiene las especies de arsénico presentes en agua (Litter et al., 2010).

### **2.1.8.2 Procesos químicos**

### **2.1.8.3 Coagulación-Floculación**

Es el proceso más usado en plantas de tratamiento (Litter et al., 2010; Chong et al., 2007) removieron arsénico del drenaje ácido de minas usando como floculante sulfato férrico; posteriormente aplicaron un proceso de adsorción con calcita con una dosis de 5 mg/L y lograron una remoción superior al 99 % con pH de 7,6 y  $[As]_{Inicial}$  de 5,07 mg/L. (Song et al., 2006)

Removió arsénico de varios ríos contaminados con  $[As]_{Inicial}$  de 16 a 28  $\mu\text{g/L}$ . usando como coagulante sulfato de aluminio y trabajando con pH de 7,2; el tren de tratamiento usado fue el convencional, es decir, coagulación-floculación-filtración-oxidación con remociones que se encuentran en un intervalo de 85 - 99 % de las dos especies (arseniatos y arsenitos). De igual forma (Kang et al., 2003) utilizaron sulfato de aluminio y removieron hasta 95 % en pruebas

realizadas a nivel de laboratorio con una concentración inicial de 29 µg/L a pH 7. (Gregor, 2001)

#### **2.1.8.4 Precipitación**

Este método muestra ciertas ventajas económicas aunque presenta el inconveniente de generar una gran cantidad de lodos. Las reacciones involucradas son la formación de oxoaniones de arsénico con cationes, el ejemplo más común es la precipitación de arseniato de calcio a partir de la adición de cal; otros reactivos con los que se puede precipitar son sales de manganeso y de aluminio, las remociones se encuentran alrededor de 90 % (Henke, 2009; Litter et al., 2010).

#### **2.1.8.5 Electrocoagulación**

Este proceso se ha estudiado poco debido a la formación de la especie arsina ( $As^{-3}$ ), compuesto gaseoso, inflamable y altamente tóxico (Choong et al., 2007), es posible emplear electrodos de aluminio y hierro o la combinación de aluminio/hierro en un

intervalo de pH de 4 a 10 y con  $[As]_{\text{Inicial}}$  de 1,4 mg/L con remociones de 98 % (Gomes et al., 2007). Las remociones son mayores a 95 % y un ejemplo en México se localiza en el estado de Coahuila, ciudad de Torreón, donde opera un reactor a nivel de planta piloto con un pH de 6 y una concentración inicial de arsénico de 2,2 mg As/L. (Parga et al., 2005)

#### **2.1.8.6 Oxidación**

La oxidación es un paso previo para transformar el  $As^{+3}$  en especies más fácilmente removibles como  $As^{+5}$ . El cloro es un oxidante rápido y eficaz, pero puede reaccionar con materia orgánica produciendo trihalometanos (Henke, 2009; Litter et al., 2010; Choong et al., 2007).

Un ejemplo de remoción de arsénico por tratamiento compuesto por pre-oxidación con ozono-floculación-filtración con arena lo reportan que con el fin de que el efluente sea potable removieron  $As^{+3}$  y  $As^{+5}$  con una concentración inicial de As total

de 148 µg/L; se obtuvieron remociones para las dos especies mayores a 99 %. (Manojlovíc et al., 2009)

#### **2.1.8.7 Intercambio iónico**

Es el proceso fisicoquímico de intercambio reversible de iones entre las fases líquida y sólida, donde no hay un cambio permanente en la estructura de sólido. La solución se pasa a través del lecho hasta que este se satura y el intercambio se detiene. En ese momento la resina (fase sólida) se reactiva con una solución regenerante que retira los contaminantes retenidos, para la disposición como efluente líquido. Las resinas de intercambio iónico consisten de una matriz polimérica de enlace cruzado, con grupos funcionales cargados que se adhieren a la matriz a través de enlaces covalentes, que pueden clasificarse en ácidos fuertes, ácidos débiles, bases fuertes y bases débiles (Mercado, 2013).

#### **2.1.8.8 Adsorción**

Es el proceso más reportado y permite utilizar una gran cantidad de adsorbentes entre los que se encuentran; alúmina activada, carbón activado, óxidos e hidróxidos de hierro, hidrotalcitas, caolinitas, silicatos como montmorillonita y zeolitas, óxido de cerio y dióxido de titanio (Henke, 2009; Litter et al., 2010).

En cuanto a las condiciones generales para estos adsorbentes convencionales la concentración inicial va de 0,05 a 10 mg As/L, la dosis de adsorbentes de 0,05 a 15 g/L, el tiempo de 2 a 48 horas y los porcentajes de remoción obtenidos van de 95 a > 99 %. Se observa que aunque se tengan altas concentraciones iniciales de arsénico se pueden obtener altos porcentajes de remoción (Mercado, 2013).

### 2.1.8.9 Tecnologías Emergentes

#### A. Remediación in situ

Se dispone de las tecnologías como biorremediación y barreras reactivas permeables, estas últimas son las más eficientes para la remediación *in situ*, en especial para aguas subterráneas (Bang et al., 2005), Los óxidos de hierro o aluminio son los materiales que se pueden emplear, recientemente se están utilizando las nanopartículas de hierro cero valente para eliminar tanto arsenitos como arseniatos obteniéndose concentraciones por debajo de 10 µg/L, esta tecnología pretende disminuir los costos.

Algunos países donde ya se utilizan barreras reactivas permeables son: Alemania, Canadá, Australia, Dinamarca, República Checa y Estados Unidos de América (Henderson & Demond, 2007; Müller & Nowack, 2010).

#### **2.1.8.10 Combinación de procesos**

Se utilizan en comunidades y escalas pequeñas con el fin de minimizar costos, por ejemplo, en el Perú se usa un proceso de floculación con sulfato de aluminio denominado ALUFLOC (floculación con aluminio) donde el tren de tratamiento consiste en una pre-oxidación (cloro), adsorción (arcillas activadas) y coagulación, estos procesos remueven hasta 98 % de As, con una concentración inicial de 1 mg As/L y a medida que aumenta la concentración de este contaminante la remoción disminuye (Castro de Esperanza, 2006). En otro estudio se reporta el uso de un hidrogel de hidróxido de aluminio que se agrega directamente en agua para uso en casas, el hidrogel está compuesto por sulfato de aluminio hidratado, calcio en polvo, hipoclorito de sodio e hidróxido de amonio, este reactivo se ha probado en Argentina en aguas subterráneas con  $[As]_{inicial}$  de 40 - 800  $\mu\text{gAs/L}$  y se obtiene una  $[As]_{final}$  de 10  $\mu\text{gAs/L}$  (Luján, 2001).

#### **2.1.8.11 Proceso de óxido-reducción/adsorción con nanopartículas de hierro cero valente**

La remoción del arsénico es por medio de los hidróxidos de hierro, los cuales poseen una alta capacidad de adsorción de las especies  $As^{+5}$  y  $As^{+3}$ , se forma una capa de óxidos en la superficie donde se efectúa el proceso de adsorción (Mak et al., 2009), las remociones son > 99 %, según se observa en la Tabla 6, En la superficie del material se forman especies de hierro como magnetita, maghemita o hidróxido de hierro (Litter et al., 2010).

En cuanto a las condiciones experimentales señaladas en algunos reportes bibliográficos se tiene que las concentraciones iniciales van de 0,5 a 5 mg As/L, con dosis de 1 a 5 g/L de adsorbente y los porcentajes de remoción obtenidos van de 99,5 a 99,9 %. Se menciona que el empleo de adsorción con nanopartículas de hierro cerovalente aumenta favorablemente la remoción de arsénico con el fin de mejorar la recuperación de las nanopartículas

de hierro cerovalente se ha intentado soportarlas en carbón activado (Dou et al., 2010; Zhu et al., 2009).

**Tabla 5**

Estudios reportados del proceso de adsorción de arsénico con nanopartículas de hierro cerovalente.

<b>[As]<sub>Inicial</sub> mg/L</b>	<b>Dosis (g/L)</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (horas)</b>	<b>Remoción (%)</b>	<b>Referencia</b>
0,5	1	4-9	nr	2	> 99	Bang et al., 2005
0,2	2	4-7	nr	9	99,9	Biterna et al., 2007
1	2	7	20	6	99,5	Cornejo et al., 2008
5	5	7	25	3	> 99	Dou et al., 2010
0,6	2	7	nr	2	99	Lien & Wilkin, 2005

Fuente: Mercado, 2013. nr: No reportado

#### **2.1.8.12 Adsorbentes no convencionales como materiales geológicos naturales y de bajo costo**

Existe un gran número de este tipo de adsorbentes y paulatinamente se van incrementando debido a factores como su disponibilidad y bajo valor económico; se pueden clasificar en lo siguiente:

- Diferentes formas químicas del hierro (natural o soportado) como: maghemita (Tuutijärvi et al.,

2009), magnetita (Yean et al., 2005), hematita (Giménez et al., 2010), hidróxido de hierro, fosfatos de hierro y goethita (Giménez et al., 2010), en materiales recubiertos con óxidos de hierro como el cemento. (Kundu & Gupta, 2006)

- Materiales geológicos: Caolinitas, suelos (Mohan & Pittman, 2007), zeolitas naturales, piedra volcánica y clinoptilolita la cual puede ser obtenida de los estados de Sonora, Oaxaca, Puebla y San Luis Potosí. (Elizalde-González et al., 2001)
- Sub-productos: Cenizas volantes, lodos rojos, escorias metalúrgicas y cabellos humanos. (Mohan & Pittman, 2007)

**Tabla 6**

Estudios reportados del proceso de adsorción de arsénico con adsorbentes no convencionales

Adsorbente	[As] Inicial (mg/L)	Dosis de adsorbente (g/L)	Tiempo (horas)	%	Referencia
Lodos rojos	0,2	10	24	90	Genc, 2004
Cenizas volantes	1-10	5	24	99	Wang <i>et al.</i> , 2008
Zeolitas volcánicas	0,1	20	18	80	Ruggieriet <i>et al.</i> , 2008
Escorias metalúrgicas	1,40	nr	7	80	Mohan y Pittman, 2007
Cabellos humanos	0,3	nr	5	70	Mohan y Pittman
Zeolita W (cenizas volantes)	0,7	10	8	>99	Medina <i>et al.</i> , 2010
Lana de hierro	10	20	nr	85	Campos, 2003
Hematita	0,1	nr	1	99	Singh <i>et al.</i> , 1996
Hematita	1	10	8	80	Guo <i>et al.</i> , 2007
Hematita/Goethita	0,07-0,5	2	24	80	Mamindy <i>et al.</i> , 2009
Goethita	12	2,5	20	95	Asta <i>et al.</i> , 2009
Goethita	0,1-1	0,8	24	99	Luxonet <i>al.</i> , 2008
Maghemita	0,25	5	5	95	Tuutijarvi <i>et al.</i> , 2009
Magnetita	0,2	2,5	24	>99	Mayo <i>et al.</i> , 2007

**Fuente:** Mercado, 2013. nr: No reportado

En la Tabla 6 se presentan las condiciones experimentales para algunos adsorbentes no convencionales. En cuanto a las concentraciones iniciales se encuentran entre 0,07 y 10 mg As/L, con dosis de 0,8 a 20 g/L de adsorbente, los porcentajes de remoción van de 70 a > 99 %, Se observa que el empleo de adsorbentes no comerciales remueve satisfactoriamente el arsénico.

#### **2.1.8.13 Tecnologías fotoquímicas**

Son también tecnologías de bajo costo ya que emplean la luz solar utilizando hierro disuelto para la remoción de  $As^{+3}$  y  $As^{+5}$ ; se denominan SORAS (Oxidación Solar y Remoción de Arsénico), se han utilizado en Bangladesh, Argentina, Nicaragua, Perú y Chile; en este método, el agua contaminada se coloca en botellas de polietilertfalato (PET) transparentes (botellas de refresco o agua) con unas gotas de limón (ácido cítrico), donde se irradia con la luz solar, para formar el complejo  $Fe^{+3} +$

citrato, se le agrega limadura de hierro, también se llevan a cabo reacciones de foto-Fenton, el proceso dura alrededor de 3 horas; otro tipo de proceso empleado es con TiO<sub>2</sub> (Choong et al., 2007; Litter et al., 2010). En la Tabla 7 se presentan las ventajas y desventajas que muestran las tecnologías emergentes para la remoción de arsénico, cabe destacar que en la mayoría de los casos las remociones son muy altas.

**Tabla 7**

Ventajas y desventajas de tecnologías emergentes (Choong et al., 2007; Litter et al., 2010)

Proceso	Ventajas	Desventajas
Remoción <i>in situ</i>	Bajo costo de operación Contaminación puntual	Impacto ambiental a largo plazo Corrosión del material
Combinación de procesos	Bajo costo Alta remoción	Pequeña escala Generación de lodos
Proceso de óxido-reducción/adsorción con nanopartículas de hierro cerivalente	Alta remoción para As (III y V) Alta superficie de contacto	Producción de lodos Síntesis compleja
Adsorbentes no comerciales	Bajo costo Usados en países en desarrollo	Daño al medio ambiente Disposición del adsorbente
Fotoquímico	Bajo costo Uso en poblaciones aisladas	Adición de hierro Se requiere pH ácido

Fuente: Mercado, 2013.

## **2.1.9 El acero y sus constituyentes**

### **2.1.9.1 El acero**

Los aceros y las fundiciones de hierro son materiales basados en las aleaciones de hierro y carbono, a las que se adicionan otros elementos de aleación, con el propósito, muchas veces, de endurecerlos, ya que el metal hierro policristalino con una muy alta pureza (60 ppm de impurezas), material muy blando: su límite elástico ronda los 150 MPa. (Belzunce, 2001)

### **2.1.9.2 Constituyentes del acero**

Los aceros son aleaciones hierro-carbono. El carbono es un elemento intersticial, que se inserta en los huecos de las diferentes estructuras del hierro. La solución sólida de inserción del carbono en el hierro se denomina austenita. La solución sólida de inserción del carbono en el hierro se denomina ferrita. Existe un tercer constituyente de gran importancia en los aceros. Se trata del carburo de hierro o cementita, de fórmula  $Fe_3C$  (Belzunce,

2001). Según Leupin y Hug (2005), citado por Mamani (2013), p. 94, el uso de hierro metálico para quitar el arsénico de las aguas es promisorio por varios motivos:

- El hierro metálico es ampliamente disponible y los rellenos de hierro pueden hacerse localmente aún en localidades pobres y a bajo costo.
- La corrosión de hierro convierte al hierro en un fuerte adsorbente de óxidos de hierro.
- Los reactivos intermedios formados durante la corrosión de hierro metálico en aguas aireadas oxidan el  $\text{As}^{3+}$  a  $\text{As}^{5+}$ .
- La combinación de la oxidación de  $\text{As}^{3+}$  y de la adsorción de  $\text{As}^{5+}$ . hacen innecesario el empleo oxidantes químicos.

Los resultados de experimentos de laboratorio son satisfactorios con el hierro valencia cero, sea que usen cartuchos llenos de la arena, materiales locales de hierro, lana de hierro y gravilla de hierro

obtenido de la basura industrial, así como rellenos de nanopartículas de ZVI (Mamani, 2013).

### **2.1.10 Limón Sutil**

También llamada lima ácida, lima gallega, limón ceutí, limón mexicano, limón peruano, limón criollo o limón de pica. Su nombre científico es *Citrus Aurantifolia Swingle*. El siguiente cuadro muestra los valores nutritivos del limón, en una muestra de 100 g. (AMPEX, Perfil de Mercado de Limón, 2008)

En la Costa Norte de nuestro país, los departamentos de Tumbes, Piura y Lambayeque, tienen condiciones de clima y suelo excepcionales, para el cultivo de Limón Sutil (*Citrus aurantifolia swingle*), cuya cosecha continua durante todo el año, genera una actividad fluida en lo económico y social. La producción que está destinada principalmente al mercado nacional para el consumo fresco. (Vegas & Narrea, 2011)

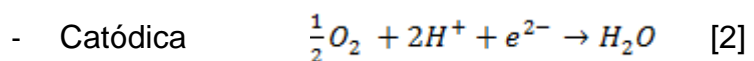
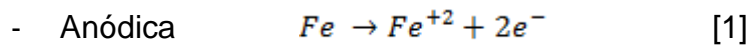
#### **2.1.10.1 Características del Limón sutil**

- Variedad: *Citrus Aurantifolia Single* (Conocido como Limón Sutil)

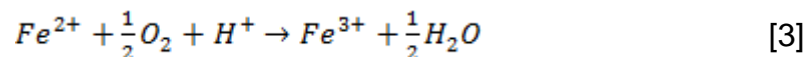
- Diámetro Polar/Ecuatorial: 4,27 cm a 4,82 cm /  
4,22 cm a 4,57 cm
- Volumen de jugo / limón: 11,18 cc. a 20,37 cc
- pH: 2
- Brix: 6,7 a 8,4 %
- Nro. de semillas/de gajos : 5 a 7 / 10
- Color: verde amarillo (Pinton)

### 2.1.11 Reacciones Químicas involucradas en la Remoción de Arsénico

#### A. Reacciones oxido – reducción



#### B. Oxidación Ion férrico

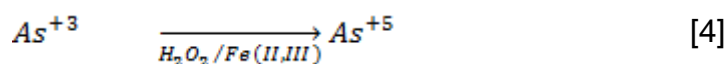


Los productos de corrosión, siendo el  $Fe(OH)_3$  predominante, precipitan en forma de pequeñas partículas coloidales que lentamente se aglomeran (flocs) y tiene la capacidad de retener arsénico por adsorción, la mayor parte del hierro oxidado con arsénico retenido abandona el reactor

el cual posteriormente es separado por filtración. (Organización Mundial de la Salud, 2003., Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y ciencias del ambiente, 2005).

### C. Estado del Arsénico

El  $As^{+3}$  es oxidado a  $As^{+5}$  por intermedio de la formación en la oxidación del  $Fe^0$  y  $Fe^{+2}$  por el oxígeno.



Esta forma de oxidación tiende a ocurrir cuando el hierro se oxida bajo el agua. (Anke et al., 2013)

### D. Reacción del ácido cítrico

La formación simultánea de la oxidación del hierro en el reactor por medio de agitación, es acelerada con complejos de citrato de hierro y especies oxidadas del oxígeno como el superóxido, que se muestra en la Figura 6.



de reacción, reacciones de (1) a (4) de (King et al., 1995), reacciones de 5 a 7 de (Hug et al., 2001).

**Tabla 8**

Resumen de las Reacciones en la Remoción de Arsénico

Reacciones	
$Fe^{II} + O_2 \rightarrow Fe^{III} + O_2^-$	(1)
$Fe^{II} + O_2^- + 2H^+ \rightarrow Fe^{III} + H_2O_2$	(2)
$Fe^{II} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{III} + OH^\cdot + OH^-$	(3)
$Fe^{II} + OH^\cdot \rightarrow Fe^{III} + OH^-$	(4)
$Fe^{II} Cit \leftrightarrow Fe^{II} + Cit$	(5)
$As^{III} + O_2^- + 2H^+ \rightarrow As^{IV} + H_2O_2$	(6)
$As^{IV} + O_2 \rightarrow O_2^- + As^V$	(7)

Fuente: Removal of Arsenic (III) from Contaminated Waters using Iron (II) and Citrate (Geroni et al., 2009)

Se realizó la remoción de arsénico utilizando un método convencional de adsorción a base de hierro, debido que el mismo presenta mayor capacidad de adsorción de arsénico y eficiencia. (Amy et al., 2005, Chang et al., 2004, Jain y Singh, 2012, Jekel, 1994, Jeong et al., 2007)

Una vez acondicionado todos los insumos, de acuerdo a cada prueba experimental, para cada vaso precipitado de 1000 ml en Prueba de Jarras a las diferentes condiciones, se produce reacciones en donde el hierro adsorbe al Arsénico.

### 2.1.12 Base teórica para el modelo matemático

En muchos problemas hay dos o más variables relacionadas, y el interés se centra en modelar y explorar esta relación, Suponga que hay una sola variable dependiente o de respuesta y que depende de k variables, por ejemplo  $X_1, X_2, X_3 \dots X_k$ , La relación que existe entre estas variables se caracteriza con un modelo matemático llamado modelo de regresión.

Resultados inadecuados a veces se obtienen con una variable. Esto demuestra que una variable independiente no proporciona suficiente información para predecir el valor correspondiente de la variable dependiente. Podemos abordar este problema, si utilizamos variables independientes adicionales y desarrollar análisis de regresión múltiple para lograr una relación significativa. Aquí podemos emplear un modelo de regresión lineal en los casos en que la variable dependiente se ve afectada por dos o más variables controladas. (Coker, A. Kayode, 1995).

La ecuación para el método de regresión lineal es:

$$Y_i = B_0 + B_1X_{i1} + B_2X_{i2} + \dots B_kX_{i1} \quad [5]$$

$Y_i$  = La variable dependiente

$X_{i1} + X_{i2} + \dots + X_{ik}$  = La variable independiente

$i$  = número de variables independientes

$B_0, B_1, B_2 \dots B_k$  = Son los coeficientes de la regresión

$E_i$ : Es el término que representa el error para cada observación.

### 2.1.13 Prueba de jarras

La prueba de jarras es un proceso unitario, la principal prueba de laboratorio para determinar el dosaje de coagulantes en las plantas de tratamiento de agua potable, son simulaciones en el laboratorio de las operaciones de coagulación, floculación-decantación que se realizan en las plantas de tratamiento y purificación de aguas. La coagulación química y la dosificación apropiada de reactivos deben ser seleccionadas por la simulación del paso de clarificación en un laboratorio a escala. La Prueba de Jarras es la que mejor simula la química de la clarificación y la operación llevada a cabo. Un arreglo simple de vasos de precipitado y paletas permite comparar varias combinaciones químicas, las cuales todas están sujetas a condiciones hidráulicas similares. Esta prueba se realiza con

el fin de determinar la concentración óptima de coagulante necesaria para obtener un *floc* de las mejores características. (Restrepo, 2009)

## 2.2 Definición de Términos

- Oxidación: La oxidación es el proceso y el resultado de oxidar. Este verbo refiere a generar óxido a partir de una reacción química. El óxido, por otra parte, es lo que se produce cuando el oxígeno se combina un metal o con los elementos conocidos como metaloides. (Cardiel, 2009)
- Remoción: El término remoción se utiliza para hacer referencia a todo aquel acto que tenga ver con quitar algo de su lugar. (Perez, 2012)
- Adsorción: La adsorción es un proceso mediante el cual se extraen compuestos de interés desde una fase (líquida o gaseosa) y se los concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida). De manera que la adsorción es un fenómeno superficial. (Appelo & Postma, 1993)

- Floculación: Los flóculos, inicialmente pequeños, al juntarse formarán aglomerados mayores, que son capaces de asentarse o sedimentar, este proceso se lo conoce como floculación, esto requiere de un mezclado lento que junte, poco a poco, los flóculos, una agitación demasiado intensa podría romperlos y éstos difícilmente se volverían a formar con el tamaño y cohesión requeridos para las etapas posteriores de tratamiento. (Durán et al., 2011)
  
- Coagulación: La coagulación se define como la desestabilización de suspensiones coloidales mediante la neutralización de las cargas superficiales de las partículas por la adición de coagulantes. (Durán et al., 2011)

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Tipo de investigación**

Según el periodo y secuencia de estudio, se enmarca como transversal. Según el análisis y alcance de los resultados se puede clasificar como experimental evaluativo.

#### **3.2 Población y muestra del estudio**

La muestra de agua estudiada fue representativa del río Sama, se utilizó como referencia la guía para la preservación y manejo de muestras, Norma Técnica Peruana ISO 5667-3-2001.

La toma de muestra, se realizó en el centro poblado de Sama Inclán, zona utilizada también por otras instituciones como el Gobierno Regional Tacna con el Proyecto especial Tacna, aguas arriba del poblado de Sama Inclán; para determinar la calidad fisicoquímica del río Sama, el muestreo se ubica antes del ingreso a la nueva planta de tratamiento de Sama Inclán.

Se procedió a realizar la caracterización fisicoquímica de la muestra de agua recolectada; siguiendo las Normas Técnicas Peruanas para cada parámetro analizado; las pruebas de acondicionamiento de agua, aplicación y preparación de virutas de hierro y limón fueron realizadas en el Laboratorio de Procesos Químicos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann Tacna.

### 3.3 Operacionalización de variables

**Tabla 9**

Descripción y características de las variables de estudio

<b>Variables</b>	<b>Factores</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rango</b>
<b>Independiente</b>	Jugo de limón (Ácido Cítrico)	gotas	gotas	0,8 – 1,6
	Lana de acero (Hierro cero)	masa	g	0,6 -1,8
	Tiempo de contacto	tiempo	min	100–240
<b>Dependiente</b>	Arsénico total	Concentración	mg/L	< 0,01 (*)
	Hierro residual	Concentración	mg/L	< 0,3 (*)

(\*) Según los límites máximos permisibles (Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N° 031-2010-SA).

**Fuente:** Elaboración propia

Las variables independientes la lana de acero (0,8 a 1,6 g), jugo de limón (0,6 a 1,8 gotas) y tiempo (100 a 240 min); y como variable dependiente el arsénico (concentración inicial de 0,37 mg/L ó 370 ug/L). Estos rangos se establecieron tomando como referente varias literaturas (Cornejo *et al.*, 2003). En pruebas realizadas con tecnología cero, menciona que al agregar 1 a 2 gotas de jugo de limón, se observa un aumento de la eficiencia de remoción de arsénico. Sin embargo, cantidades adicionales producen una disminución de eficiencia. Es por ello que en la tesis se usó valores por debajo de 2 gotas de limón para demostrar que la remoción de arsénico es factible. Para determinar la cantidad de lana de acero usada, se tomó como referencia el valor utilizado para la experimentación del autor (Cornejo *et al.*, 2003), y se estableció puntos mínimos y máximos para la experimentación de esta tesis, de la misma forma se determinó el tiempo basado en la referencia bibliográfica.

### **3.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos**

#### **3.4.1 Equipos, instrumentos y materiales**

##### **3.4.1.1 Equipos e Instrumentos**

- 01 Equipo para Test de Jarras Modelo JLT 6, Marca VELP Scientifica.
- Balanza Analítica modelo AR3130, marca Ohaus.
- pH metro modelo Hi 98103 marca Checker®.
- 01 Turbidímetro 2100Q, marca Hach
- 01 Multi-parámetro modelo Orion Star A325 Portable marca Thermo.
- 01 Espectrómetro de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo Modelo Agilent 720 ICP OES
- 02 Equipo de filtración por gravedad acondicionado.

##### **3.4.1.2 Reactivos**

- 01 Test de arsénico, Merckoquant® Arsenic Test 117927.
- Ácido Clorhídrico (HCl) concentrado.
- Fenolftaleína 0,5 %.

- Ácido cítrico de limón sutil (*citrus aurantifolia* swingle).

9

### **3.4.1.3 Materiales**

- Lana de acero.
- Algodón ZigZag- Marca Hansaplast (100 % algodón).
- Papel filtro Whatman No. 40.
- 01 termómetro del Multi-parámetros modelo Orion Star A325.
- 06 vasos precipitados de 1000 mL.
- 08 vasos precipitados de 250 mL.
- 02 pipetas graduadas de 1 mL.
- 02 probetas de 25 mL.
- 01 bureta de 25 mL.
- 02 fioles de 250 mL
- 02 varillas de vidrio.
- 02 bombillas de succión.
- Botellas Plásticas de 2 L.

### 3.4.2 Métodos, Técnicas y normas

- Método de test arsénico MQuant™. Este método está basado en la adición de cinc en polvo, de un ácido y de un oxidante a los compuestos de arsénico (III) y arsénico (V) se libera hidruro de arsénico, que con bromuro de mercurio (II) contenido en la zona de reacción de la tira de ensayo forma halogenuros pardoamarillos mixtos de arsénico y mercurio. La concentración de arsénico (III) y arsénico (V) se determina semicuantitativamente por comparación visual de la zona de reacción de la tira de ensayo con las zonas de una escala colorimétrica. Intervalo de medida / graduación de la escala colorimétrica 0,000 - 0,005 - 0,010 - 0,025 - 0,05 - 0,10 - 0,25 - 0,50 mg/L de As.
- ICP – Método óptico 200.7 Rev. 4.4 1994 (Espectrometría de emisión atómica con plasma de inducción acoplada) para metales totales y disueltos.
- NTP ISO 5667-5-2001 Calidad de agua, muestreo: Guía para la preservación y manejo de muestras.
- NTP 214,025:1990 agua potable, Determinación del pH, método potenciométrico.

- Reglamento de la calidad del agua para consumo humano DS N° 031-2010-SA.

### 3.5 Procesamiento y análisis de datos

#### 3.5.1 Caracterización del agua del río Sama

Para la caracterización fisicoquímica del agua de río Sama (muestra madre) se realizó el muestreo en el año 2014 siguiendo el protocolo propuesto por la Norma técnica peruana en envases de 80 L, luego se trasladó al Laboratorio de procesos químicos de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - Tacna, para realizar los estudios correspondientes.

**Tabla 10**

Análisis fisicoquímico de muestra de agua del río Sama

Muestra	Conductividad (uS/cm)	pH	Temperatura (K)	Turbiedad (UNT)	Arsénico (mg/L)
Agua de río Sama	2 223	8,16	298,35	2,54	0,375

Fuente: Elaboración propia

Una vez en el laboratorio, se tomó 100 mL de la muestra madre en un matraz de Erlenmeyer donde se realizaron las

medidas de los parámetros fisicoquímicos como: pH, conductividad eléctrica, temperatura y turbidez de la tabla 9. Se midió del mismo modo 1000 mL y se procedió a la determinación de Arsénico mediante el test de arsénico. Del mismo modo 250 ml de la muestra madre en caja hermética (cooler), a temperatura adecuada de refrigeración para el análisis de metales totales mediante ICP óptico, al laboratorio de ensayos CORPLAB – ALS del Perú (sede Arequipa) con el objetivo de corroborar los resultados obtenidos en el laboratorio de Procesos Químicos.

### **3.5.2 Caracterización de insumos y variables implicadas en la de remoción arsénico**

#### **3.5.2.1 Preparación y acondicionamiento del Hierro**

El hierro es una de las variables significativas en la remoción de arsénico; ya que ocurren diferentes reacciones debido a la oxidación. Para ello se utilizó el insumo comercial denominado “Lana de Acero”, de tamaño mediano, de marca Virutex, nuestra fuente de hierro cero; que fácilmente la encontramos

en los centros de abasto a nivel Nacional. La aplicación de la dosis de hierro se tomó como referencia de diferentes trabajos de investigación como (Cornejo et al., 2003; Campos, 2002; Mamani, 2013) que usaron hierro en diferentes presentaciones, para remover concentraciones de arsénico.

La lana de acero se dividió en tamaños de 5 mm aproximadamente, preparadas para las diferentes corridas experimentales.

De acuerdo a estudios bibliográficos recolectados, la lana de acero se compone en gran proporción por hierro, en la literatura consultada patente se indica: Carbón < 0,2 %, Silicio < 2 %, Manganeso < 2 %, Azufre < 0,030 %, Calcio > 0,00015 %, Oxígeno > 0,0004 % (Terrien et al., 2001). Como también otra literatura considera que (Cornejo et al., 2008), donde la lana de acero presenta mayor hierro del 98,45 % y Mn 1,28 % Zn 0,02 %, Cu 0,01 % y otros.

### **3.5.2.2 Preparación o acondicionamiento del Ácido Cítrico**

Se tiene como antecedente un estudio en donde se empleó la misma variedad de limón Citrus Aurantifolia Single, conocido como limón sutil con pH de 2 y 6,7 % de ácido cítrico, presenta una coloración verde amarillo (Pintón), de cáscara delgada, fuerte y resistente (Chávez & Miglio, 2011). Esta variedad de limón lo encontramos fácilmente en los centros de abastos a nivel nacional. Esta será nuestra variable independiente.

Por medio de una pipeta volumétrica de 0,5 mL, dividimos sus rangos cada 0,1 mL, se determina que cada 0,1 mL representa 4 gotas del zumo de limón. Ver Anexo 7.

### **3.5.3 Acondicionamiento de velocidad y el tiempo de contacto**

Se utilizó la prueba de jarras para determinar la velocidad y tiempo constante.

Algunos operadores suelen usar 80-100 rpm durante 30 s para la mezcla rápida y 20-40 rpm durante 15-30 min para la mezcla lenta, pero es preferible tratar de encontrar una energía de agitación que produzca un resultado comparable con el nivel industrial. El mantener una velocidad de rotación de las paletas del aparato de prueba de jarras igual a la del mezclador y floculador real, no necesariamente produce resultados comparables (CEPIS, 1973). Según Mamani (2013) operando a pH desde 6,061 a 8,04 y tiempos de 4,76 hasta 10,40 horas para una agitación de 36 rpm, se conseguirá una remoción óptima de arsénico, obteniéndose el agua aceptable. En la tesis, se hicieron estudios previos para encontrar la energía de agitación óptima para la experimentación, donde la velocidad de rotación moderada permite establecer un buen contacto de la muestra con la lana de acero y el jugo de limón, obteniendo como resultante la formación de flocs al final, llegando a la conclusión de que la velocidad de agitación adecuada es de 40 rpm. Se puede verificar en el Anexo 8, los resultados del uso a distintas velocidades.

### **3.5.4 Preparación del proceso de filtración**

Para el proceso de filtración, se acondicionó materiales diversos (Ver Figura 20 del Anexo 6), se utilizó varias botellas de plástico de capacidad de 3 litros cada una, que fueron recortadas a la mitad, por el lado de la tapa. Para la filtración se empleó 1,34 g de algodón (Mamani, 2014) y papel de filtro Whatman No. 40, acondicionado en forma circular de 2,5 cm de diámetro, esto para asegurar una filtración óptima, compactando en los agujeros de las tapas de las botellas PET.

Como se planteó dentro de los objetivos, se pretende determinar la factibilidad del tratamiento fisicoquímico para la remoción de Arsénico; para lo cual se utilizó la prueba de jarras a una velocidad constante de 40 rpm y a una temperatura ambiental de 296,15 K (23°C) para cada prueba experimental.

El desarrollo de la prueba de jarras se llevó a cabo en el Laboratorio de procesos químicos de la Universidad Nacional Jorge Basadre Gohmann de Tacna, se tomaron muestras de las aguas del río Sama.

### 3.5.5 Influencia de Factores en el Diseño Experimental

Para el diseño experimental se aplicó un diseño factorial  $2^3$  con cuatro puntos centrales, considerando como variables independientes, la lana de acero (hierro cero), gotas de limón y el tiempo de contacto, además como variable dependiente se utilizó el  $[As]_{\text{final}}$  residual, donde  $[As]$  Inicial presenta una concentración de 0,37 mg/L ó 370 ug/L.

Los datos experimentales se procesaron por el software **Statgraphics centurión v15 (versión Demo)**, el diseño experimental fue utilizado para conocer las interacciones entre los diferentes factores que intervienen en cada experiencia y determinar cuál es la forma óptima de manejar dichos factores. El modelo de diseño factorial fue usado para hacer predicciones y optimizar la cantidad de todos los insumos aplicados para cada prueba experimental.

El diseño factorial, fue el método más sencillo en comparación de otros modelos para identificar las variables que influyen en la remoción de Arsénico.

Dentro de nuestro diseño factorial, agregamos cuatro puntos centrales, esto nos permitió estimar el error experimental en

el diseño experimental. Los cuatro puntos centrales permitieron estudiar la presencia de curvatura, comportamiento lineal o no lineal en el diseño para ver efecto de las variables independientes sobre la variable de respuesta. (Gutiérrez & de la Vara, 2003)

**Tabla 11**

Niveles de variables

VARIABLES	NIVELES	
	-1	+1
$X_1$	0,6	1,8
$X_2$	0,8	1,6
$X_3$	100	240

Donde:

$X_1$ = Lana de acero (Fuente de hierro cero) [=] g.

$X_2$ = Jugo de limón (Fuente de Ácido Cítrico) [=] gotas.

$X_3$ = Tiempo de contacto [=] min.

**Tabla 12**

Delineamiento factorial ( $2^3$ ) con cuatro puntos centrales de la metodología de superficie de respuesta para contenido de Arsénico

<b>Número</b>			
<b>de</b>	$X_1$	$X_2$	$X_3$
<b>Experimento</b>			
<b>1</b>	0,6	0,8	240,0
<b>2</b>	1,2	1,2	170,0
<b>3</b>	1,2	1,2	170,0
<b>4</b>	0,6	1,6	240,0
<b>5</b>	1,8	1,6	240,0
<b>6</b>	1,2	1,2	170,0
<b>7</b>	0,6	0,8	100,0
<b>8</b>	1,8	1,6	100,0
<b>9</b>	1,2	1,2	170,0
<b>10</b>	1,8	0,8	240,0
<b>11</b>	0,6	1,6	100,0
<b>12</b>	1,8	0,8	100,0

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.6 Construcción del modelo matemático

Conociendo los valores correspondientes de acuerdo al diseño experimental con las variables dependientes e independientes se procedió a efectuar un modelo de análisis

matemático, donde se determinó un modelo empírico que relaciona la respuesta con los factores.

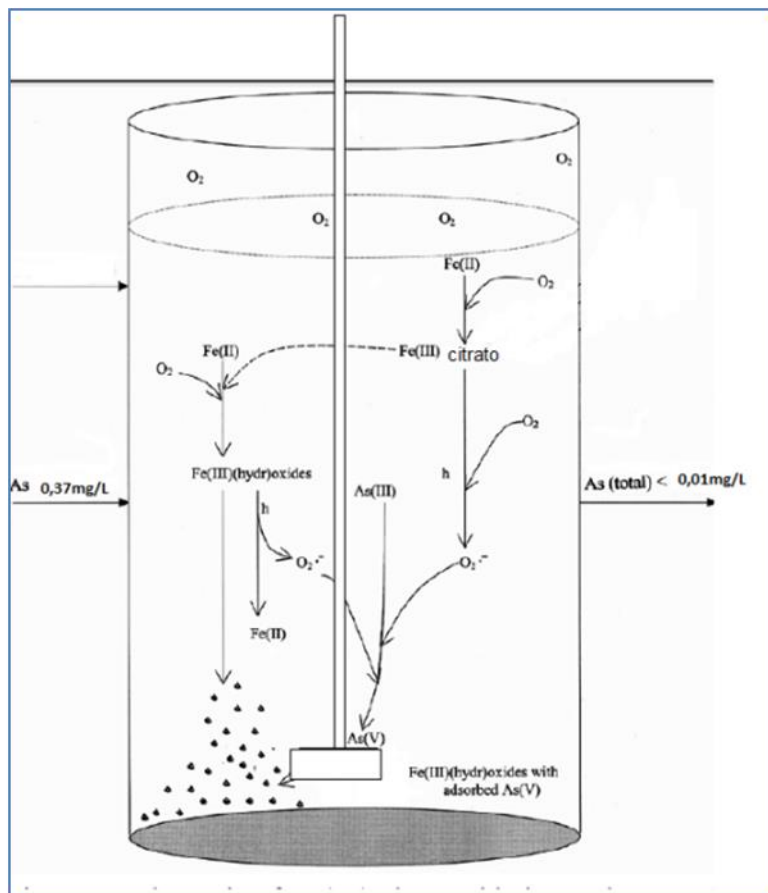
### **3.5.7 Procedimiento experimental**

Para realizar cada uno de los ensayos se siguió los siguientes pasos:

- Se colocó porciones de agua del Rio Sama, llenando a 1000 ml de capacidad en cada jarra simultáneamente, donde la cantidad de Arsénico presente en el agua tiene una concentración inicial de arsénico de 0,37 mg/L ó 370 ug/L.
- Se procedió a colocar las diferentes dosis en cada jarra, la lana de acero en medidas de 5 mm y las gotas de limón de acuerdo a los datos de nuestro diseño experimental Tabla 12, correspondientemente.
- Se encendió el equipo para proceso de agitación a 40 rpm y como medida de control fueron leídas a pH (8,18 – 8,40). Antes se midió el tiempo inicial, donde el agua reacciona con el hierro a los diferentes tiempos de acuerdo a cada diseño experimental.
- Durante el tiempo de mezcla de cada corrida, el  $Fe^0$  en contacto con el oxígeno se oxida a  $Fe^{2+}$  y  $Fe^{3+}$ , luego el  $Fe^{3+}$

reacciona con las gotas de limón un complejo, denominado el citrato de complejo  $\text{Fe}^{3+}$ ; para el caso del  $\text{Fe}^{2+}$  continua su oxidación a  $\text{Fe}^{3+}$ , ya que éste es fácil de oxidarse; esto debido a la saturación de Oxígeno del medio ambiente. También se da la formación de complejo de arsénico e hidróxido de hierro. Para cada prueba experimental, después de 15 minutos de contacto con el material, se observó el inicio de flocs, llegando al tiempo máximo de cada prueba experimental detallado en la Tabla 12.

- Después del tiempo de mezcla para cada experimento, se desconecta el equipo, se detiene la agitación de cada reactor.
- Luego se filtró las diferentes soluciones y se tomó un volumen representativo de la muestra, evitando la mezcla del precipitado resultante con la parte líquida.
- Se anotaron los parámetros de control de las muestras recolectadas después de filtración y la medida de arsénico final.



**Figura 7.** Reactor del Test de Jarras  
 Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1 Resultados**

##### **4.1.1 Análisis fisicoquímico realizado al agua sin tratar**

En la Tabla 13, se presenta el resultado del análisis fisicoquímico de la muestra de agua sin tratar realizado en el laboratorio de procesos químicos de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann Tacna.

La determinación de la concentración de arsénico fue realizado por el test de arsénico indicado en la metodología.

El resultado fue analizado según el método colorimétrico, el valor de arsénico de la muestra madre resulto entre el rango de 0,25 y 0,5 mg/L, como la tira salió un color intermedio se toma el punto medio que vendría hacer 0,375 mg/L, el cual está por encima de los límites permisibles.

**Tabla 13**

Valores Físicoquímicos de muestra de agua sin tratar

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Conductividad</b>	uS/cm	2 223
<b>pH</b>		8,16
<b>Temperatura</b>	K	298,35 (25,2 °C)
<b>Turbiedad</b>	UNT	2,54 (*)
<b>Arsénico</b>	mg/L	0,375

Fuente. Elaboración propia (Análisis en Laboratorio UNJBG, 2014)

(\*) UNT: Unidad nefelométrica de turbiedad

En la Tabla 14 se observa el resultado de análisis de metales totales de la muestra de agua sin tratar, donde se especifica los valores de arsénico y hierro, estas muestras fueron analizadas por el Laboratorio de ensayo acreditado CORPLAB mediante la técnica de análisis ICP óptico. Como se puede observar en esta tabla el valor del arsénico total es de 0,324 mg/L este valor está cercano al resultado obtenido por el test arsénico mencionado anteriormente. Los valores de otros metales de la muestra se revelan en el Anexo 11.

**Tabla 14**

Análisis de muestra de agua sin tratar

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>	<b>LMP</b>
<b>Arsénico *</b>	mg/L	0,324	0,01
<b>Hierro *</b>	mg/L	0,166	0,3

\*Análisis realizado por técnica ICP óptico (metales totales), 2014

Por lo anterior se evidencia que los valores de arsénico en el agua de río Sama, se encuentran por encima de los valores que exige Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N° 031-2010-SA, ver Anexo 12. Por lo contrario, los análisis realizados en el Laboratorio de ensayo acreditado CORPLAB muestran que el hierro se encuentra por debajo de valores que exige Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N° 031-2010-SA, ver Anexo 12.

#### **4.1.2 Arreglo y resultados experimentales 2<sup>3</sup> para la remoción de arsénico**

Los resultados del diseño experimental con 4 puntos centrales, se encuentran descritos en la Tabla 15, así como las variables independientes y la variable dependiente.

La variable dependiente es el arsénico residual del agua tratada después de filtrar (producto final) en el Laboratorio de procesos químicos de la Universidad Jorge Basadre Grohmann, mediante el test de arsénico. Se observa que los resultados de la tabla 15 de los experimentos 1; 5; 10; 12 obtuvieron mayor remoción de As  $\leq 0,005$  mg/L (5 ug/L).

**Tabla 15**

Efecto de las variables: concentración de hierro, concentración de ácido cítrico y tiempo sobre el contenido de Arsénico por Método Semicuantitativo (Test de Arsénico).

N° Experimento	Niveles codificados de variables			pH	[As] <sup>(*)</sup> (ug/L)
	$X_1$ (g)	$X_2$ (gotas)	$X_3$ (min)		
1	0,6	0,8	240,0	8,07	05
2	1,2	1,2	170,0	8,09	10 <sup>(**)</sup>
3	1,2	1,2	170,0	8,09	10 <sup>(**)</sup>
4	0,6	1,6	240,0	8,09	10
5	1,8	1,6	240,0	8,16	00
6	1,2	1,2	170,0	8,10	10 <sup>(**)</sup>
7	0,6	0,8	100,0	8,10	10
8	1,8	1,6	100,0	8,07	10
9	1,2	1,2	170,0	8,08	10 <sup>(**)</sup>
10	1,8	0,8	240,0	8,13	00
11	0,6	1,6	100,0	8,13	25
12	1,8	0,8	100,0	8,13	05

(\*) [As]=Concentración de arsénico (1 mg/L = 1000 ug/L)

(\*\*) Corresponde a los puntos centrales.

Fuente: Elaboración Propia

Donde:

$X_1$ = Lana de acero (g)

$X_2$ = Jugo de limón (gotas)

$X_3$ = Tiempo de contacto (min)

Los cuatro mejores resultados obtenidos de la Tabla 15 más un punto central, se enviaron a analizar al Laboratorio CORLAB mediante la técnica de ICP óptico para verificar los resultados de la experimentación.

**Tabla 16**

Resultados de Concentración de Arsénico y Hierro (ICP óptico) de las muestras de agua posterior al tratamiento.

N°	Variables Independiente			Variable Dependiente	
	Fe (mg/L)	Ac. Cítrico (gotas)	Tiempo (min)	As (mg/L)	Fe (mg/L)
1	0,6	0,8	240	< 0,01	0,183
5	1,8	1,6	240	< 0,01	0,160
9	1,2	1,2	170	< 0,01	0,177
10	1,8	0,8	240	< 0,01	< 0,030
12	1,8	0,8	100	< 0,01	0,234

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla 16, los valores para el arsénico son menores a 0,01 mg/L. Estos valores están corroborando los resultados obtenidos por el test de arsénico y además se logró una eficiencia en la remoción de arsénico del 96,9 %.

De acuerdo a los resultados emitidos por el Laboratorio de ensayos CORPLAB, se consiga el signo “<” que significa que este no pudo ser detectado por el equipo siendo menor al valor LD (Límite de detección). Para el caso del arsénico presenta un LD de 0,010.

#### **4.1.3 Análisis estadístico para la remoción de arsénico**

El tratamiento estadístico del diseño de experimentos de acuerdo al análisis de varianza, por Statgraphics centurión v15 (versión Demo) que se observa en la Tabla 15.

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Arsénico en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 5 efectos tienen un valor-P menor a 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0 %.

El estadístico  $R^2$  indica que el modelo, así ajustado, explica el 97,2603 % de la variabilidad en Arsénico. El

estadístico  $R^2$  ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 93,9726 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 1,58114. El error medio absoluto (MAE) de 0,833333 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0 %, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0 %.

A la vista del resultado analítico podemos afirmar que el ajuste del modelo es bueno, ya que el valor de  $R^2 = 0,9726$  es cercano a 1, en concreto, el 97,2603 % de la variabilidad de la variable, Y a su promedio es explicado por el modelo de regresión ajustado. Podemos concluir que el modelo lineal es adecuado para describir la relación que existe entre estas variables. Además, de acuerdo con el análisis del grado de significancia (Tabla 17), se observa que el contenido de Arsénico en el presente estudio podría ser

influenciado significativamente por los efectos lineales de la lana de acero  $X_1$ ; Jugo de limón  $X_2$ ; Tiempo de contacto  $X_3$ .

**Tabla 17**

Modelo de regresión y grado de significancia de las variables independientes correspondientes a los resultados de la determinación de Arsénico.

**MODELO COMPLETO:**

$$[\text{As}] = -3,125 - 0,446429 \cdot X_1 + 28,5714 \cdot X_2 + 0,0 \cdot X_3 - 7,8125 \cdot X_1 X_2 + 0,014881 \cdot X_1 X_3 - 0,0669643 \cdot X_2 X_3$$

Efecto de las Variables independientes	Nivel de Significación (P < 0,05) Modelo Completo
Lineal	
$X_1$	0,0005(*)
$X_2$	0,0025(*)
$X_3$	0,0005(*)
Interacción	
$X_1 X_2$	0,0202(**)
$X_1 X_3$	0,3144
$X_2 X_3$	0,0202(**)

Fuente: Elaboración propia

Modelos de regresión completo, (errores abajo entre paréntesis); (\*) = muy significativo a 95 % de confianza  $X_1$ = Lana de acero (g);  $X_2$ = Jugo de limón (gotas);  $X_3$ = Tiempo de contacto (min); (\*) = significativo a 95 % para las interacciones; [As] = Contenido de Arsénico (µg/L) correspondientes al modelo completo luego del proceso de estudio.

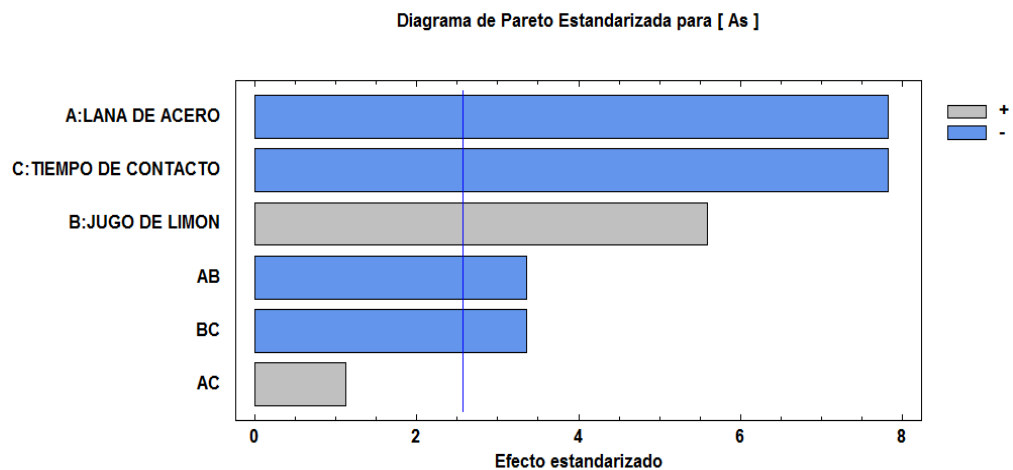
**Tabla 18**

Modelos de regresión y análisis de varianza para los modelos correspondientes a los resultados experimentales del Estudio del contenido de Arsénico.

Fuente	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valores P
A:Lana de acero	153,125	1	153,125	61,25	0,0005
B:Jugo de limón	78,125	1	78,125	31,25	0,0025
C:Tiempo de contacto	153,125	1	153,125	61,25	0,0005
AB	28,125	1	28,125	11,25	0,0202
AC	3,125	1	3,125	1,25	0,3144
BC	28,125	1	28,125	11,25	0,0202
Error total	12,5	5	2,5		
Total (corr.)	456,25	11			

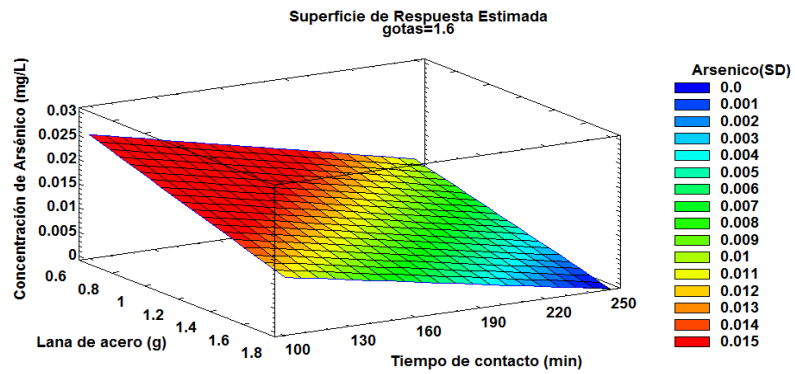
Coeficiente de determinación ( $R^2$ )= 97,2603 %  
 Coeficiente de determinación (ajustada por g.l.) = 93,9726 %  
 Error estándar del est. = 1,58114  
 Error absoluto medio = 0,833333  
 Estadístico Durbin-Watson = 2,5 (P=0,7999)  
 Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,25

Fuente: Elaboración Propia



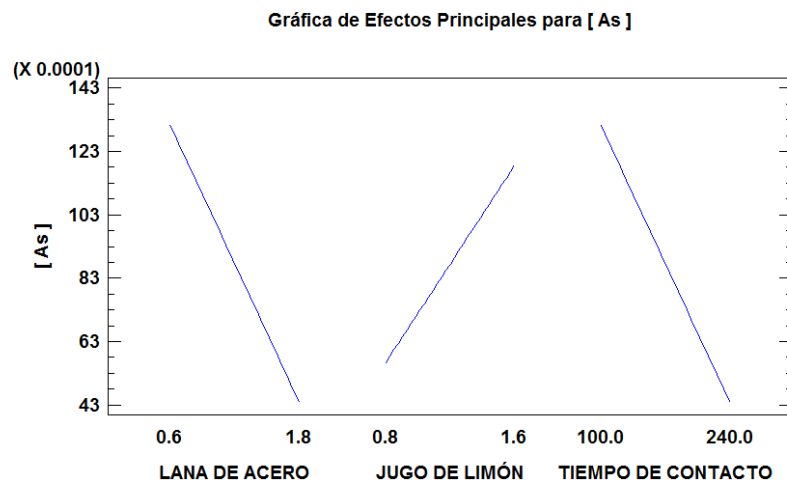
**Figura 8.A) Diagrama de Pareto**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 8.B) Diagrama de Superficie de respuesta de la Concentración de Fe y el tiempo, fijando el contenido de ácido cítrico en 1,6 gotas.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 8.C) Grafica de efectos principales**

Elaboración propia

**Figura 8.A)** En el diagrama de Pareto se destaca que el factor más significativo para este sistema es la lana de hierro

y tiempo de contacto con un efecto negativo, es decir, a medida que la lana de hierro y tiempo de contacto aumenta el porcentaje de remoción disminuye de manera proporcional. El segundo factor más significativo es la concentración de ácido (gotas de limón) con un efecto positivo, es decir, a medida que este factor aumenta, el porcentaje de remoción incrementa de manera proporcional. El tercer factor más significativo es la interacción entre los factores lana de acero y concentración de ácido cítrico como también interacción de tiempo con ácido cítrico con una significancia negativa, por tanto el aumento de estos factores conduce a una menor remoción. Finalmente, las interacciones de concentración de gotas de limón con el tiempo no tienen un efecto significativo en el sistema.

**Figura 8.B)** se presenta el diagrama de superficie de respuesta correspondientes al modelo lineal que muestran la variación del contenido de Arsénico en función de las variables independientes Concentración de Fe Lana de acero (g); y Tiempo (min) manteniendo fija la variable Jugo de limón (gotas) en su máximo valor, es decir en 1,6 gotas. En ella se observa que el contenido de Arsénico disminuye

en forma inversa a la cantidad de la lana de acero y al tiempo contacto, que podría alcanzar una concentración de 0,00 mg/L. De esta manera, los parámetros independientes más adecuados, que mostraron una mayor eficiencia durante la operación, establecieron que una concentración de hierro de rango mayor 1,6 g, un tiempo mayor de 230 min, y una concentración de ácido cítrico de 1,6 gotas, promueven una mayor remoción de Arsénico en muestras de agua.

**Figura 8.C)** La figura representa, en el primer tramo la dosis de hierro disminuye, aumenta la concentración de arsénico en el agua tratada. En el segundo tramo, si la concentración de ácido aumenta, disminuye la concentración del As y el tercer tramo el tiempo disminuye de 240 min a 100 min, aumenta la concentración de As.

#### **4.1.4 Análisis estadísticos de los datos experimentales para la remoción de arsénico - modelo matemático – regresión lineal**

Para representar los factores intervinientes en el proceso de adsorción- oxidación respecto a la remoción alcanzada se

realizó un análisis de regresión múltiple considerando cada una de las variables identificadas como relevantes para la remediación.

El análisis de regresión se realizó sobre los resultados obtenidos en los ensayos con la lana de acero, ácido cítrico en este caso gotas de limón y el tiempo. En el primer grupo, las variables independientes designadas son  $X_1, X_2$  y  $X_3$  las cuales son definidas como:

$X_1$ = Dosis de hierro (mg/L)

$X_2$ = Ácido cítrico (gotas/L)

$X_3$  = Tiempo (min)

$Y$  = Remoción de Arsénico (mg/L)

En esta sección se analiza si a través de una ecuación o modelo matemático, es posible modelar la relación entre la variable dependiente, las variables independientes y coeficientes de ajuste  $B$ .

De acuerdo a bibliografía, presentamos la ecuación:

$$Y = B_0X_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3 \quad [6]$$

En el mínimo, todas las derivadas parciales, con respecto a las constantes elegidas son 0. Esto conduce a un sistema (n+1) ecuaciones lineales en (n+1) constantes desconocidas.

$$E = \sum_{i=1}^n (B_0 X_{0i} + B_1 X_{1i} + B_2 X_{2i} + B_3 X_{3i} + B_{12} X_{1i} X_{2i} + B_{13} X_{1i} X_{3i} + B_{23} X_{2i} X_{3i} - Y_i)^2$$

[7]

$$\frac{\partial E}{\partial B_0} = 2 \sum_{i=1}^n (B_0 X_{0i} + B_1 X_{1i} + B_2 X_{2i} + B_3 X_{3i} + B_{12} X_{1i} X_{2i} + B_{13} X_{1i} X_{3i} + B_{23} X_{2i} X_{3i} - Y_i) X_{0i} = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial B_1} = 2 \sum_{i=1}^n (B_0 X_{0i} + B_1 X_{1i} + B_2 X_{2i} + B_3 X_{3i} + B_{12} X_{1i} X_{2i} + B_{13} X_{1i} X_{3i} + B_{23} X_{2i} X_{3i} - Y_i) X_{1i} = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial B_2} = 2 \sum_{i=1}^n (B_0 X_{0i} + B_1 X_{1i} + B_2 X_{2i} + B_3 X_{3i} + B_{12} X_{1i} X_{2i} + B_{13} X_{1i} X_{3i} + B_{23} X_{2i} X_{3i} - Y_i) X_{2i} = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial B_3} = 2 \sum_{i=1}^n (B_0 X_{0i} + B_1 X_{1i} + B_2 X_{2i} + B_3 X_{3i} + B_{12} X_{1i} X_{2i} + B_{13} X_{1i} X_{3i} + B_{23} X_{2i} X_{3i} - Y_i) X_{3i} = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial B_4} = 2 \sum_{i=1}^n (B_0 X_{0i} + B_1 X_{1i} + B_2 X_{2i} + B_3 X_{3i} + B_{12} X_{1i} X_{2i} + B_{13} X_{1i} X_{3i} + B_{23} X_{2i} X_{3i} - Y_i) X_{4i} = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial B_5} = 2 \sum_{i=1}^n (B_0 X_{0i} + B_1 X_{1i} + B_2 X_{2i} + B_3 X_{3i} + B_{12} X_{1i} X_{2i} + B_{13} X_{1i} X_{3i} + B_{23} X_{2i} X_{3i} - Y_i) X_{5i} = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial B_6} = 2 \sum_{i=1}^n (B_0 X_{0i} + B_1 X_{1i} + B_2 X_{2i} + B_3 X_{3i} + B_{12} X_{1i} X_{2i} + B_{13} X_{1i} X_{3i} + B_{23} X_{2i} X_{3i} - Y_i) X_{6i} = 0$$

---

[8]

Las anteriores ecuaciones pueden ser reordenadas en el siguiente juego de ecuaciones normales:

$$B_0 \sum X_{0i}^2 + B_1 \sum X_{0i}X_{1i} + B_2 \sum X_{0i}X_{2i} + B_3 \sum X_{0i}X_{3i} + B_{12} \sum X_{0i}X_{1i}X_{2i} + B_{13} \sum X_{0i}X_{1i}X_{3i} + B_{23} \sum X_{0i}X_{2i}X_{3i} = \sum X_{0i}Y_i$$

$$B_0 \sum X_{0i}X_{1i} + B_1 \sum X_{1i}^2 + B_2 \sum X_{1i}X_{2i} + B_3 \sum X_{1i}X_{3i} + B_{12} \sum X_{1i}^2X_{2i} + B_{13} \sum X_{1i}^2X_{3i} + B_{23} \sum X_{1i}X_{2i}X_{3i} = \sum X_{1i}Y_i$$

$$B_0 \sum X_{0i}X_{2i} + B_1 \sum X_{1i}X_{2i} + B_2 \sum X_{2i}^2 + B_3 \sum X_{2i}X_{3i} + B_{12} \sum X_{1i}X_{2i}^2 + B_{13} \sum X_{1i}X_{2i}X_{3i} + B_{23} \sum X_{2i}^2X_{3i} = \sum X_{2i}Y_i$$

$$B_0 \sum X_{0i}X_{3i} + B_1 \sum X_{1i}X_{3i} + B_2 \sum X_{2i}X_{3i} + B_3 \sum X_{3i}^2 + B_{12} \sum X_{1i}X_{2i}X_{3i} + B_{13} \sum X_{1i}X_{3i}^2 + B_{23} \sum X_{2i}X_{3i}^2 = \sum X_{3i}Y_i$$

$$B_0 \sum X_{0i}X_{1i}X_{2i} + B_1 \sum X_{1i}^2X_{2i} + B_2 \sum X_{1i}X_{2i}^2 + B_3 \sum X_{1i}X_{2i}X_{3i} + B_{12} \sum X_{1i}^2X_{2i}^2 + B_{13} \sum X_{1i}^2X_{2i}X_{3i} + B_{23} \sum X_{1i}X_{2i}^2X_{3i} = \sum X_{1i}X_{2i}Y_i$$

$$B_0 \sum X_{0i}X_{1i}X_{3i} + B_1 \sum X_{1i}^2X_{3i} + B_2 \sum X_{1i}X_{2i}X_{3i} + B_3 \sum X_{1i}X_{3i}^2 + B_{12} \sum X_{1i}^2X_{2i}X_{3i} + B_{13} \sum X_{1i}^2X_{3i}^2 + B_{23} \sum X_{1i}X_{2i}X_{3i}^2 = \sum X_{1i}X_{3i}Y_i$$

$$B_0 \sum X_{0i}X_{2i}X_{3i} + B_1 \sum X_{1i}X_{2i}X_{3i} + B_2 \sum X_{2i}^2X_{3i} + B_3 \sum X_{2i}X_{3i}^2 + B_{12} \sum X_{1i}X_{2i}^2X_{3i} + B_{13} \sum X_{1i}X_{2i}X_{3i}^2 + B_{23} \sum X_{2i}^2X_{3i}^2 = \sum X_{2i}X_{3i}Y_i$$

[9]

Utilizando los datos experimentales de la Tabla del Anexo 10, se obtuvo cada uno de los elementos de la matriz U como los vectores B y V.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 12 & 14,4 & 14,4 & 2040 & 17,28 & 2448 & 2448 \\ 14,4 & 20,16 & 17,28 & 2448 & 24,192 & 3427,2 & 2937,6 \\ 14,4 & 17,28 & 18,56 & 2448 & 22,272 & 2937,6 & 3155,2 \\ 2040 & 2448 & 2448 & 386000 & 2937,6 & 463200 & 463200 \\ 17,28 & 24,192 & 22,272 & 2937,6 & 31,3344 & 4112,64 & 3786,24 \\ 2448 & 3427,2 & 2937,6 & 463200 & 4112,64 & 653184 & 555840 \\ 2448 & 2937,6 & 3155,2 & 463200 & 3786,24 & 555840 & 599104 \end{bmatrix}}_U = \underbrace{\begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{bmatrix}}_B = \underbrace{\begin{bmatrix} 0,105 \\ 0,105 \\ 0,136 \\ 15,400 \\ 0,1344 \\ 15,12 \\ 19,76 \end{bmatrix}}_V$$

[10]

Finalmente se obtuvo el vector B, utilizando:

$$B = VU^{-1}$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{bmatrix}}_B = \underbrace{\begin{bmatrix} 16,529762 & -6,6241497 & -10,216837 & -0,0607143 & 3,125 & 0,0144558 & 0,0325255 \\ -6,6241497 & 5,5201247 & 3,125 & 0,0144558 & -2,6041667 & -0,0120465 & 2,502E-15 \\ -10,216837 & 3,125 & 8,5140806 & 0,0325255 & -2,6041667 & 1,054E-15 & -0,0271046 \\ -0,0607143 & 0,0144558 & 0,0325255 & 0,0003571 & 1,471E-15 & -8,5084E-05 & -0,0001913 \\ 3,125 & -2,6041667 & -2,6041667 & -2,39E-15 & 2,1701389 & -4,92E-16 & -1,40E-15 \\ 0,0144558 & -0,0120465 & -1,295E-15 & -8,503E-05 & -4,173E-16 & 7,086E-05 & -4,242E-18 \\ 0,0325255 & 0,0001376 & -0,0271046 & -0,0001913 & -7,643E-16 & -2,426E-18 & 0,0001594 \end{bmatrix}}_v \underbrace{\begin{bmatrix} 0,075 \\ 0,069 \\ 0,1 \\ 10,3 \\ 0,0912 \\ 9 \\ 13,64 \end{bmatrix}}_v$$

[11]

De donde se obtiene:

$$\begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_{12} \\ B_{13} \\ B_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,003125 \\ -0,0004464 \\ 0,0285714 \\ -7,806E-18 \\ -0,0078125 \\ 1,4881E-05 \\ -6,696E-05 \end{bmatrix}$$

[12]

Resumiendo los valores de coeficientes de software tenemos:

$$\begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_{12} \\ B_{13} \\ B_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,003125 \\ -0,0004429 \\ 0,0285714 \\ -0,0 \\ -0,0078125 \\ 1,4881E-05 \\ -6,6964E-05 \end{bmatrix} \quad [13]$$

Si realizamos una comparación con los coeficientes de las ecuaciones resultantes obtenidas en el modelo matemático usando regresión múltiple [12] y [13] en comparación a los valores obtenidos mediante el software STATGRAPHICS (versión demo) son similares entre sí. Los valores del arsénico determinado con el software se corroboraron siguiendo la teoría con el modelo matemático por matrices.

#### 4.1.5 Análisis de los resultados

De acuerdo al análisis con diseño experimental statgraphics, se tendría que usar los máximos valores de cada variable independiente y así lograr un 100 % en la eficiencia de la remoción de arsénico.

La cantidad de limón y la lana de acero que lograron mayor remoción de arsénico en las pruebas experimentales hechas en el Laboratorio de procesos químicos de la Universidad Jorge Basadre Grohman, de acuerdo al gráfico de superficie de respuesta del Software Statgraphics centurión v15 (versión Demo), fue de concentración de ácido cítrico de 1,6 gotas, cantidades mayores a 1,6 g de lana de acero y el tiempo mayor a 230 min. Estos valores demostraron un comportamiento lineal con valor de confianza mayor a 95 %.

El pH de la muestra fue de 8 a 8,4 y la concentración inicial de arsénico fue de 0,324 mg/L, los resultados de la remoción de arsénico obtenidos en el trabajo de investigación es significativa, es decir remueve mejor el arsénico ( $\leq 0,01$ mg/L), y la concentración de hierro representa valores menores a 0,3 mg/L de acuerdo a los análisis realizados por medio de un Laboratorio acreditado mediante técnica ICP óptico.

El principal mecanismo de reacción en la remoción de arsénico fue el proceso de oxidación del hierro para facilitar la adsorción del arsénico. La mayor cantidad de oxígeno disuelto en el agua podría acelerar la oxidación del hierro, por lo tanto

se requiere una máxima concentración de oxígeno disuelto en el agua a tratar.

## **4.2 Discusiones**

De acuerdo a estudios de autores citados en la bibliografía, se coincide que la variable cantidad de hierro favorece, directamente proporcional, la remoción de arsénico en muestras de agua.

Según (Mamani, 2014), menciona que el medio ácido disuelve más al hierro a pH 6 y 3 horas de contacto dando valores de As < 0,01 mg/L, pero contenido de hierro supera los valores LMP. Sin embargo en este trabajo se logró una efectividad positiva en la remoción de arsénico a pH en medio básico de 8,4.

De acuerdo a estudios bibliográficos de remoción de arsénico por medio de oxidación solar o RAOS (Cornejo et al., 2008), describen que la “mejor practica parece ser el uso de la luz solar, cantidades moderadas de hierro y concentraciones muy bajas de ácido cítrico”. En el presente estudio se comprueba que los insumos utilizados junto a una técnica de agitación, hacen factible la remoción de arsénico.

En la tesis, la remoción de arsénico por agitación con lana de acero y gotas de limón, se utilizó menor cantidad de insumo y haciendo la comparación con el método RAOS, se puede decir que en ambos casos se pudo obtener una buena remoción de arsénico, cabe resaltar en la presente tesis no se utilizó la radiación solar por lo que sería un método ventajoso en comparación de Cornejo y colaboradores.

Según (Triszcz., *et al.*, 2010) lana de acero comercial presenta ventajas respecto de otras fuentes de hierro metálico debido a su bajo costo, amplia disponibilidad y a su importante relación área/volumen. En la presente investigación se comprueba lo mismo debido a que mayor dosis de hierro tiene mayores remociones de Arsénico.

Según (Campo V, 2003) indica que la lana de acero fue probada como filtro de purificación de agua debido a su bajo valor y la facilidad de adquisición en establecimientos comerciales. El uso de hierro en forma de lana de acero probó ser un método eficiente para la retención de arsénico, además de ser de fácil aplicación en los filtros caseros. El arsénico es retenido en la lana de acero a través de adsorción. En nuestro trabajo el mecanismo de remoción de arsénico también podría ser por adsorción.

Según (Henke, 2009) El hierro es un componente central de varios elementos de adsorción efectivos. Se han utilizado revestimientos de hierro en arenas, glauconitas, carbón y otras sustancias. Además, se han propuesto y examinado con distintos grados de éxito, los siguientes elementos: hidróxido de hierro amorfo, carbón procesado y hierro de cero valencia (como en el sistema 3 - Kolshi antes descrito) y carbón seguido por lana de acero. En el trabajo de investigación la lana de acero que se usó es la más aceptable para la remoción de arsénico.

## CONCLUSIONES

- Las condiciones óptimas para lograr mayores niveles de remoción de arsénico se presentan al emplear cantidades superiores a 1,6 gramos de lana de acero y 1,6 gotas de limón por litro de agua de río bajo agitación constante a 40 RPM durante un tiempo mayor a 230 min. Después de la agitación de la muestra madre, seguido por la etapa de filtración, se reduce la concentración de arsénico por debajo de 0,01 mg/L ó 10 ug/L, partiendo de aguas con contenidos de Arsénico de 0,37 mg/L ó 370 ug/L.
- Mediante la experimentación de la tesis, se obtuvo una alta eficiencia de remoción de Arsénico, obteniendo valores mayores al 96 %, estos resultados indican que la tecnología desarrollada es conveniente por su simplicidad, economía y eficiencia.

## **RECOMENDACIONES**

- Debido a las limitaciones encontradas para realizar los análisis, se recomienda reiterar en la metodología, con el propósito de confirmar y optimizar los resultados de las concentraciones de arsénico.
- Se recomienda evaluar los resultados obtenidos de la tesis para su próxima implementación, ya que representan una alternativa económica para la remoción de arsénico.
- Establecer técnicas de manejo de los residuos precipitados (lodos), que se componen de arsénico y hierro, ya que son residuos peligrosos y deben manipularse adecuadamente.
- Se sugiere realizar estudios que permitan determinar la presencia de otros metales en el agua del río Sama.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2005). *How can arsenic affect my health, in ToxFAQs™ for Arsenic*. Recuperado de <http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts2.html>.

American Journal of Epidemiology (AJE) (1994). *Arsenic Ingestion and Internal cancers: A Review* 139, 1233-1234.

AMPEX. (2008). Perfil De Mercado de Limón en Exportación. Diseño y Experimentación de la Línea de Producción de una Planta Procesadora de Limones. Recuperado de <http://exportacionesdelperu.blogspot.pe/2009/03/el-90-de-las-exportaciones-de-limon-se.html>.

Amy, G., Chen, H.W., Drizo, A., von Gunten, U., Brandhuber, P., Hund, R., Chowdhury, Z., Kommineni, S., Sinha, S., Jekel, M. & Banerjee, K. (2005). *Adsorbent Treatment Technologies for Arsenic Removal*. AWWARF, Denver.

Anke, N., Kaegi, R., Voegelin, A., Munir, A. & Hug, S. (2013). *Arsenic removal with composite iron matrix filters in Bangladesh: a field and*

laboratory study. *American Chemical Society*, 47, 4544 - 4554

Appelo C.A. & Postma, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books>.

Armienta, M.A., Rodriguez, R., Aguayo, A., Cenicerros, A., Villaseñor, G. & Cruz, O. (1997). Arsenic contamination of groundwater at Zimapán Valley, Mexico. *Environmental Geology* 40: 571 – 581.

Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2010). *Evaluación de recursos hídricos cuenca de los ríos Sama y Locumba*. Recuperado de [www.ana.gob.pe](http://www.ana.gob.pe)

Avendaño, E. (2010). *Alternativa de remoción de arsénico del río Curibaya (Cuenca del río Locumba, Provincia Jorge Basadre y Candarave – Tacna) utilizando Hidrogel de Hidróxido de Aluminio modificado a nivel domiciliario (Tesis doctorado)*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Avendaño, E., Mamani, E.P & Fabián, D. (2013). Remoción de arsénico del río sama utilizando la metodología de hierro cero valente (cuenca río sama, provincia tacna). *Ciencia & Desarrollo*, 34-39.

Bang, S.D., Korfiatis, G.P. & Meng, X. (2005). Removal of arsenic from water by zero-valent iron, *Journal of Hazardous Materials* 39, 61-67.

- Blanco M. del C., Paoloni J.D. & Morrás H. (Octubre, 2005). Caracterización geoquímica del ion arsénico en la fase sólida de suelos de la región pampeana sur, Argentina. En G. Galindo, J.L., Fernández, M.A., Gimeno, D.T (eds.), Arsénico en aguas: origen, movilidad y tratamiento, Taller. II Seminario Hispano Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea IV Congreso Hidrogeológico Argentino, Argentina.
- Belzunce, F.J. (2001). Aceros y fundiciones: Estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones. Recuperado de <https://aceroplatea.es/docs/documento138.pdf>
- Bundschuh, J., Litter, M.I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H.B., Jean, J.S., Liu, C.W., López, D., Armienta, M.A., Guilherme, L.R., Cuevas, A.G., Cornejo, L., Cumbal, L. & Toujaguez, R. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: a review of history and occurrence from 14 countries. Recuperado <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21959248>.
- Campos, V. (2002). The effect of carbón Steel- wool in removal of arsenic from drinking water. Brazil: Sringer – Verlag. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s00254-002-0539-6>.
- Campos, V. (2003). Estudio de un método alternativo para la purificación

de arsénico en agua. *Revista de la sociedad química de México* 47, 283-286.

Cardiel, J., Barron, J.C., Cruz, L.A., Paz, F., Gallardo, A. & Vera, P. (2009). El enfoque de la complejidad. Publicaciones Universidad Nacional Autónoma de México.

Carter, D.E., Aposhian, H.V & Gandolfi, A.J. (2003). The metabolism of inorganic arsenic oxides, gallium arsenide, and arsine: a toxicological review, *Toxicol Appl Pharmacol* 193 (3), 309-34.

Castro de Esperanza, M. L. (2006). Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos, *International Congress, Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd51/remocion-agua.pdf>

Cebrián, M.E., Albores A., Aguilar M., Blakely E. (1994). Chronic arsenic poisoning in humans: The case of Mexico, in *Arsenic in the Environment, Part II: Human health and Ecosystem effects*, J.O. Nriagu, Editor. John Wiley & Sons, Inc: New York. 140.

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y ciencias del ambiente CEPIS (1973). Recuperado de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacep/e/servi.html>

- Chandía C.F. & Hernández, H.S. (2009). Corrosión del hierro en distintos tipos de aguas: una propuesta experimental. *Ciencia Ahora* 24, 52-58.
- Chandra, M., Kumar-Gautam, R., Lofrano, G. & Mudhoo, A. (2008). Biomass-derived biosorbents for metal ions sequestration: Adsorbent modification and activation methods and adsorbent regeneration. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2, 239-259.
- Chang, Y.J., Kwan, P., Norton, M., Reiber, S., Chowdhury, Z., Kommineni, S., Amy, G., Sinha, S., Benjamin, M. & Edwards, M. (2004). Demonstration of Emerging Technologies for Arsenic Removal. In: Bench Testing, vol. 1. Awwa Research Foundation, Denver, CO
- Chávez, M.I & Miglio, M.M. (2011). Remoción de arsénico por oxidación solar en aguas para consumo humano. Recuperado de [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1810-34X2011000400008](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-34X2011000400008).
- Choong, S.Y., Chuah, T.G., Robiah., Koay, G. & Azni, I. (2007). Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: an overview, *Desalination* 217, 139-166.

Coker, A. Kayode. (1995). Fortran Programs for chemical process design, analysis, and simulation. *Gulf Publishing Company*, 12-15.

Cornejo, L., Mansilla H. D., Arenas, M. J., Flores, M., Flores, V., Figueroa, L., Yáñez, J. (2003). Remoción de arsénico en aguas del río Camarones, Arica, Chile, utilizando la tecnología RAOS modificada”, en: “Remoción de arsénico asistida por luz solar en comunidades rurales de América Latina”, Proyecto OEA/AE141/2001, M.I. Litter y H. Mansilla (Editores), Digital Grafic, La Plata, pp. 35-53.

Cornejo, L., Acarapi, J., Lienqueo, H. & Arenas, M. (2010). Distribución de arsénico en la region sudamericana: Chile. En: Bundschuh, J., Pérez-Carrera, A., Litter, M.I. (eds.): *Iberoarsen: Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana*. ISBN: 13978-84-96023-61-1, Buenos Aires, Argentina.

Cornejo, L., Lienqueo, H., Aremas, M., Acarapi, J., Contrearas, D., Yáñez, J. & Mansilla, H.D. (2008). *In field arsenic removal from natural water by zero-valent iron assisted by solar radiation*, Environmental Pollution 156, 827-831.

Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) (2011). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, DECRETO SUPREMO

No 031-2010 SA, Recuperado de  
<http://www.digesa@minsa.gob.pe/normaslegales.asp>

Dou, X., Li, R., Zhao, B., Liang, W. (2010). Arsenate removal from water by zerovalent iron/activated carbon galvanic couples. *Journal of Hazardous Materials* 182, 108-114.

Durán, H., Roa, R., Coronel, D. & Alvarado, A. (2011). Análisis del proceso de coagulación de agua residual usando un coagulante natural y un coagulante químico. Recuperado de  
<http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/workpaper/article/view/1821/0>

Elizalde - González M. P., Mattusch, J. & Wenrich, R. (2001). Sorption on natural solids for arsenic removal, *Chemical Engineering Journal* 81, 187-195.

Franco, A., Ponce, S. & Rodríguez, J. (2012). Actividad Hidrogeológica del sur del Perú, una evaluación situacional de las cuencas de Sama y Locumba. *Revista Técnico Científica publicada por el Instituto General de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería* 22 (1).

García G. M., Lin H.J., Custo G., d'Hiriart J., Hidalgo M., Litter M.I & Blesa

- M.A. (2003). Avances en remoción de arsénico por oxidación solar en aguas de Tucumán. Argentina. 43-63
- Geroni, J.N., Bowell, R.J., Dey, M., Sapsford, D.J. & Willians, K.P. (2009). Removal of Arsenic (III) from contaminated waters using Iron (II) and citrate. Cardiff School of Engineering, Cardiff University, Cardiff. Securing the future and 8.Sweden
- Giménez, P., Martínez, M., Rovira, M. & Valderrama, C. (2010). Reactive transport of arsenic (III) and arsenic (V) on natural hematite: Experimental and modeling, *Journal of Colloid and Interface Science* 348, 293-297.
- Gomes, A.G., Daida, P., Kesmez, M., Weir, M., Moreno, H., Parga, J. R., Irwin, G., McWhinney, H., Grady, T., Peterson, E. & Cocke, D. (2007). Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al-Fe electrode system and characterization of products. *Journal of Hazardous Materials* 139, 220-231.
- Gregor, J. (2001). Arsenic removal during conventional aluminium-based drinking water treatment, *Wat, Res* 35 (7), 1659-1664.
- Gutierrez, H. & de la Vara, R. (2003). Analisis y diseño de experimentos. Recuperado de <https://www.freelibros.org/ingenieria/analisis-y->

diseno-de experimentos-2da-edicion-humberto-gutierrez-pulido.html

Henderson, A. D. & Demond, A. H. (2007). Long-term performance of zero-valent iron permeable reactive barriers: A critical review, *Environmental engineering science*, 24 (4), 401- 423.

Henke, R. K. (2009). *Arsenic, Environmental Chemistry, health threats and waste treatment*, John Wiley & Sons, India.

Hughes, M.F. (2002). Arsenic toxicity and potential mechanisms of action, *Toxicol Lett*, Vol, 133(1), 1-16.

Hug, S., Canonica, M., Wegelin, M., Gechter, D. & Von Gunten, U. (2001). Solar Oxidation and removal of arsenic at circumneutral pH in iron containing waters. In *Environmental Science and Technology* 35, 2114-2121

Jain, C.K. & Singh, R.D. (2012). Technological options for the removal of arsenic with special reference to South East Asia. *J. Environ. Manag.* 107 (5), 18.

Jekel, M. (1994). Removal of arsenic in drinking water treatment. In: *Arsenic in the Environment; Part1: Cycling and Characterization*. John Wiley & Sons, New York, NY. Recuperado de

<http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-71579297.html>

Jeong, Y., Fan, M., Van Leeuwenb, J.H. & Belczyk, J.F. (2007). Effect of competing solutes on arsenic (V) adsorption using iron oxide and aluminum oxides. *J. Environ. Sci.* 19 (3), 910e919.

Jones, F.T. (2007). A broad view of arsenic. *Poult Sci* 86 (1), 2-14.

Kang, M., Chen H., Sato, Y., Kamei, T. & Magara, Y. (2003). Rapid and economical indicator for evaluating arsenic removal with minimum aluminum residual during coagulation process, *Water Research* 37, 4599-4604.

Kartinen, E.O & Martin, C. (1995). An overview of arsenic removal processes, *Desalination* 103, 79-88.

King, E.O., Lounsbury F.J. & Millero F.J. (1995). Rates and mechanism of Fe(II) oxidation at nanomolar total iron concentrations. In, *environmental science and technology* 29, 818-824.

Kundu, S. & Gupta, A. K. (2006). Arsenic adsorption onto oxide-coated cement (IOCC): Regression analysis of equilibrium data with several isotherm models and their optimization, *Chemical Engineering Journal* 122, 93-106.

- Lien, H.L., Wilkin, R, T. (2005). High-level arsenite removal from groundwater by zero-valent iron, *Chemosphere* 59, 377-386.
- Litter, M. I., Morgada, M. E. & Bundschuh, J. (2010). Possible treatments for arsenic removal in Latin America waters for human consumption, *Environmental Pollution* 158, 1105-1118.
- Liu, C., Lin, K. & Kuo, Y. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *Science of Total Environment* 313, 77-89.
- Luján, J. C. (2001). Un hidrogel de hidróxido de aluminio para eliminar el arsénico del agua. *Rev Panam Salud Pública* 9, 302-305.
- Mak, M. S. H., Rao, O., Lo, I. M. C. (2009). Effects of hardness and alkalinity on the removal of arsenic (V) from humic acid-deficient and humic acid-rich groundwater by zero-valent iron. *Water research* 43, 4296-4304.
- Mamani, E.P. (2014). *Estudio de remoción de arsénico del agua de consumo humano del distrito de Huanuara - tacna, empleando Fe.* (Tesis doctorado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

- Manojlović, D., Popara, A., Dojcinović, B. P., Nikolic A., Obradovic, B, M., Kuraica, M.M & Puric, J. (2009). *Comparison of two methods for removal of arsenic from potable water*, Vacuum 83, 142-145,
- Mercado, B. (2013). *Remoción de boro y arsénico presentes en altas concentraciones en agua mediante escorias metalúrgicas* (tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ministerio de Salud (2011). Reglamento de la calidad de Agua para Consumo Humano: D,S, N° 031-2010-SA.
- Mohan, D. & Pittman, C.U. (2007). *Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents - A critical review*, Journal of Hazardous Materials 142, 1-53.
- Müller N.C. & Nowack, B. (2010). *Nano zero valent iron – The solution for water an soil remediation. Report of the Observatory NANO*, 2-34.
- Nicolli, H., Suriano J. M., Gomes M. A., Ferpozzi L. H & Baleani O. A. (1985). *Geoquímica del arsénico y de otros oligoelementos en aguas subterráneas en la llanura suroriental de la provincia de Córdoba, Argentina*. Environmental Geology and wáter sciences 14, 3-16.
- Ning, R.Y. (2002). *Arsenic removal by reverse osmosis*, Desalination 143,

237-241.

Organización Mundial de la Salud OMS (2003). *Guías para la calidad del agua potable*. Tercera edición. Recuperado de [http://www.who.int/entity/water\\_sanitation\\_health/](http://www.who.int/entity/water_sanitation_health/) [consulta,05-01-2015].

Parga, J. R., Cocke, D. L., Valverde, V., Gomes, J, G., Kesmez, M., Moreno, H., Weir, M. & Donald, M. (2005). *Characterization of electrocoagulation of removal of chromium and arsenic*, Chemical Engineering and Technology 25 (5), 605-612.

Perez, J.A. (2012). Remocion. Revista mexicana de Ingeniera Quimica. Universidad autónoma metropolitana unidad Izatapalapa. Distrito federal, mexico. <http://www.redalyc.org/pdf/620/62010302.pdf>

Peters, S.C. & Blum, J.D. (2003). The source and transport of arsenic in a bedrock aquifer, New Hampshire, USA Applied Geochemistry 18, 1773-1787.

Petrusevski, B. & Sharma, S. (2007). *Arsenic in Drinking Water*. IRC International Water and Sanitation Centre, Thematic Overview Paper 17.

Restrepo, H.A. (2009). Evaluación del proceso de coagulación- floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Universidad nacional de Colombia. Sede medello. Facultad de minas.

Rivera, M., Cortes, J., Piña, S. & Domínguez, A. (2003). *Remoción de hierro y arsénico de agua para consumo humano mediante precipitación y adsorción en Zimapán*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; Morelos, México.

Rojas, P., Vargas, M., Araya, A., Valverde, J & Romero, L. G. (2015). Estudio de remoción de arsénico en agua potable a nivel domiciliar mediante oxidación solar y coagulación-floculación. *Tecnología en Marcha* 28, 54-65.

Scareck, O., Bhattacharya, P., Jacks G., Gustafsson, J.P. & Bromssen, M. (2004). Behavior of arsenic and geochemical modeling of arsenic enrichment in aqueous environments. *Applied Geochemistry* 19,169-180.

Smedley, P. & Kinniburgh, D. (2002). *A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters*, *Applied Geochemistry* 17(5), 517–568.

Song, S., Lopez, A., Hernandez-Campos, D. J., Peng, C., Monroy M.G. &

Soto, I. (2006). *Arsenic removal from high-arsenic water by enhanced coagulation with ferric ions and coarse calcite*, Water Research 40, 364-372.

Sosa Arias, J. (Diciembre, 2015). *Resultados de calidad de agua para consumo humano del sistema de agua de la ciudad de Tacna 2012 - 2015. Ministerio de Salud. Trabajo presentado en seminario "Tecnologías de remoción de metales, tratamiento de aguas residuales, doméstica y su aprovechamiento sostenible" organizado por la Autoridad Nacional del Agua, Tacna, Perú.*

Tchounwou, P.B., Wilson, B. & Ishaque, A. (1999). *Important considerations in the development of public health advisories for arsenic and arsenic-containing compounds in drinking water*, Rev Environ Health 14 (4), 211-29.

Terrien, Pascal., Bioteau, Claude., Pedarre, P. & Sicoli, B. (2001). *Acero inoxidable ferrítico para la producción de lana de acero.*

Triszcz, J.,Chippano L., Gordon, A., Porta, A & García Einschlag, F. (2010). Laboratorio de Ingeniería Sanitaria, Dpto. de Hidráulica, Facultad de Ingeniería (UNLP). Calle 115 N° 742 La Plata, Buenos Aires, Argentina. (2) División Química Analítica, Dpto. de Química, Facultad de Ciencias Exactas (UNLP). 47 y 115 La Plata, Buenos

Aires, Argentina. (3) Instituto de Investigaciones Fisicoquímica Teóricas y Aplicadas (INIFTA), Dpto. de Química, Facultad de Ciencias Exactas . Estudio de columnas reactivas para la remoción de arsénico mediante el empleo de la técnica zvi. Cuadernos del CURIHAM 16.

Tseng, C.H. (2004). *The potential biological mechanisms of arsenic-induced diabetes mellitus*, Toxicol Appl Pharmacol 197(2), 67-83.

Tuutijärvi, T., Lu, J. & Sillanpää, S.G. (2009). *As (V) adsorption on maghemite nanoparticles*, Journals of Hazardous Materials 166, 1415-1420.

Vahter, M.E. (1988). *Arsenic, in Biological Monitoring of toxic metals*, F,L, Clarkson T,W,, Nordberg G,F,, Sager P,R,, Editor, Plenum Press: New York, 303-321.

Vega, G S (2002). *Riesgo sanitario ambiental por la presencia de arsénico y fluoruros en los acuíferos de México*, Recuperado de <http://www,bvsde,paho,org/bvsaidis/mexico13/104,pdf>.

Vegas, U. & Narrea, M. (2011). Manejo integrado del cultivo de limón. Jornada de Capacitación. Universidad Nacional Agraria La Molina-AGROBANCO. Lima, Perú.

World Health Organization (2011). Guidelines for Drinking-water Quality  
4th ed, 541. Malta: Gutenberg.

Yean, S., Cong, L., Yavyz, C. T., Mayo, J. T., Yu, W.W., Kan, A. T., Colvin,  
V. L. & Tomson, M. (2005). *Effect of magnetite particle size on  
adsorption and desorption of arsenite and arsenate*, J Mater, Res.,  
20(12), 3255-3264.

Yoshida, T., Yamauchi, H. & Fan Sun, G. (2004). Chronic health effects in  
people exposed to arsenic via the drinking water: dose-response  
relationships in review. *Toxicol Appl Pharmacol* 198(3), 243-52.

Zhu, H., Jia, Y., Wu, H. & Wang, H. (2009). *Removal of arsenic from water  
by upportednano zero-valent iron on activated carbon*, Journal of  
Hazardous Materials 172, 1591-1596.

## ANEXOS

### Anexos 1. Parámetros de calidad de agua

PARÁMETRO	UNIDAD	Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable			Aguas superficiales destinadas para recreación	
		A1	A2	A3	B1	B2
		Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado	Contacto Primario	Contacto Secundario
		VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
<b>FÍSICOS Y QUÍMICOS</b>						
Aceites y grasas (MEH)	mg/L	1	1,00	1,00	Ausencia de película visible	**
Cianuro Libre	mg/L	0,005	0,022	0,022	0,022	0,022
Cianuro Wad	mg/L	0,08	0,08	0,08	0,08	**
Cloruros	mg/L	250	250	250	**	**
Color	Color verdadero escala Pt/Co	15	100	200	sin cambio normal	sin cambio normal
Conductividad	us/cm <sup>25</sup>	1 500	1 600	**	**	**
D.B.O. <sub>5</sub>	mg/L	3	5	10	5	10
D.Q.O.	mg/L	10	20	30	30	50
Dureza	mg/L	500	**	**	**	**
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,5	0,5	na	0,5	Ausencia de espuma persistente
Fenoles	mg/L	0,003	0,01	0,1	**	**
Fluoruros	mg/L	1	**	**	**	**
Fósforo Total	mg/L P	0,1	0,15	0,15	**	**
Materiales Flotantes		Ausencia de material flotante	**	**	Ausencia de material flotante	Ausencia de material flotante
Nitratos	mg/L N	10	10	10	10	**
Nitritos	mg/L N	1	1	1	1(5)	**
Nitrógeno amoniacal	mg/L N	1,5	2	3,7	**	**
Olor		Aceptable	**	**	Aceptable	**
Oxígeno Disuelto	mg/L	>= 6	>= 5	>= 4	>= 5	>= 4
pH	Unidad de pH	6,5 – 8,5	5,5 – 9,0	5,5 – 9,0	6-9 (2,5)	**
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	1 000	1 000	1 500	**	**
Sulfatos	mg/L	250	**	**	**	**
Sulfuros	mg/L	0,05	**	**	0,05	**
Turbiedad	UNT <sup>90</sup>	5	100	**	100	**
<b>INORGÁNICOS</b>						
Aluminio	mg/L	0,2	0,2	0,2	0,2	**
Antimonio	mg/L	0,006	0,006	0,006	0,006	**
Arsénico	mg/L	0,01	0,01	0,05	0,01	**
Bario	mg/L	0,7	0,7	1	0,7	**
Berilio	mg/L	0,004	0,04	0,04	0,04	**
Boro	mg/L	0,5	0,5	0,75	0,5	**
Cadmio	mg/L	0,003	0,003	0,01	0,01	**
Cobre	mg/L	2	2	2	2	**
Cromo Total	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	**
Cromo VI	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	**
Hierro	mg/L	0,3	1	1	0,3	**
Manganeso	mg/L	0,1	0,4	0,5	0,1	**
Mercurio	mg/L	0,001	0,002	0,002	0,001	**
Níquel	mg/L	0,02	0,025	0,025	0,02	**
Plata	mg/L	0,01	0,05	0,05	0,01	0,05
Plomo	mg/L	0,01	0,05	0,05	0,01	**
Selenio	mg/L	0,01	0,05	0,05	0,01	**
Uranio	mg/L	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Vanadio	mg/L	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Zinc	mg/L	3	5	5	3	**

Fuente: Ministerio del Ambiente DECRETO SUPREMO N° 015-2015-MINAM

**Anexo 2.** Límites máximos permisibles de parámetros químicos inorgánicos y orgánicos

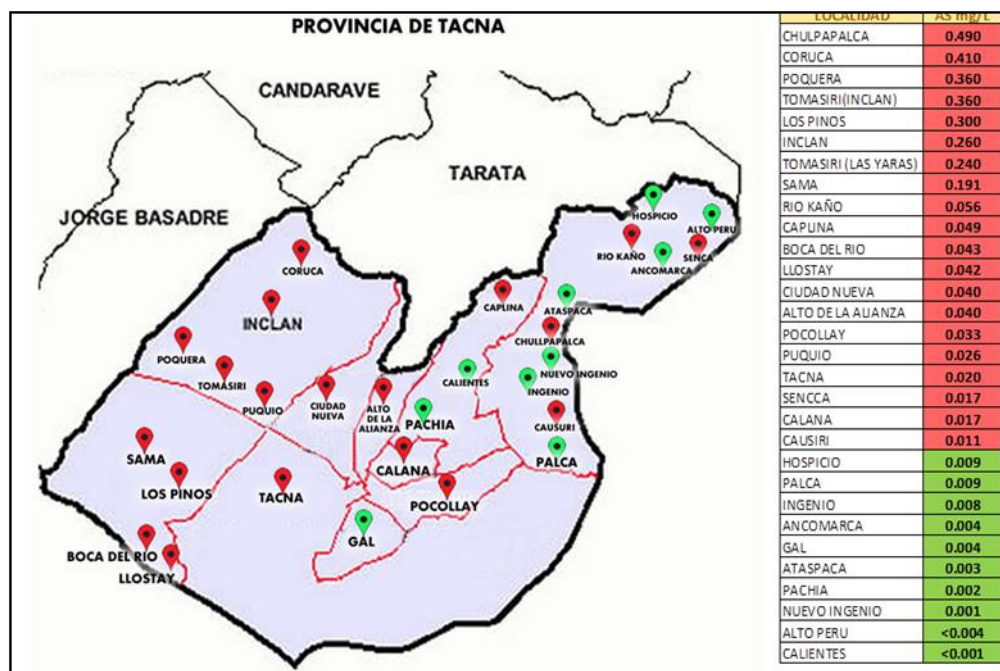
Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Antimonio	mg Sb L <sup>-1</sup>	0,020
2. Arsénico	mg As L <sup>-1</sup>	0,050
3. Bario	mg Ba L <sup>-1</sup>	0,700
4. Boro	mg B L <sup>-1</sup>	0,500
5. Cadmio	mg Cd L <sup>-1</sup>	0,003
6. Cianuros	mg CN <sup>-</sup> L <sup>-1</sup>	0,070
7. Cloro	mg L <sup>-1</sup>	5
8. Clorito	mg L <sup>-1</sup>	0,7
9. Clorato	mg L <sup>-1</sup>	0,7
10. Cromo total	mg Cr L <sup>-1</sup>	0,050
11. Flúor	mg F·L <sup>-1</sup>	1,000
12. Mercurio	mg Hg L <sup>-1</sup>	0,001
13. Níquel	mg Ni L <sup>-1</sup>	0,020
14. Nitratos	mg NO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	50,00
15. Nitritos	mg NO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	3,00 exposición corta 0,20 exposición larga
16. Plomo	mg Pb L <sup>-1</sup>	0,010
17. Selenio	mg Se L <sup>-1</sup>	0,010
18. Molibdeno	mg Mo L <sup>-1</sup>	0,07
19. Uranio	mg U L <sup>-1</sup>	0,015

**Nota 1:** La meta para el arsénico en cinco años (05) será de 0,025 mg/L, contados a partir del día siguiente de entrar en vigencia el presente Reglamento.

**Nota 2:** Para una desinfección eficaz en las redes de distribución la concentración residual libre de cloro no debe ser menor de 0,5 mg/L.

**Fuente:** Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano. Ministerio de Salud

**Anexo 3.** Niveles de arsénico en el agua de consumo humano Provincia de Tacna 2014-2015



Fuente: Ministerio de salud (Minsa)

**Anexo 4.** Fotos de punto de muestreo de muestra madre río Sama Inclán



**Figura 9.** Distrito de Sama Inclán



**Figura 10.** Punto de Muestreo de Canaleta de Río Sama

**Anexo 5.** Fotos de insumos comerciales usados para remoción de arsénico.

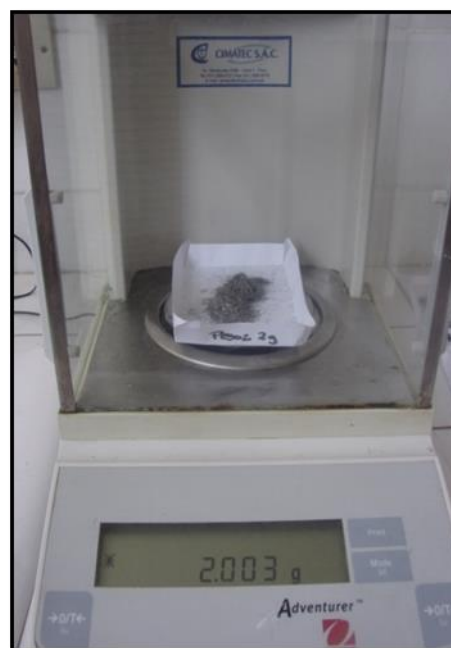


**Figura 11.** Virutilla de hierro comercial y jugo de limón

**Anexo 6.** Procedimiento experimental de la remoción de arsénico



**Figura 12.** Diluciones del limón



**Figura 13.** Dosis de hierro



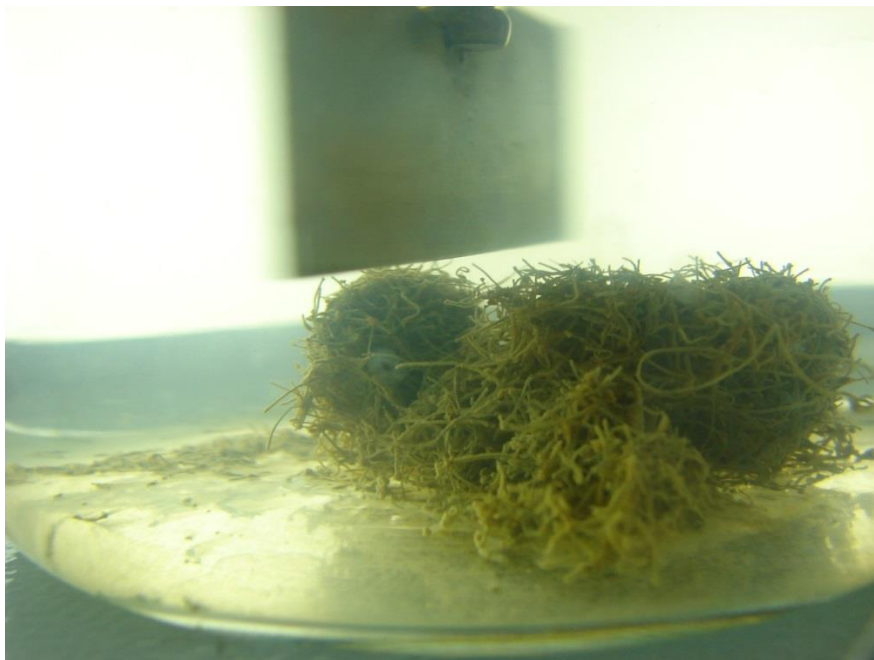
**Figura 14.** Dosis de hierro y jugo de limón para pruebas experimentales



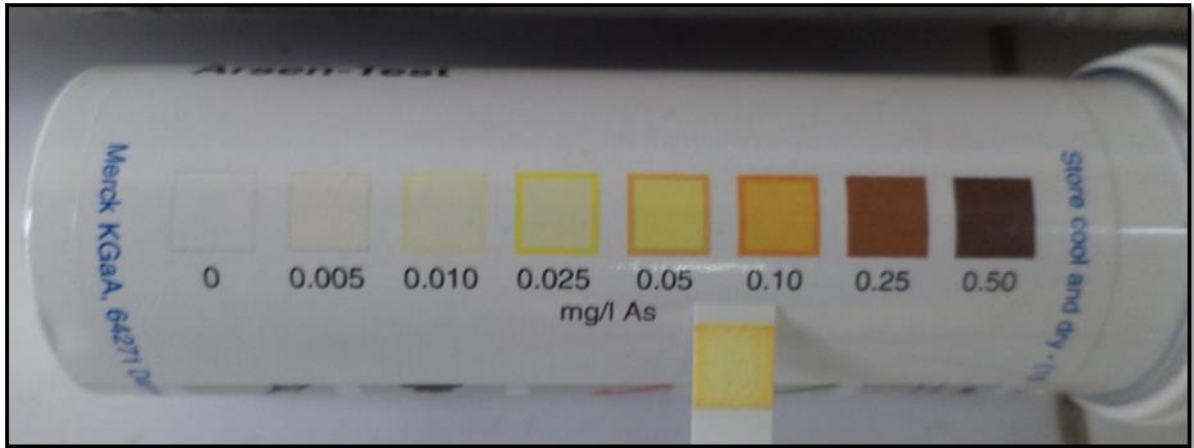
**Figura 15.** Pruebas experimentales por medio de test de jarras



**Figura 16.** Remoción de arsénico de diferentes pruebas experimentales



**Figura 17.** Formación de flóculos



**Figura 18.** Medición de arsénico por test de arsénico colorímetro



**Figura 19.** Análisis de los parámetros del agua tratada



**Figura 20.** Proceso de filtración



**Figura 21.** Resultado final de agua tratada

### **Anexo 7.** Diluciones para concentración de limón.

Con ayuda de una pipeta volumétrica de 0,1ml equivale a 4 gotas de limón, estableciendo una regla de tres simples obtenemos las siguientes diluciones:

- 0,8 gota de limón:  
 $X = (0,8 \text{ gotas} * 0,1 \text{ ml}) / 4 \text{ gotas}$   
 $X = 0,02 \text{ ml}$
- 1,6 gota de limón:  
 $X = (1,6 \text{ gotas} * 0,1 \text{ ml}) / 4 \text{ gotas}$   
 $X = 0,04 \text{ ml}$
- 1,2 gota de limón  
 $X = (1,2 \text{ gotas} * 0,1 \text{ ml}) / 4 \text{ gotas}$   
 $X = 0,03 \text{ ml}$

**Anexo 8.** Comportamiento de velocidad de agitación.

Unidad de rpm	Observación
<b>20</b>	La formación de floculo se generó pasando 30 minutos.
<b>40</b>	A partir de 15 min se generó floc.
<b>80</b>	Primer floc se generó a 13 min formándose un gran vórtice.
<b>120</b>	Formación de flocs a los 10 minutos, debido a la formación de turbulencia los floculos se rompen.

Fuente: Elaboración Propia, 2014

**Anexo 9.** Ecuaciones para la regresión múltiple

Para la estimación de coeficientes o parámetros ( $B_i$ ) hacemos uso del método de mínimos cuadrados; de tal como que la suma de los cuadrados de los errores,  $E_i$ , se minimice.

$$S = \sum_{i=1}^n \left( Y_i - B_0 - \sum_{j=1}^k B_j X_{ij} \right)^2$$

La función  $S$  debe minimizarse con respecto a  $B_0, B_1, B_2 \dots B_k$ , usando derivada parcial.

$$\frac{\partial S}{\partial B_0} B_0, B_1, B_2 \dots B_k = -2 \sum_{i=1}^n \left( Y_i - \hat{B}_0 - \sum_{j=1}^k \hat{B}_j X_{ij} \right) \cong 0$$

Desarrollando la ecuación tenemos:

$$n\beta_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n X_{ij} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n X_{ij} + \dots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^n X_{ik} = \sum_{i=1}^n Y_i$$

$$\hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n X_{ij} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n X_{ij}^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n X_{i1}X_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^n X_{i1}X_{ik} = \sum_{i=1}^n X_{i=1}Y_i$$

, , , , , ,

, , , , , ,

$$\hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n X_{ik} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n X_{ik} X_{i1} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n X_{ik} X_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^n X_{ik}^2 = \sum_{i=1}^n X_{ik} Y_i$$

Se expresa la siguiente matriz como:  $U\hat{B} = V$

Usando la matriz:

$$U = \begin{bmatrix} n & \sum X_1 & \sum X_2 & \sum X_3 & \sum X_{12} & \sum X_{13} & \sum X_{23} \\ \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_1 X_2 & \sum X_1 X_3 & \sum X_1 X_{12} & \sum X_1 X_{13} & \sum X_1 X_{23} \\ \sum X_2 & \sum X_2 X_1 & \sum X_2^2 & \sum X_2 X_3 & \sum X_2 X_{12} & \sum X_2 X_{13} & \sum X_2 X_{23} \\ \sum X_3 & \sum X_3 X_1 & \sum X_3 X_2 & \sum X_3^2 & \sum X_3 X_{12} & \sum X_3 X_{13} & \sum X_3 X_{23} \\ \sum X_{12} & \sum X_{12} X_1 & \sum X_{12} X_2 & \sum X_{12} X_3 & \sum X_{12}^2 & \sum X_{12} X_{13} & \sum X_{12} X_{23} \\ \sum X_{13} & \sum X_{13} X_1 & \sum X_{13} X_2 & \sum X_{13} X_3 & \sum X_{13} X_{12} & \sum X_{13}^2 & \sum X_{13} X_{23} \\ \sum X_{23} & \sum X_{23} X_1 & \sum X_{23} X_2 & \sum X_{23} X_3 & \sum X_{23} X_{12} & \sum X_{23} X_{13} & \sum X_{23}^2 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_{12} \\ B_{13} \\ B_{23} \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum X_1 Y \\ \sum X_2 Y \\ \sum X_3 Y \\ \sum X_{12} Y \\ \sum X_{13} Y \\ \sum X_{23} Y \end{bmatrix}$$

**Anexo 10.** Modelos Matemáticos de Suma de Cuadrados.

N	$X_0$	Y	$X_0^2$	$X_0X_1$	$X_0X_2$	$X_0X_3$	$X_0X_1X_2$
1	1	0,01	1	1,8	1,6	100	2,88
2	1	0,005	1	0,6	0,8	240	0,48
3	1	0,025	1	0,6	1,6	100	0,96
4	1	0	1	1,8	1,6	240	2,88
5	1	0,005	1	1,8	0,8	100	1,44
6	1	0,01	1	0,6	1,6	240	0,96
7	1	0	1	1,8	0,8	240	1,44
8	1	0,01	1	0,6	0,8	100	0,48
9	1	0,01	1	1,2	1,2	170	1,44
10	1	0,01	1	1,2	1,2	170	1,44
11	1	0,01	1	1,2	1,2	170	1,44
12	1	0,01	1	1,2	1,2	170	1,44
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>12</b>	<b>0,1025</b>	<b>12</b>	<b>14,4</b>	<b>14,4</b>	<b>2040</b>	<b>17,28</b>

N	$X_0X_1X_3$	$X_0X_2X_3$	$X_1^2$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_1^2X_2$	$X_1^2X_3$
1	180	160	3,24	2,88	180	5,184	324
2	144	192	0,36	0,48	144	0,288	86,4
3	60	160	0,36	0,96	60	0,576	36
4	432	384	3,24	2,88	432	5,184	777,6
5	180	80	3,24	1,44	180	2,592	324
6	144	384	0,36	0,96	144	0,576	86,4
7	432	192	3,24	1,44	432	2,592	777,6
8	60	80	0,36	0,48	60	0,288	36
9	204	204	1,44	1,44	204	1,728	244,8
10	204	204	1,44	1,44	204	1,728	244,8
11	204	204	1,44	1,44	204	1,728	244,8
12	204	204	1,44	1,44	204	1,728	244,8
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>2448</b>	<b>2448</b>	<b>20,16</b>	<b>17,28</b>	<b>2448</b>	<b>24,192</b>	<b>3427,2</b>

N	$X_1X_2X_3$	$X_2^2$	$X_2X_3$	$X_1X_2^2$	$X_2^2X_3$	$X_3^2$	$X_1X_3^2$
1	288	2,56	160	4,608	256	10000	18000
2	115,2	0,64	192	0,384	153,6	57600	34560
3	96	2,56	160	1,536	256	10000	6000
4	691,2	2,56	384	4,608	614,4	57600	103680
5	144	0,64	80	1,152	64	10000	18000
6	230,4	2,56	384	1,536	614,4	57600	34560
7	345,6	0,64	192	1,152	153,6	57600	103680
8	48	0,64	80	0,384	64	10000	6000
9	244,8	1,44	204	1,728	244,8	28900	34680
10	244,8	1,44	204	1,728	244,8	28900	34680
11	244,8	1,44	204	1,728	244,8	28900	34680
12	244,8	1,44	204	1,728	244,8	28900	34680
$\Sigma$	2937,6	18,56	2448	22,272	3427,2	386000	463200

N	$X_2X_3^2$	$X_1^2X_2^2$	$X_1^2X_2X_3$	$X_1X_2^2X_3$	$X_1^2X_3^2$	$X_1X_2X_3^2$	$X_2^2X_3^2$
1	16000	8,2944	518,4	460,8	32400	28800	25600
2	46080	0,2304	69,12	92,16	20736	27648	36864
3	16000	0,9216	57,6	153,6	3600	9600	25600
4	92160	8,2944	1244,16	1105,92	186624	165888	147456
5	8000	2,0736	259,2	115,2	32400	14400	6400
6	92160	0,9216	138,24	368,64	20736	55296	147456
7	46080	2,0736	622,08	276,48	186624	82944	36864
8	8000	0,2304	28,8	38,4	3600	4800	6400
9	34680	2,0736	293,76	293,76	41616	41616	41616
10	34680	2,0736	293,76	293,76	41616	41616	41616
11	34680	2,0736	293,76	293,76	41616	41616	41616
12	34680	2,0736	293,76	293,76	41616	41616	41616
$\Sigma$	<b>463200</b>	<b>31,3344</b>	<b>4112,64</b>	<b>3786,24</b>	<b>653184</b>	<b>555840</b>	<b>599104</b>

<b>N</b>	<b><math>X_0Y</math></b>	<b><math>X_1Y_1</math></b>	<b><math>X_2Y_1</math></b>	<b><math>X_3Y_1</math></b>	<b><math>X_1X_2Y_1</math></b>	<b><math>X_1X_3Y_1</math></b>	<b><math>X_2X_3Y_1</math></b>
<b>1</b>	0,01	0,018	0,016	1	0,0288	1,8	1,6
<b>2</b>	0,005	0,003	0,004	1,2	0,0024	0,72	0,96
<b>3</b>	0,025	0,015	0,04	2,5	0,024	1,5	4
<b>4</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>5</b>	0,005	0,009	0,004	0,5	0,0072	0,9	0,4
<b>6</b>	0,01	0,006	0,016	2,4	0,0096	1,44	3,84
<b>7</b>	0	0	0	0	0	0	0
<b>8</b>	0,01	0,006	0,008	1	0,0048	0,6	0,8
<b>9</b>	0,01	0,012	0,012	1,7	0,0144	2,04	2,04
<b>10</b>	0,01	0,012	0,012	1,7	0,0144	2,04	2,04
<b>11</b>	0,01	0,012	0,012	1,7	0,0144	2,04	2,04
<b>12</b>	0,01	0,012	0,012	1,7	0,0144	2,04	2,04
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>0,105</b>	<b>0,1050</b>	<b>0,136</b>	<b>15,4</b>	<b>0,1344</b>	<b>15,12</b>	<b>19,76</b>

## **Anexo 11**

### **Resultados de Análisis agua Rio Sama al Laboratorio CORPLAB**

**INFORME DE ENSAYO: 31279/2014**

**Rocío Noemi Zapana Quispe**

Urbanización la Virreyna Mz. C Lt. 03 - Tacna - Tacna

**Tesis para el análisis del agua del Río Sama**

**Emitido por: Roberto Gutierrez Paredes**

**Impreso el 06/11/2014**



**Lic. Roberto Gutierrez Paredes  
CQP: 871  
Jefe de Laboratorio-Sede Arequipa**

# INFORME DE ENSAYO: 31279/2014

## RESULTADOS ANALÍTICOS

Muestras del Item: 1

N° ALS - Corplab

Fecha de Muestreo

Hora de Muestreo

Tipo de Muestra

Identificación

353570/2014-1.0

24/10/2014

12:15:00

Aguas Superficiales

SAMA INCLAN

Parámetro	Ref. Mét.	Unidad	LD	
<b>007 ANALISIS DE METALES TOTALES</b>				
Aluminio (Al)	9001	mg/L	0,009	0,085
Antimonio (Sb)	9001	mg/L	0,006	<0,006
Arsenico (As)	9001	mg/L	0,010	0,324
Bario (Ba)	9001	mg/L	0,003	0,043
Berilio (Be)	9001	mg/L	0,001	<0,001
Bismuto (Bi)*	9001	mg/L	0,031	<0,031
Boro (B)	9001	mg/L	0,010	9,809
Cadmio (Cd)	9001	mg/L	0,003	<0,003
Calcio (Ca)	9001	mg/L	0,10	213,3
Cobalto (Co)	9001	mg/L	0,007	<0,007
Cobre (Cu)	9001	mg/L	0,003	0,005
Cromo (Cr)	9001	mg/L	0,009	<0,009
Estaño (Sn)	9001	mg/L	0,044	<0,044
Estroncio (Sr)	9001	mg/L	0,003	1,167
Fosforo (P)	9001	mg/L	0,15	<0,15
Hierro (Fe)	9001	mg/L	0,030	0,166
Litio (Li)	9001	mg/L	0,040	1,315
Magnesio (Mg)	9001	mg/L	0,040	43,82
Manganeso (Mn)	9001	mg/L	0,015	0,044
Molibdeno (Mo)	9001	mg/L	0,018	<0,018
Niquel (Ni)	9001	mg/L	0,002	0,026
Plata (Ag)	9001	mg/L	0,010	<0,010
Plomo (Pb)	9001	mg/L	0,008	<0,008
Potasio (K)	9001	mg/L	0,70	40,35
Selenio (Se)	9001	mg/L	0,010	<0,010
Silicio (Si)*	9001	mg/L	0,038	26,62
Sodio (Na)	9001	mg/L	0,10	242,4
Talio (Tl)	9001	mg/L	0,040	<0,040
Titanio (Ti)	9001	mg/L	0,030	<0,030
Vanadio (V)	9001	mg/L	0,010	<0,010
Zinc (Zn)	9001	mg/L	0,022	<0,022

**Observaciones:**

\* Los métodos indicados no han sido acreditados por INDECOPI-SNA.

Todos los resultados en donde se consigan el signo "<" significa que este no pudo ser detectado por el equipo siendo menor al valor de la columna LD "Limite de deteccion"

## CONTROLES DE CALIDAD

### Control Blancos

Parámetro	LD	Unidad	Resultado	Fecha de Análisis
Aluminio (Al)	0,009	mg/L	<0,009	04/11/2014
Aluminio (Al)	0,009	mg/L	<0,009	05/11/2014
Antimonio (Sb)	0,006	mg/L	<0,006	04/11/2014
Antimonio (Sb)	0,006	mg/L	<0,006	05/11/2014
Arsenico (As)	0,010	mg/L	<0,010	04/11/2014
Arsenico (As)	0,010	mg/L	<0,010	05/11/2014
Bario (Ba)	0,0030	mg/L	<0,0030	04/11/2014
Bario (Ba)	0,0030	mg/L	<0,0030	05/11/2014
Berilio (Be)	0,00100	mg/L	<0,00100	04/11/2014
Berilio (Be)	0,00100	mg/L	<0,00100	05/11/2014
Bismuto (Bi)*	0,031	mg/L	<0,031	04/11/2014
Bismuto (Bi)*	0,031	mg/L	<0,031	05/11/2014
Boro (B)	0,010	mg/L	<0,010	04/11/2014
Boro (B)	0,010	mg/L	<0,010	05/11/2014
Cadmio (Cd)	0,0030	mg/L	<0,0030	04/11/2014
Cadmio (Cd)	0,0030	mg/L	<0,0030	05/11/2014
Calcio (Ca)	0,10	mg/L	<0,10	04/11/2014

## INFORME DE ENSAYO: 31279/2014

### Control Blancos

Parámetro	LD	Unidad	Resultado	Fecha de Análisis
Calcio (Ca)	0,10	mg/L	<0,10	05/11/2014
Cobalto (Co)	0,0070	mg/L	<0,0070	04/11/2014
Cobalto (Co)	0,0070	mg/L	<0,0070	05/11/2014
Cobre (Cu)	0,003	mg/L	<0,003	04/11/2014
Cobre (Cu)	0,003	mg/L	<0,003	05/11/2014
Cromo (Cr)	0,0090	mg/L	<0,0090	04/11/2014
Cromo (Cr)	0,0090	mg/L	<0,0090	05/11/2014
Estaño (Sn)	0,0440	mg/L	<0,0440	04/11/2014
Estaño (Sn)	0,0440	mg/L	<0,0440	05/11/2014
Estroncio (Sr)	0,0030	mg/L	<0,0030	04/11/2014
Estroncio (Sr)	0,0030	mg/L	<0,0030	05/11/2014
Fosforo (P)	0,150	mg/L	<0,150	04/11/2014
Fosforo (P)	0,150	mg/L	<0,150	05/11/2014
Hierro (Fe)	0,030	mg/L	<0,030	04/11/2014
Hierro (Fe)	0,030	mg/L	<0,030	05/11/2014
Litio (Li)	0,040	mg/L	<0,040	04/11/2014
Litio (Li)	0,040	mg/L	<0,040	05/11/2014
Magnesio (Mg)	0,040	mg/L	<0,040	04/11/2014
Magnesio (Mg)	0,040	mg/L	<0,040	05/11/2014
Manganeso (Mn)	0,015	mg/L	<0,015	04/11/2014
Manganeso (Mn)	0,015	mg/L	<0,015	05/11/2014
Molibdeno (Mo)	0,0150	mg/L	<0,0150	04/11/2014
Molibdeno (Mo)	0,0150	mg/L	<0,0150	05/11/2014
Niquel (Ni)	0,002	mg/L	<0,002	04/11/2014
Niquel (Ni)	0,002	mg/L	<0,002	05/11/2014
Plata (Ag)	0,010	mg/L	<0,010	04/11/2014
Plata (Ag)	0,010	mg/L	<0,010	05/11/2014
Plomo (Pb)	0,008	mg/L	<0,008	04/11/2014
Plomo (Pb)	0,008	mg/L	<0,008	05/11/2014
Potasio (K)	0,70	mg/L	<0,70	04/11/2014
Potasio (K)	0,70	mg/L	<0,70	05/11/2014
Selenio (Se)	0,010	mg/L	<0,010	04/11/2014
Selenio (Se)	0,010	mg/L	<0,010	05/11/2014
Silicio (Si)*	0,038	mg/L	<0,038	04/11/2014
Silicio (Si)*	0,038	mg/L	<0,038	05/11/2014
Sodio (Na)	0,10	mg/L	<0,10	04/11/2014
Sodio (Na)	0,10	mg/L	<0,10	05/11/2014
Talio (Tl)	0,040	mg/L	<0,040	04/11/2014
Talio (Tl)	0,040	mg/L	<0,040	05/11/2014
Titanio (Ti)	0,0300	mg/L	<0,0300	04/11/2014
Titanio (Ti)	0,0300	mg/L	<0,0300	05/11/2014
Vanadio (V)	0,010	mg/L	<0,010	04/11/2014
Vanadio (V)	0,010	mg/L	<0,010	05/11/2014
Zinc (Zn)	0,0220	mg/L	<0,0220	04/11/2014
Zinc (Zn)	0,0220	mg/L	<0,0220	05/11/2014

# INFORME DE ENSAYO: 31279/2014

## Control Adiciones

Parámetro	% Recuperación	Límites de Recuperación (%)	Fecha de Análisis
%R Aluminio (Al)	101.5	70-130	04/11/2014
%R Antimonio (Sb)	106.9	70-130	04/11/2014
%R Arsenico (As)	100.1	70-130	04/11/2014
%R Berilio (Be)	104.6	70-130	04/11/2014
%R Bismuto (Bi)	104.1	70-130	04/11/2014
%R Boro (B)	104.7	70-130	04/11/2014
%R Cadmio (Cd)	105.0	70-130	04/11/2014
%R Calcio (Ca)	///	70-130	04/11/2014
%R Cobalto (Co)	102.5	70-130	04/11/2014
%R Cobre (Cu)	105.6	70-130	04/11/2014
%R Cromo (Cr)	103.1	70-130	04/11/2014
%R Estaño (Sn)	102.9	70-130	04/11/2014
%R Estroncio (Sr)	///	70-130	04/11/2014
%R Fosforo (P)	114.8	70-130	04/11/2014
%R Hierro (Fe)	100.6	70-130	04/11/2014
%R Litio (Li)	103.3	70-130	04/11/2014
%R Magnesio (Mg)	///	70-130	04/11/2014
%R Manganeso (Mn)	104.3	70-130	04/11/2014
%R Molibdeno (Mo)	101.7	70-130	04/11/2014
%R Niquel (Ni)	101.8	70-130	04/11/2014
%R Plata (Ag)	92.3	70-130	04/11/2014
%R Plomo (Pb)	104.3	70-130	04/11/2014
%R Potasio (K)	98.9	70-130	04/11/2014
%R Selenio (Se)	109.9	70-130	04/11/2014
%R Silicio (Si)	///	70-130	04/11/2014
%R Sodio (Na)	///	70-130	04/11/2014
%R Talio (Tl)	100.9	70-130	04/11/2014
%R Titanio (Ti)	105.0	70-130	04/11/2014
%R Vanadio (V)	102.3	70-130	04/11/2014
%R Zinc (Zn)	103.7	70-130	04/11/2014
%R Aluminio (Al)	101.7	70-130	04/11/2014
%R Antimonio (Sb)	108.4	70-130	04/11/2014
%R Arsenico (As)	101.1	70-130	04/11/2014
%R Bario (Ba)	103.8	70-130	04/11/2014
%R Berilio (Be)	105.4	70-130	04/11/2014
%R Bismuto (Bi)	105.0	70-130	04/11/2014
%R Boro (B)	106.7	70-130	04/11/2014
%R Cadmio (Cd)	105.4	70-130	04/11/2014
%R Calcio (Ca)	///	70-130	04/11/2014
%R Cobalto (Co)	103.5	70-130	04/11/2014
%R Cobre (Cu)	106.1	70-130	04/11/2014
%R Cromo (Cr)	103.7	70-130	04/11/2014
%R Estaño (Sn)	104.6	70-130	04/11/2014
%R Estroncio (Sr)	///	70-130	04/11/2014
%R Fosforo (P)	116.0	70-130	04/11/2014
%R Hierro (Fe)	100.9	70-130	04/11/2014
%R Litio (Li)	103.9	70-130	04/11/2014
%R Magnesio (Mg)	///	70-130	04/11/2014
%R Manganeso (Mn)	104.5	70-130	04/11/2014
%R Molibdeno (Mo)	102.7	70-130	04/11/2014
%R Niquel (Ni)	102.5	70-130	04/11/2014
%R Plata (Ag)	92.5	70-130	04/11/2014
%R Plomo (Pb)	105.0	70-130	04/11/2014
%R Potasio (K)	98.9	70-130	04/11/2014
%R Selenio (Se)	112.2	70-130	04/11/2014
%R Silicio (Si)	///	70-130	04/11/2014
%R Sodio (Na)	///	70-130	04/11/2014
%R Talio (Tl)	101.2	70-130	04/11/2014
%R Titanio (Ti)	105.3	70-130	04/11/2014
%R Vanadio (V)	103.0	70-130	04/11/2014
%R Zinc (Zn)	104.3	70-130	04/11/2014
PDR Aluminio (Al)	0.2	0-15	04/11/2014
PDR Antimonio (Sb)	1.4	0-15	04/11/2014
PDR Arsenico (As)	1.0	0-15	04/11/2014
PDR Bario (Ba)	0.5	0-15	04/11/2014
PDR Berilio (Be)	0.7	0-15	04/11/2014
PDR Bismuto (Bi)	0.9	0-15	04/11/2014
PDR Boro (B)	1.5	0-15	04/11/2014
PDR Cadmio (Cd)	0.4	0-15	04/11/2014
PDR Calcio (Ca)	0.4	0-15	04/11/2014
PDR Cobalto (Co)	1.0	0-15	04/11/2014
PDR Cobre (Cu)	0.4	0-15	04/11/2014
PDR Cromo (Cr)	0.5	0-15	04/11/2014
PDR Estaño (Sn)	1.6	0-15	04/11/2014
PDR Estroncio (Sr)	0.4	0-15	04/11/2014
PDR Fosforo (P)	1.0	0-15	04/11/2014
PDR Hierro (Fe)	0.4	0-15	04/11/2014
PDR Litio (Li)	0.6	0-15	04/11/2014
PDR Magnesio (Mg)	1.0	0-15	04/11/2014
PDR Manganeso (Mn)	0.2	0-15	04/11/2014
PDR Molibdeno (Mo)	0.9	0-15	04/11/2014
PDR Niquel (Ni)	0.7	0-15	04/11/2014

# INFORME DE ENSAYO: 31279/2014

## Control Adiciones

Parámetro	% Recuperación	Limites de Recuperación (%)	Fecha de Análisis
PDR Plata (Ag)	0.1	0-15	04/11/2014
PDR Plomo (Pb)	0.6	0-15	04/11/2014
PDR Potasio (K)	0.0	0-15	04/11/2014
PDR Selenio (Se)	2.1	0-15	04/11/2014
PDR Silicio (Si)	0.3	0-15	04/11/2014
PDR Sodio (Na)	0.8	0-15	04/11/2014
PDR Talio (Tl)	0.3	0-15	04/11/2014
PDR Titanio (Ti)	0.3	0-15	04/11/2014
PDR Vanadio (V)	0.7	0-15	04/11/2014
PDR Zinc (Zn)	0.6	0-15	04/11/2014

## Control Duplicados

Parámetro	% Recuperación	Limites de Recuperación (%)	Fecha de Análisis
PDR Aluminio (Al)	---	0-15	04/11/2014
PDR Antimonio (Sb)	---	0-15	04/11/2014
PDR Arsenico (As)	---	0-15	04/11/2014
PDR Bario (Ba)	2.3	0-15	04/11/2014
PDR Berilio (Be)	---	0-15	04/11/2014
PDR Bismuto (Bi)	---	0-15	04/11/2014
PDR Boro (B)	0.2	0-15	04/11/2014
PDR Cadmio (Cd)	---	0-15	04/11/2014
PDR Calcio (Ca)	1.5	0-15	04/11/2014
PDR Cobalto (Co)	---	0-15	04/11/2014
PDR Cobre (Cu)	---	0-15	04/11/2014
PDR Cromo (Cr)	---	0-15	04/11/2014
PDR Estaño (Sn)	---	0-15	04/11/2014
PDR Estroncio (Sr)	0.3	0-15	04/11/2014
PDR Fosforo (P)	---	0-15	04/11/2014
PDR Hierro (Fe)	0.3	0-15	04/11/2014
PDR Litio (Li)	---	0-15	04/11/2014
PDR Magnesio (Mg)	0.8	0-15	04/11/2014
PDR Manganeso (Mn)	2.8	0-15	04/11/2014
PDR Molibdeno (Mo)	---	0-15	04/11/2014
PDR Niquel (Ni)	---	0-15	04/11/2014
PDR Plata (Ag)	---	0-15	04/11/2014
PDR Plomo (Pb)	---	0-15	04/11/2014
PDR Potasio (K)	0.5	0-15	04/11/2014
PDR Selenio (Se)	---	0-15	04/11/2014
PDR Silicio (Si)	1.5	0-15	04/11/2014
PDR Sodio (Na)	0.1	0-15	04/11/2014
PDR Talio (Tl)	---	0-15	04/11/2014
PDR Titanio (Ti)	---	0-15	04/11/2014
PDR Vanadio (V)	---	0-15	04/11/2014
PDR Zinc (Zn)	---	0-15	04/11/2014

## Control Estándares

Parámetro	% Recuperación	Limites de Recuperación (%)	Fecha de Análisis
Aluminio (Al)	107.6	85-115	04/11/2014
Antimonio (Sb)	101.9	85-115	04/11/2014
Arsenico (As)	104.6	85-115	04/11/2014
Bario (Ba)	105.6	85-115	04/11/2014
Berilio (Be)	102.7	85-115	04/11/2014
Bismuto (Bi)*	110.8	85-115	04/11/2014
Boro (B)	104.9	85-115	04/11/2014
Cadmio (Cd)	105.0	85-115	04/11/2014
Calcio (Ca)	106.7	85-115	04/11/2014
Cobalto (Co)	104.2	85-115	04/11/2014
Cobre (Cu)	102.9	85-115	04/11/2014
Cromo (Cr)	104.4	85-115	04/11/2014
Estaño (Sn)	103.2	85-115	04/11/2014
Estroncio (Sr)	112.1	85-115	04/11/2014
Fosforo (P)	107.4	85-115	04/11/2014
Hierro (Fe)	100.7	85-115	04/11/2014
Litio (Li)	97.5	85-115	04/11/2014
Magnesio (Mg)	103.4	85-115	04/11/2014
Manganeso (Mn)	105.7	85-115	04/11/2014
Molibdeno (Mo)	101.4	85-115	04/11/2014
Niquel (Ni)	102.4	85-115	04/11/2014
Plata (Ag)	106.1	85-115	04/11/2014
Plomo (Pb)	107.1	85-115	04/11/2014
Potasio (K)	97.7	85-115	04/11/2014
Selenio (Se)	108.0	85-115	04/11/2014
Silicio (Si)*	97.3	85-115	04/11/2014
Sodio (Na)	87.2	85-115	04/11/2014
Talio (Tl)	104.6	85-115	04/11/2014
Titanio (Ti)	104.0	85-115	04/11/2014
Vanadio (V)	102.7	85-115	04/11/2014
Zinc (Zn)	102.7	85-115	04/11/2014

La fecha de análisis en el Informe de Ensayo corresponde a la fecha de ingreso del resultado al sistema.

LD = Limite de detección

# INFORME DE ENSAYO: 31279/2014

## DESCRIPCIÓN Y UBICACION GEOGRAFICA DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO

Estación de Muestreo	Resp. del Muestreo	Tipo de Muestra	Fecha de Recepción	Fecha de Muestreo	Ubicación Geográfica UTM	Condición de la Muestra	Descripción de la Estación de Muestreo
SAMA INCLAN	Ciente	Aguas Superficiales	02/11/2014	24/10/2014	---	Proporcionado por el cliente	Reservado por el cliente

## REFERENCIAS DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO

\* Los métodos indicados no han sido acreditados por INDECOPI-SNA.

Ref.	Sede	Parámetro	Método de Referencia	Descripción
9001	AQP	Metales Totales	EPA METHOD 200.7 Rev. 4.4 1994	Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry

## COMENTARIOS

**LIM:** Calle Russel 193 - Surquillo - Lima.

**AQP:** Av. Dolores 167 - Jose Luis Bustamante y Rivero - Arequipa.

**LME:** Av. Argentina 1859 - Cercado - Lima.

**LGN:** Laboratorio Ambiental de la Mina Lagunas Norte ubicado dentro de la Minera Barrick Misquichilca S.A. – Santiago de Chuco – La Libertad.

**MLV:** Laboratorio Ambiental de ALS Corplab ubicado dentro del campamento Malvinas – La Convención – Cuzco.

**"EPA":** U.S. Environmental Protection Agency.

**"SM":** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

**"ASTM":** American Society for Testing and Materials.

El presente documento es redactado íntegramente en ALS Corplab, su alteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial del presente informe, salvo autorización escrita de ALS Corplab; sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe.

El lote de muestras que incluye el presente informe será descartado a los 30 días calendarios de haber ingresado la muestra al laboratorio.

El período de custodia de la muestra dirimente se establecerá en función al mantenimiento de las características evaluadas inicialmente en el producto así como su perecibilidad.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

## **Anexo 12**

### **Resultados de análisis agua tratada en laboratorio CORPLAB**

# INFORME DE ENSAYO: 31279/2014

## DESCRIPCIÓN Y UBICACION GEOGRAFICA DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO

Estación de Muestreo	Resp. del Muestreo	Tipo de Muestra	Fecha de Recepción	Fecha de Muestreo	Ubicación Geográfica UTM	Condición de la Muestra	Descripción de la Estación de Muestreo
SAMA INCLAN	Cliente	Aguas Superficiales	02/11/2014	24/10/2014	---	Proporcionado por el cliente	Reservado por el cliente

## REFERENCIAS DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO

\* Los métodos indicados no han sido acreditados por INDECOPI-SNA.

Ref.	Sede	Parámetro	Método de Referencia	Descripción
9001	AQP	Metales Totales	EPA METHOD 200.7 Rev. 4.4 1994	Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry

## COMENTARIOS

**LIM:** Calle Russel 193 - Surquillo - Lima.

**AQP:** Av. Dolores 167 - Jose Luis Bustamante y Rivero - Arequipa.

**LME:** Av. Argentina 1859 - Cercado - Lima.

**LGN:** Laboratorio Ambiental de la Mina Lagunas Norte ubicado dentro de la Minera Barrick Misquichilca S.A. - Santiago de Chuco - La Libertad.

**MLV:** Laboratorio Ambiental de ALS Corplab ubicado dentro del campamento Malvinas - La Convención - Cuzco.

**"EPA":** U.S. Environmental Protection Agency.

**"SM":** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

**"ASTM":** American Society for Testing and Materials.

El presente documento es redactado íntegramente en ALS Corplab, su alteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial del presente informe, salvo autorización escrita de ALS Corplab; sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe.

El lote de muestras que incluye el presente informe será descartado a los 30 días calendarios de haber ingresado la muestra al laboratorio.

El periodo de custodia de la muestra dirimente se establecerá en función al mantenimiento de las características evaluadas inicialmente en el producto así como su perecibilidad.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

**INFORME DE ENSAYO: 31280/2014**

**Rocío Noemi Zapana Quispe**

Urbanización la Virreyna mz. C Lt. 03 - Tacna - Tacna

**Tesis para el análisis del agua del Río Sama**

**Emitido por: Roberto Gutierrez Paredes**

**Impreso el 06/11/2014**



Lic. Roberto Gutierrez Paredes  
CQP: 871  
Jefe de Laboratorio-Sede Arequipa

# INFORME DE ENSAYO: 31280/2014

## RESULTADOS ANALÍTICOS

Muestras del Item: 2

N° ALS - Corplab

Fecha de Muestreo

Hora de Muestreo

Tipo de Muestra

Identificación

353574/2014-1.0

353575/2014-1.0

353576/2014-1.0

31/10/2014

31/10/2014

31/10/2014

12:30:00

13:20:00

14:50:00

Aguas Superficiales

Aguas Superficiales

Aguas Superficiales

AGUA TRATADA I

AGUA TRATADA II

AGUA TRATADA III

Parámetro	Ref. Mét.	Unidad	LD			
<b>007 ANALISIS DE METALES TOTALES</b>						
Aluminio (Al)	9001	mg/L	0.009	0.013	0.014	0.016
Antimonio (Sb)	9001	mg/L	0.006	<0.006	<0.006	<0.006
Arsenico (As)	9001	mg/L	0.010	<0.010	<0.010	<0.010
Bario (Ba)	9001	mg/L	0.003	0.034	0.030	0.026
Berilio (Be)	9001	mg/L	0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Bismuto (Bi)*	9001	mg/L	0.031	<0.031	<0.031	<0.031
Boro (B)	9001	mg/L	0.010	9.869	9.820	9.896
Cadmio (Cd)	9001	mg/L	0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Calcio (Ca)	9001	mg/L	0.10	194.6	198.1	195.4
Cobalto (Co)	9001	mg/L	0.007	<0.007	<0.007	<0.007
Cobre (Cu)	9001	mg/L	0.003	0.003	0.005	<0.003
Cromo (Cr)	9001	mg/L	0.009	<0.009	<0.009	<0.009
Estaño (Sn)	9001	mg/L	0.044	<0.044	<0.044	<0.044
Estroncio (Sr)	9001	mg/L	0.003	1.089	1.107	1.078
Fosforo (P)	9001	mg/L	0.15	<0.15	<0.15	<0.15
Hierro (Fe)	9001	mg/L	0.030	0.234	0.160	<0.030
Litio (Li)	9001	mg/L	0.040	1.261	1.295	1.275
Magnesio (Mg)	9001	mg/L	0.040	41.95	42.84	42.24
Manganeso (Mn)	9001	mg/L	0.015	0.054	0.113	0.154
Molibdeno (Mo)	9001	mg/L	0.018	<0.018	<0.018	<0.018
Niquel (Ni)	9001	mg/L	0.002	0.022	0.022	0.021
Plata (Ag)	9001	mg/L	0.010	<0.010	<0.010	<0.010
Plomo (Pb)	9001	mg/L	0.008	<0.008	<0.008	<0.008
Potasio (K)	9001	mg/L	0.70	38.67	39.56	38.67
Selenio (Se)	9001	mg/L	0.010	<0.010	<0.010	<0.010
Silicio (Si)*	9001	mg/L	0.038	23.78	22.50	19.71
Sodio (Na)	9001	mg/L	0.10	238.6	252.4	237.8
Talio (Tl)	9001	mg/L	0.040	<0.040	<0.040	<0.040
Titanio (Ti)	9001	mg/L	0.030	<0.030	<0.030	<0.030
Vanadio (V)	9001	mg/L	0.010	<0.010	<0.010	<0.010
Zinc (Zn)	9001	mg/L	0.022	<0.022	<0.022	<0.022

## INFORME DE ENSAYO: 31280/2014

Muestras del ítem: 2

N° ALS - Corplab

353578/2014-1.0

353580/2014-1.0

Fecha de Muestreo

31/10/2014

31/10/2014

Hora de Muestreo

15:10:00

15:30:00

Tipo de Muestra

Aguas Superficiales

Aguas Superficiales

Identificación

AGUA TRATADA IV

AGUA TRATADA V

Parámetro	Ref. Mét.	Unidad	LD		
<b>007 ANALISIS DE METALES TOTALES</b>					
Aluminio (Al)	9001	mg/L	0.009	0.016	0.015
Antimonio (Sb)	9001	mg/L	0.006	<0.006	<0.006
Arsenico (As)	9001	mg/L	0.010	<0.010	<0.010
Bario (Ba)	9001	mg/L	0.003	0.032	0.030
Berilio (Be)	9001	mg/L	0.001	<0.001	<0.001
Bismuto (Bi)*	9001	mg/L	0.031	<0.031	<0.031
Boro (B)	9001	mg/L	0.010	10.03	8.648
Cadmio (Cd)	9001	mg/L	0.003	<0.003	<0.003
Calcio (Ca)	9001	mg/L	0.10	194.2	194.9
Cobalto (Co)	9001	mg/L	0.007	<0.007	<0.007
Cobre (Cu)	9001	mg/L	0.003	0.003	<0.003
Cromo (Cr)	9001	mg/L	0.009	<0.009	<0.009
Estaño (Sn)	9001	mg/L	0.044	<0.044	<0.044
Estroncio (Sr)	9001	mg/L	0.003	1.093	1.088
Fosforo (P)	9001	mg/L	0.15	<0.15	<0.15
Hierro (Fe)	9001	mg/L	0.030	0.183	0.177
Litio (Li)	9001	mg/L	0.040	1.261	1.275
Magnesio (Mg)	9001	mg/L	0.040	42.15	42.14
Manganeso (Mn)	9001	mg/L	0.015	0.082	0.111
Molibdeno (Mo)	9001	mg/L	0.018	<0.018	<0.018
Niquel (Ni)	9001	mg/L	0.002	0.023	0.022
Plata (Ag)	9001	mg/L	0.010	<0.010	<0.010
Plomo (Pb)	9001	mg/L	0.008	<0.008	<0.008
Potasio (K)	9001	mg/L	0.70	38.92	38.81
Selenio (Se)	9001	mg/L	0.010	<0.010	<0.010
Silicio (Si)*	9001	mg/L	0.038	22.89	22.83
Sodio (Na)	9001	mg/L	0.10	246.7	213.6
Talio (Tl)	9001	mg/L	0.040	<0.040	<0.040
Titanio (Ti)	9001	mg/L	0.030	<0.030	<0.030
Vanadio (V)	9001	mg/L	0.010	<0.010	<0.010
Zinc (Zn)	9001	mg/L	0.022	<0.022	<0.022

**Observaciones:**

\* Los métodos indicados no han sido acreditados por INDECOPI-SNA.

Todos los resultados en donde se consigan el signo "<" significa que este no pudo ser detectado por el equipo siendo menor al valor de la columna LD "Limite de detección"

## CONTROLES DE CALIDAD

### Control Blancos

Parámetro	LD	Unidad	Resultado	Fecha de Análisis
Aluminio (Al)	0.009	mg/L	<0.009	04/11/2014
Aluminio (Al)	0.009	mg/L	<0.009	05/11/2014
Aluminio (Al)	0.009	mg/L	<0.009	06/11/2014
Antimonio (Sb)	0.006	mg/L	<0.006	04/11/2014
Antimonio (Sb)	0.006	mg/L	<0.006	05/11/2014
Antimonio (Sb)	0.006	mg/L	<0.006	06/11/2014
Arsenico (As)	0.010	mg/L	<0.010	04/11/2014
Arsenico (As)	0.010	mg/L	<0.010	05/11/2014
Arsenico (As)	0.010	mg/L	<0.010	06/11/2014
Bario (Ba)	0.0030	mg/L	<0.0030	04/11/2014
Bario (Ba)	0.0030	mg/L	<0.0030	05/11/2014
Bario (Ba)	0.0030	mg/L	<0.0030	06/11/2014
Berilio (Be)	0.00100	mg/L	<0.00100	04/11/2014
Berilio (Be)	0.00100	mg/L	<0.00100	05/11/2014
Berilio (Be)	0.00100	mg/L	<0.00100	06/11/2014
Bismuto (Bi)*	0.031	mg/L	<0.031	04/11/2014
Bismuto (Bi)*	0.031	mg/L	<0.031	05/11/2014
Bismuto (Bi)*	0.031	mg/L	<0.031	06/11/2014
Boro (B)	0.010	mg/L	<0.010	04/11/2014
Boro (B)	0.010	mg/L	<0.010	05/11/2014
Boro (B)	0.010	mg/L	<0.010	06/11/2014
Cadmio (Cd)	0.0030	mg/L	<0.0030	04/11/2014
Cadmio (Cd)	0.0030	mg/L	<0.0030	05/11/2014

## INFORME DE ENSAYO: 31280/2014

### Control Blancos

Parámetro	LD	Unidad	Resultado	Fecha de Análisis
Cadmio (Cd)	0.0030	mg/L	<0.0030	06/11/2014
Calcio (Ca)	0.10	mg/L	<0.10	04/11/2014
Calcio (Ca)	0.10	mg/L	<0.10	05/11/2014
Calcio (Ca)	0.10	mg/L	<0.10	06/11/2014
Cobalto (Co)	0.0070	mg/L	<0.0070	04/11/2014
Cobalto (Co)	0.0070	mg/L	<0.0070	05/11/2014
Cobalto (Co)	0.0070	mg/L	<0.0070	06/11/2014
Cobre (Cu)	0.003	mg/L	<0.003	04/11/2014
Cobre (Cu)	0.003	mg/L	<0.003	05/11/2014
Cobre (Cu)	0.003	mg/L	<0.003	06/11/2014
Cromo (Cr)	0.0090	mg/L	<0.0090	04/11/2014
Cromo (Cr)	0.0090	mg/L	<0.0090	05/11/2014
Cromo (Cr)	0.0090	mg/L	<0.0090	06/11/2014
Estaño (Sn)	0.0440	mg/L	<0.0440	04/11/2014
Estaño (Sn)	0.0440	mg/L	<0.0440	05/11/2014
Estaño (Sn)	0.0440	mg/L	<0.0440	06/11/2014
Estroncio (Sr)	0.0030	mg/L	<0.0030	04/11/2014
Estroncio (Sr)	0.0030	mg/L	<0.0030	05/11/2014
Estroncio (Sr)	0.0030	mg/L	<0.0030	06/11/2014
Fosforo (P)	0.150	mg/L	<0.150	04/11/2014
Fosforo (P)	0.150	mg/L	<0.150	05/11/2014
Fosforo (P)	0.150	mg/L	<0.150	06/11/2014
Hierro (Fe)	0.030	mg/L	<0.030	04/11/2014
Hierro (Fe)	0.030	mg/L	<0.030	05/11/2014
Hierro (Fe)	0.030	mg/L	<0.030	06/11/2014
Litio (Li)	0.040	mg/L	<0.040	04/11/2014
Litio (Li)	0.040	mg/L	<0.040	05/11/2014
Litio (Li)	0.040	mg/L	<0.040	06/11/2014
Magnesio (Mg)	0.040	mg/L	<0.040	04/11/2014
Magnesio (Mg)	0.040	mg/L	<0.040	05/11/2014
Magnesio (Mg)	0.040	mg/L	<0.040	06/11/2014
Manganeso (Mn)	0.015	mg/L	<0.015	04/11/2014
Manganeso (Mn)	0.015	mg/L	<0.015	05/11/2014
Manganeso (Mn)	0.015	mg/L	<0.015	06/11/2014
Molibdeno (Mo)	0.0150	mg/L	<0.0150	04/11/2014
Molibdeno (Mo)	0.0150	mg/L	<0.0150	05/11/2014
Molibdeno (Mo)	0.0150	mg/L	<0.0150	06/11/2014
Niquel (Ni)	0.002	mg/L	<0.002	04/11/2014
Niquel (Ni)	0.002	mg/L	<0.002	05/11/2014
Niquel (Ni)	0.002	mg/L	<0.002	06/11/2014
Plata (Ag)	0.010	mg/L	<0.010	04/11/2014
Plata (Ag)	0.010	mg/L	<0.010	05/11/2014
Plata (Ag)	0.010	mg/L	<0.010	06/11/2014
Plomo (Pb)	0.008	mg/L	<0.008	04/11/2014
Plomo (Pb)	0.008	mg/L	<0.008	05/11/2014
Plomo (Pb)	0.008	mg/L	<0.008	06/11/2014
Potasio (K)	0.70	mg/L	<0.70	04/11/2014
Potasio (K)	0.70	mg/L	<0.70	05/11/2014
Potasio (K)	0.70	mg/L	<0.70	06/11/2014
Selenio (Se)	0.010	mg/L	<0.010	04/11/2014
Selenio (Se)	0.010	mg/L	<0.010	05/11/2014
Selenio (Se)	0.010	mg/L	<0.010	06/11/2014
Silicio (Si)*	0.038	mg/L	<0.038	04/11/2014
Silicio (Si)*	0.038	mg/L	<0.038	05/11/2014
Silicio (Si)*	0.038	mg/L	<0.038	06/11/2014
Sodio (Na)	0.10	mg/L	<0.10	04/11/2014
Sodio (Na)	0.10	mg/L	<0.10	05/11/2014
Sodio (Na)	0.10	mg/L	<0.10	06/11/2014
Talio (Tl)	0.040	mg/L	<0.040	04/11/2014
Talio (Tl)	0.040	mg/L	<0.040	05/11/2014
Talio (Tl)	0.040	mg/L	<0.040	06/11/2014
Titanio (Ti)	0.0300	mg/L	<0.0300	04/11/2014
Titanio (Ti)	0.0300	mg/L	<0.0300	05/11/2014
Titanio (Ti)	0.0300	mg/L	<0.0300	06/11/2014
Vanadio (V)	0.010	mg/L	<0.010	04/11/2014
Vanadio (V)	0.010	mg/L	<0.010	05/11/2014
Vanadio (V)	0.010	mg/L	<0.010	06/11/2014
Zinc (Zn)	0.0220	mg/L	<0.0220	04/11/2014
Zinc (Zn)	0.0220	mg/L	<0.0220	05/11/2014
Zinc (Zn)	0.0220	mg/L	<0.0220	06/11/2014

# INFORME DE ENSAYO: 31280/2014

## Control Adiciones

Parámetro	% Recuperación	Límites de Recuperación (%)	Fecha de Análisis
%R Aluminio (Al)	101,5	70-130	04/11/2014
%R Antimonio (Sb)	106,9	70-130	04/11/2014
%R Arsenico (As)	100,1	70-130	04/11/2014
%R Berilio (Be)	104,6	70-130	04/11/2014
%R Bismuto (Bi)	104,1	70-130	04/11/2014
%R Boro (B)	104,7	70-130	04/11/2014
%R Cadmio (Cd)	105,0	70-130	04/11/2014
%R Calcio (Ca)	///	70-130	04/11/2014
%R Cobalto (Co)	102,5	70-130	04/11/2014
%R Cobre (Cu)	105,6	70-130	04/11/2014
%R Cromo (Cr)	103,1	70-130	04/11/2014
%R Estaño (Sn)	102,9	70-130	04/11/2014
%R Estroncio (Sr)	///	70-130	04/11/2014
%R Fosforo (P)	114,8	70-130	04/11/2014
%R Hierro (Fe)	100,6	70-130	04/11/2014
%R Litio (Li)	103,3	70-130	04/11/2014
%R Magnesio (Mg)	///	70-130	04/11/2014
%R Manganeso (Mn)	104,3	70-130	04/11/2014
%R Molibdeno (Mo)	101,7	70-130	04/11/2014
%R Niquel (Ni)	101,8	70-130	04/11/2014
%R Plata (Ag)	92,3	70-130	04/11/2014
%R Plomo (Pb)	104,3	70-130	04/11/2014
%R Potasio (K)	98,9	70-130	04/11/2014
%R Selenio (Se)	109,9	70-130	04/11/2014
%R Silicio (Si)	///	70-130	04/11/2014
%R Sodio (Na)	///	70-130	04/11/2014
%R Talio (Tl)	100,9	70-130	04/11/2014
%R Titanio (Ti)	105,0	70-130	04/11/2014
%R Vanadio (V)	102,3	70-130	04/11/2014
%R Zinc (Zn)	103,7	70-130	04/11/2014
%R Aluminio (Al)	101,7	70-130	04/11/2014
%R Antimonio (Sb)	108,4	70-130	04/11/2014
%R Arsenico (As)	101,1	70-130	04/11/2014
%R Bario (Ba)	103,8	70-130	04/11/2014
%R Berilio (Be)	105,4	70-130	04/11/2014
%R Bismuto (Bi)	105,0	70-130	04/11/2014
%R Boro (B)	106,7	70-130	04/11/2014
%R Cadmio (Cd)	105,4	70-130	04/11/2014
%R Calcio (Ca)	///	70-130	04/11/2014
%R Cobalto (Co)	103,5	70-130	04/11/2014
%R Cobre (Cu)	106,1	70-130	04/11/2014
%R Cromo (Cr)	103,7	70-130	04/11/2014
%R Estaño (Sn)	104,6	70-130	04/11/2014
%R Estroncio (Sr)	///	70-130	04/11/2014
%R Fosforo (P)	116,0	70-130	04/11/2014
%R Hierro (Fe)	100,9	70-130	04/11/2014
%R Litio (Li)	103,9	70-130	04/11/2014
%R Magnesio (Mg)	///	70-130	04/11/2014
%R Manganeso (Mn)	104,5	70-130	04/11/2014
%R Molibdeno (Mo)	102,7	70-130	04/11/2014
%R Niquel (Ni)	102,5	70-130	04/11/2014
%R Plata (Ag)	92,5	70-130	04/11/2014
%R Plomo (Pb)	105,0	70-130	04/11/2014
%R Potasio (K)	98,9	70-130	04/11/2014
%R Selenio (Se)	112,2	70-130	04/11/2014
%R Silicio (Si)	///	70-130	04/11/2014
%R Sodio (Na)	///	70-130	04/11/2014
%R Talio (Tl)	101,2	70-130	04/11/2014
%R Titanio (Ti)	105,3	70-130	04/11/2014
%R Vanadio (V)	103,0	70-130	04/11/2014
%R Zinc (Zn)	104,3	70-130	04/11/2014
PDR Aluminio (Al)	0,2	0-15	04/11/2014
PDR Antimonio (Sb)	1,4	0-15	04/11/2014
PDR Arsenico (As)	1,0	0-15	04/11/2014
PDR Bario (Ba)	0,5	0-15	04/11/2014
PDR Berilio (Be)	0,7	0-15	04/11/2014
PDR Bismuto (Bi)	0,9	0-15	04/11/2014
PDR Boro (B)	1,5	0-15	04/11/2014
PDR Cadmio (Cd)	0,4	0-15	04/11/2014
PDR Calcio (Ca)	0,4	0-15	04/11/2014
PDR Cobalto (Co)	1,0	0-15	04/11/2014
PDR Cobre (Cu)	0,4	0-15	04/11/2014
PDR Cromo (Cr)	0,5	0-15	04/11/2014
PDR Estaño (Sn)	1,6	0-15	04/11/2014
PDR Estroncio (Sr)	0,4	0-15	04/11/2014
PDR Fosforo (P)	1,0	0-15	04/11/2014
PDR Hierro (Fe)	0,4	0-15	04/11/2014
PDR Litio (Li)	0,6	0-15	04/11/2014
PDR Magnesio (Mg)	1,0	0-15	04/11/2014
PDR Manganeso (Mn)	0,2	0-15	04/11/2014
PDR Molibdeno (Mo)	0,9	0-15	04/11/2014
PDR Niquel (Ni)	0,7	0-15	04/11/2014

## INFORME DE ENSAYO: 31280/2014

### Control Adiciones

Parámetro	% Recuperación	Límites de Recuperación (%)	Fecha de Análisis
PDR Plata (Ag)	0,1	0-15	04/11/2014
PDR Plomo (Pb)	0,6	0-15	04/11/2014
PDR Potasio (K)	0,0	0-15	04/11/2014
PDR Selenio (Se)	2,1	0-15	04/11/2014
PDR Silicio (Si)	0,3	0-15	04/11/2014
PDR Sodio (Na)	0,8	0-15	04/11/2014
PDR Talio (Tl)	0,3	0-15	04/11/2014
PDR Titanio (Ti)	0,3	0-15	04/11/2014
PDR Vanadio (V)	0,7	0-15	04/11/2014
PDR Zinc (Zn)	0,6	0-15	04/11/2014

### Control Duplicados

Parámetro	% Recuperación	Límites de Recuperación (%)	Fecha de Análisis
PDR Aluminio (Al)	---	0-15	04/11/2014
PDR Antimonio (Sb)	---	0-15	04/11/2014
PDR Arsenico (As)	---	0-15	04/11/2014
PDR Bario (Ba)	2,3	0-15	04/11/2014
PDR Berilio (Be)	---	0-15	04/11/2014
PDR Bismuto (Bi)	---	0-15	04/11/2014
PDR Boro (B)	0,2	0-15	04/11/2014
PDR Cadmio (Cd)	---	0-15	04/11/2014
PDR Calcio (Ca)	1,5	0-15	04/11/2014
PDR Cobalto (Co)	---	0-15	04/11/2014
PDR Cobre (Cu)	---	0-15	04/11/2014
PDR Cromo (Cr)	---	0-15	04/11/2014
PDR Estaño (Sn)	---	0-15	04/11/2014
PDR Estroncio (Sr)	0,3	0-15	04/11/2014
PDR Fosforo (P)	---	0-15	04/11/2014
PDR Hierro (Fe)	0,3	0-15	04/11/2014
PDR Litio (Li)	---	0-15	04/11/2014
PDR Magnesio (Mg)	0,8	0-15	04/11/2014
PDR Manganeso (Mn)	2,8	0-15	04/11/2014
PDR Molibdeno (Mo)	---	0-15	04/11/2014
PDR Niquel (Ni)	---	0-15	04/11/2014
PDR Plata (Ag)	---	0-15	04/11/2014
PDR Plomo (Pb)	---	0-15	04/11/2014
PDR Potasio (K)	0,5	0-15	04/11/2014
PDR Selenio (Se)	---	0-15	04/11/2014
PDR Silicio (Si)	1,5	0-15	04/11/2014
PDR Sodio (Na)	0,1	0-15	04/11/2014
PDR Talio (Tl)	---	0-15	04/11/2014
PDR Titanio (Ti)	---	0-15	04/11/2014
PDR Vanadio (V)	---	0-15	04/11/2014
PDR Zinc (Zn)	---	0-15	04/11/2014

### Control Estándares

Parámetro	% Recuperación	Límites de Recuperación (%)	Fecha de Análisis
Aluminio (Al)	107,6	85-115	04/11/2014
Antimonio (Sb)	101,9	85-115	04/11/2014
Arsenico (As)	104,6	85-115	04/11/2014
Bario (Ba)	105,6	85-115	04/11/2014
Berilio (Be)	102,7	85-115	04/11/2014
Bismuto (Bi)*	110,8	85-115	04/11/2014
Boro (B)	104,9	85-115	04/11/2014
Cadmio (Cd)	105,0	85-115	04/11/2014
Calcio (Ca)	106,7	85-115	04/11/2014
Cobalto (Co)	104,2	85-115	04/11/2014
Cobre (Cu)	102,9	85-115	04/11/2014
Cromo (Cr)	104,4	85-115	04/11/2014
Estaño (Sn)	103,2	85-115	04/11/2014
Estroncio (Sr)	112,1	85-115	04/11/2014
Fosforo (P)	107,4	85-115	04/11/2014
Hierro (Fe)	100,7	85-115	04/11/2014
Litio (Li)	97,5	85-115	04/11/2014
Magnesio (Mg)	103,4	85-115	04/11/2014
Manganeso (Mn)	105,7	85-115	04/11/2014
Molibdeno (Mo)	101,4	85-115	04/11/2014
Niquel (Ni)	102,4	85-115	04/11/2014
Plata (Ag)	106,1	85-115	04/11/2014
Plomo (Pb)	107,1	85-115	04/11/2014
Potasio (K)	97,7	85-115	04/11/2014
Selenio (Se)	108,0	85-115	04/11/2014
Silicio (Si)*	97,3	85-115	04/11/2014
Sodio (Na)	87,2	85-115	04/11/2014
Talio (Tl)	104,6	85-115	04/11/2014
Titanio (Ti)	104,0	85-115	04/11/2014
Vanadio (V)	102,7	85-115	04/11/2014
Zinc (Zn)	102,7	85-115	04/11/2014

La fecha de análisis en el Informe de Ensayo corresponde a la fecha de ingreso del resultado al sistema.

LD = Límite de detección

# INFORME DE ENSAYO: 31280/2014

## DESCRIPCIÓN Y UBICACION GEOGRAFICA DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO

Estación de Muestreo	Resp. del Muestreo	Tipo de Muestra	Fecha de Recepción	Fecha de Muestreo	Ubicación Geográfica UTM	Condición de la Muestra	Descripción de la Estación de Muestreo
AGUA TRATADA I	Ciente	Aguas Superficiales	02/11/2014	31/10/2014	---	Proporcionado por el cliente	Reservado por el cliente
AGUA TRATADA II	Ciente	Aguas Superficiales	02/11/2014	31/10/2014	---	Proporcionado por el cliente	Reservado por el cliente
AGUA TRATADA III	Ciente	Aguas Superficiales	02/11/2014	31/10/2014	---	Proporcionado por el cliente	Reservado por el cliente
AGUA TRATADA IV	Ciente	Aguas Superficiales	02/11/2014	31/10/2014	---	Proporcionado por el cliente	Reservado por el cliente
AGUA TRATADA V	Ciente	Aguas Superficiales	02/11/2014	31/10/2014	---	Proporcionado por el cliente	Reservado por el cliente

## REFERENCIAS DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO

\* Los métodos indicados no han sido acreditados por INDECOPI-SNA.

Ref.	Sede	Parámetro	Método de Referencia	Descripción
9001	AQP	Metales Totales	EPA METHOD 200.7 Rev. 4.4 1994	Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry

## COMENTARIOS

**LIM:** Calle Russel 193 - Surquillo - Lima.

**AQP:** Av. Dolores 167 - Jose Luis Bustamante y Rivero - Arequipa.

**LME:** Av. Argentina 1859 - Cercado - Lima.

**LGN:** Laboratorio Ambiental de la Mina Lagunas Norte ubicado dentro de la Minera Barrick Misquichilca S.A. - Santiago de Chuco - La Libertad.

**MLV:** Laboratorio Ambiental de ALS Corplab ubicado dentro del campamento Malvinas - La Convención - Cuzco.

**"EPA":** U.S. Environmental Protection Agency.

**"SM":** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

**"ASTM":** American Society for Testing and Materials.

El presente documento es redactado íntegramente en ALS Corplab, su alteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial del presente informe, salvo autorización escrita de ALS Corplab; sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe.

El lote de muestras que incluye el presente informe será descartado a los 30 días calendarios de haber ingresado la muestra al laboratorio.

El periodo de custodia de la muestra dirimente se establecerá en función al mantenimiento de las características evaluadas inicialmente en el producto así como su perecibilidad.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.