

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Química

**ESTUDIO DE LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL RÍO  
SAMA A NIVEL DOMICILIAR UTILIZANDO LANA DE  
ACERO COMPLEMENTADO CON AIREACIÓN  
Y PROPUESTA DE DISEÑO DE UN  
REACTOR BATCH**

**TESIS**

Presentada por

Bach. Piter Lizandro Larico Mamani

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO QUÍMICO**

TACNA – PERÚ

2019

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Química

**ESTUDIO DE LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO DEL RÍO  
SAMA A NIVEL DOMICILIAR UTILIZANDO LANA DE  
ACERO COMPLEMENTADO CON AIREACIÓN  
Y PROPUESTA DE DISEÑO DE UN  
REACTOR BATCH**

Tesis sustentado por Bach. Piter Lizandro Larico Mamani el día 03 de enero del 2019, estando integrado el jurado por:

Presidente : .....  
Mgr. Pedro Nolazco Cornejo del Carpio

Secretario : .....  
MSc. Manuel de Jesús Sánchez Rosales

Vocal : .....  
Ing. Luis Fernando Cáceres Yañez

Asesor : .....  
Dr. Edgardo Oscar Avendaño Cáceres

## **DEDICATORIA**

A mi madre por ser el pilar fundamental de mi familia, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me apoyaste incondicionalmente.

## **AGRADECIMIENTO**

Gracias a Dios por permitirme conocer a mis abuelos, gracias a mi abuelo Gregorio y mi abuela Candelaria por ser los mejores abuelos, gracias, simplemente gracias.

Índice	
Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Índice de Tablas	ix
Índice de Figuras	x
Notación	xii
Resumen	xiv
Introducción	1
Capítulo I	3
Planteamiento del problema	3
1. 1. Descripción del problema	3
1. 1. 1. Antecedentes del problema	3
1. 1. 2. Problemática de la investigación	4
1. 2. Formulación del problema	5
1. 3. Justificación	6
1. 4. Alcances y limitaciones del estudio	7
1. 5. Objetivos	7
Objetivo general	7

Objetivos específicos	7
1. 6. Hipótesis	8
Hipótesis general	8
Hipótesis específicas	8
Capítulo II	9
Marco Teórico	9
2. 1. Antecedentes del estudio	9
2. 1. 1. Efecto de las condiciones de operación en las tasas de corrosión del hierro en los sistemas de hierro metálico para la eliminación de arsénico	9
2. 1. 2. Estudio de columnas reactivas para la remoción de arsénico mediante el empleo de la técnica hierro metálico	10
2. 1. 3. Oxidación del arsénico (III) por oxígeno y el peróxido de hidrógeno con intervención del hierro: comparación de dispersión y soporte en resina de hierro metálico	11
2. 2. Bases Teóricas	12
2. 2. 1. Problema del arsénico en América Latina	12
2. 2. 2. Distribución regional del arsénico en América Latina	13
2. 2. 3. Química del arsénico	17

2. 2. 4. Corrosión acuosa del hierro	20
2. 2. 5. Coagulación	23
2. 2. 6. Aireación	24
2. 2. 7. Tecnologías convencionales de remoción de arsénico	25
2. 2. 8. Reglamento de la calidad del agua para consumo humano	31
2. 3. Definición de términos	34
Capítulo III	37
Marco Metodológico	37
3. 1. Tipo y diseño de la investigación	37
3. 2. Población y muestra	37
3. 3. Operacionalización de variables	38
3. 4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos	39
3. 4. 1. Instrumentos, equipos, materiales y reactivos	39
3. 4. 2. Técnicas de recolección de datos	41
3. 5. Procesamiento y análisis de datos	42
Capítulo IV	45
Resultados y Discusión	45

4. 1. Resultados de la matriz de superficie de respuesta diseño Box–Behnken para la remoción de arsénico e hierro total	45
4. 2. Análisis estadístico para la remoción de arsénico	47
4. 3. Desarrollo de la ecuación del modelo de regresión	50
4. 4. Efecto combinado de las condiciones de operación sobre la remoción de arsénico	51
4. 5. Determinación de las mejores condiciones de operación de masa, tiempo y pH en la remoción de arsénico	54
4. 6. Análisis estadístico para la remoción de hierro	56
4. 7. Discusión de resultados	56
4. 8. Propuesta de diseño del reactor	57
4. 8. 1. Cálculo del volumen del tanque (reactor)	58
4. 8. 2. Cálculo de la eficiencia del aireador a condiciones estándar	60
4. 8. 3. Dimensionamiento del tanque (reactor)	65
Conclusiones	67
Recomendaciones	68
Referencias bibliográficas	69
Anexos	77

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resultados de parámetros de calidad del agua de la población Sama Inclán.	3
Tabla 2: Límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica.	32
Tabla 3: Límites máximos permisibles de parámetros químicos inorgánicos.	33
Tabla 4: Operacionalización de variables.	39
Tabla 5: Arreglo experimental del diseño de Box-Behnken.	42
Tabla 6: Delineamiento estadístico del diseño de Box-Behnken.	43
Tabla 7: Análisis de varianza.	44
Tabla 8: Matriz de diseño experimental, respuesta de arsénico, hierro total y porcentaje de remoción de arsénico.	46
Tabla 9 : Análisis de varianza para la remoción de As.	47
Tabla 10: Análisis respecto a la regresión para la remoción de As.	48
Tabla 11: Resumen de ajuste estadístico.	48
Tabla 12: Recopilación de datos de OD, $(C_s-C)$ y $\log(C_s-C)$ .	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de América Latina indicando la ubicación de zonas con contaminación por arsénico ( $>50 \mu\text{g/l}$ ).	15
Figura 2. Diagrama Eh-pH del sistema As-H <sub>2</sub> O.	19
Figura 3. Corrosión húmeda del hierro en un electrolito que contiene oxígeno.	22
Figura 4. Ubicación de punto de muestreo.	38
Figura 5. Diagrama de Pareto para la remoción de As.	49
Figura 6. Gráfica de efectos principales para As.	49
Figura 7. Gráfica de las interacciones para arsénico.	50
Figura 8. Superficie de respuesta para la variable dependiente de arsénico total Vs las variables independientes masa de hierro y tiempo, manteniendo constante el pH a 7,07.	52
Figura 9. Superficie de respuesta para la variable dependiente de arsénico total Vs las variables independientes tiempo de contacto y pH, manteniendo constante la masa 1g.	53
Figura 10. Superficie de respuesta para la variable dependiente de arsénico total Vs las variables independientes masa de hierro y pH, manteniendo el tiempo de contacto 60 min.	54
Figura 11. Tiempo Vs (Cs- C).	62
Figura 12. a.- Diseño del tanque para 10 L, b.- Imagen del tanque para 10 L.	65

Figura 13. a.- Vista superior del tanque (reactor), b.- vista superior del tanque (reactor).	66
Figura 14. bomba de aireación.	77
Figura 15. Lana de acero.	78
Figura 16. Test de arsénico.	79

## NOTACIÓN

As	Arsénico
As <sup>5+</sup>	Arsénico pentavalente
As <sup>3+</sup> ,	Arsénico trivalente
A <sub>T1</sub>	Área del tanque (reactor)
C	Concentración de gas en la fase líquida para el tiempo t, mg/L
C <sub>S(T,0)</sub>	Concentración de saturación de OD para la temperatura T y 0 msnm
C <sub>S(T, A)</sub>	Concentración de saturación de OD a la temperatura y altitud Correspondiente, mg/L
D <sub>T</sub>	Diámetro del tanque (reactor)
DIGESA	Dirección general de salud
Fe	Hierro
g	Gramos
H <sub>T</sub>	Altura del tanque (reactor)
H (f)	Hessiana
K <sub>La (20)</sub>	Coefficiente de transferencia del gas a 20 °C
K <sub>La (T)</sub>	Coefficiente de transferencia del gas a T °C
Kg	Kilogramos
Km <sup>2</sup>	kilómetros cuadrados

L	Litro
mg	Miligramos
min	Minutos
OD	Oxígeno disuelto
Qa	Caudal de aireación
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinación
R	Relación de escala
SAE	Eficiencia del aireador estándar
SSR	Suma de los cuadrados de la regresión
SSE	Suma de los cuadrados del error
SST	Suma total de los cuadrados
N=SOTR	Tasa de transferencia oxígeno estándar.
V <sub>T</sub>	Volumen del tanque
x <sub>1</sub>	Variable de masa de hierro
x <sub>3</sub>	Variable de pH
x <sub>2</sub>	Variable de tiempo de contacto
y <sub>1</sub>	Variable de respuesta de arsénico total
y <sub>2</sub>	Variable de respuesta de hierro total
μg	Microgramo

## RESUMEN

En la presente tesis, se estudia el proceso que combina la utilización de lana de acero con aireación para remover arsénico de las aguas de río Sama a nivel domiciliario y que cumpla los estándares de los límites máximos permisibles del Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano DS N° 031-2010-SA. Para este estudio se utilizó agua natural, el estudio experimental se realizó a través de ensayos en un reactor batch utilizando la metodología de superficie de respuestas con un diseño experimental Box y Benhken siendo los factores  $x_1$  (masa de lana de acero) de 0,5 a 1,5 g;  $x_2$  (tiempo de contacto) de 50 a 70 min y  $x_3$  (pH) de 6 a 8,14; manteniendo constantes el volumen (V) de agua de 1 litro y caudal de aireación ( $Q_a$ ) de 1 L/min. Para el estudio del efecto de los factores mencionados, se utilizó la metodología de superficie de respuesta utilizando el diseño Box y Benhken con 15 tratamientos. Los resultados obtenidos mostraron remociones desde 0,05 a 0,005 mg/L de As, cumpliendo estos valores con el límite máximo permisible (0,01 mg/L de As) establecido en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (DIGESA, 2011), del análisis de regresión múltiple se obtuvo un  $R^2 = 0,9058$  y  $R^2$  ajustado = 0,736, siendo los factores más significativos el pH, tiempo y la interacción de pH y tiempo. Con los resultados obtenidos se propone para el diseño del reactor batch con una capacidad de 10 litros, la aplicación de una masa de 15 g

de lana de acero, un tiempo de contacto de 70 min y un pH natural de 8,14 teniendo un caudal de aireación constante de 10 L/min.

## INTRODUCCIÓN

La presencia de arsénico en las aguas del río Sama, es un tema importante en el tratamiento del agua para consumo humano, ya que sus consecuencias son potencialmente negativas para la salud de la población que la consume sin ningún tratamiento. Los riesgos para la salud provienen del uso de agua que contiene arsénico utilizada para beber y cocinar, estas actividades representan solo un pequeño porcentaje del consumo total del agua.

Las dos sustancias solubles de arsénico que se encuentran comúnmente en el medio ambiente son el arsenito ( $\text{As}^{3+}$ ) y el arseniato ( $\text{As}^{5+}$ ), siendo el primero más tóxico (Sharma, V.K. y Sohn, M., 2009 y Kavitha, C.; Malarvizhi, A.; Kumaran, S.S.; Ranech, M., 2010) .

Se han desarrollado diversas tecnologías de tratamiento para eliminar el arsénico del agua potable. Las tecnologías utilizadas comúnmente incluyen la coagulación y la precipitación con sales de hierro y aluminio.

El presente trabajo de investigación, consiste en el análisis de los factores más influyentes en el tratamiento para la remoción de arsénico total e hierro total en el agua destinada para consumo humano del distrito de Sama Inclan, utilizando como insumos (materias primas) existentes en el mercado local como son: lana de acero y aire (utilizado para el proceso de aireación). La tecnología utilizada produce

óxidos e hidróxidos de hierro a partir de la lana de acero complementado con aireación para hacer posible la remoción de arsénico. Esta tecnología a pequeña escala o nivel domiciliario (10 L) y su proceso de operación ha mostrado ser eficiente, de mantenimiento simple y bajo costo en la remoción de arsénico.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1. 1. Descripción del problema

##### 1. 1. 1. Antecedentes del problema

Según los monitoreos realizados por la Dirección Regional de Salud Tacna (DIRESA) durante el año 2017 se reportaron altos niveles de concentración de arsénico, los resultados de análisis se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1**

Resultados de parámetros de calidad del agua de la población Sama Inclán.

Descripción	Parámetro	
	Hierro total (Fe total mg/L)	Arsénico total (As total mg/L)
Agua natural / ingreso a la planta de tratamiento de agua (PTA) convencional de Sama Inclán	0,272	0,3
Agua para uso y consumo humano / salida de la PTA convencional de Sama Inclán	0,118	0,3
Agua para uso y consumo humano / reservorio R1 de la PTA compacta de Sama Inclán	0,257	0,23
Agua para uso y consumo humano / tacho de almacenamiento de Sama Inclán	0,152	0,23

**Fuente:** Elaboración propia con datos de registros de DIRESA (2017).

En relación a la presencia de arsénico (As) en el Rio Sama de la localidad de Sama Inclán, puede indicarse que se debe a varios factores, como el carácter hidráulico del acuífero, suelos tectónicos, los circuitos de flujo del agua, textura y mineralogía de los sedimentos portadores, profundidad de captación, ritmos y cantidad de la recarga y paso del tiempo. A pesar de que son numerosos los factores que intervienen en los contenidos de arsénico disuelto, se han encontrado que las mayores concentraciones de arsénico en solución están vinculadas a condiciones geoquímicas de nuestros suelos en el sur del país. (Nicolli, H., 1985).

Los estudios de momias de la cultura Chinchorro (Bundschuh J. et al, 2012), cuyos habitantes vivieron de 7 000 a 2 000 años a. C. en una franja costera entre el norte de Chile, Antofagasta y el sur del Perú e Ilo; mostraron que los habitantes de esa zona han sufrido arsenicismo, causado por el alto consumo de arsénico de origen geogénico de las aguas y sus alimentos; en el análisis del pelo de las momias de la estación sanitaria el Morro cerca de Arica, han dado concentraciones de As hasta de 696 mg /kg.

### **1. 1. 2. Problemática de la investigación**

La población más afectada en nuestro país se encuentra dispersa en el área rural, la cual consume agua sin ningún tratamiento y desconoce el riesgo al que está expuesta. La presencia natural de arsénico en aguas superficiales y

subterráneas de América Latina está asociada al volcanismo terciario y cuaternario desarrollado en la Cordillera de Los Andes, proceso que aún continua y que se muestra en flujos de lava, géiseres, fumarolas, aguas termales y fenómenos geotérmicos relacionados con el volcanismo circumpacífico del llamado Círculo de fuego del Pacífico. (Castro de Esparza, M. L., 2006.).

Según la guía para la calidad de agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2000), la presencia del arsénico en el agua potable, no debe ser mayor de 0,01 mg/L (10 µg/L).

La localidad de Sama Inclán en la actualidad no cuenta con un sistema de tratamiento que reduzca los niveles de arsénico a las concentraciones establecidas por las normativas internacionales y nacionales (arsénico < 0,01 mg/L). Siendo el objetivo de la presente tesis proporcionar una tecnología alternativa de solución a nivel domiciliario que sea eficiente, económica y fácil de implementar. Que pueda remover el arsénico a las concentraciones que exigen los reglamentos de calidad de agua para consumo humano.

## **1. 2. Formulación del problema**

¿Será eficiente la remoción de arsénico del agua del río Sama a nivel domiciliario utilizando lana de acero complementado con aireación en un reactor Batch?

### **1. 3. Justificación**

El consumo permanente de arsénico provoca la intoxicación crónica debido a su acumulación en el organismo humano y la exposición prolongada a elevadas concentraciones de arsénico daña el sistema nervioso central, el hígado y la piel, resultando en la aparición de diversos tipos de cáncer, tales como el cáncer de la piel, de los pulmones y la hiperqueratosis (Hall, A., 2002).

Actualmente existen diferentes tecnologías para la remoción de arsénico presente en aguas naturales a pequeña escala como el intercambio iónico, ósmosis inversa, nanofiltración, alúmina activada, etc.; los cuales son procesos que tienen costos muy elevados, para pequeñas localidades rurales (Rivera Huerta M. L. y Piña, S. M., 2005).

El presente proyecto de investigación, propone una alternativa técnica y económicamente viable que permitirá la remoción de arsénico a los valores recomendados por la OMS y el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano del Perú, utilizando insumos comerciales, con el objetivo de mejorar la calidad del agua a nivel domiciliario, mejorando la calidad de vida de los pobladores de la localidad de Sama Inclán.

#### **1. 4. Alcances y limitaciones del estudio**

##### **Alcances**

- El estudio del proyecto se realizó a escala de laboratorio.
- Se realizaron análisis de laboratorio para agua tratada y agua cruda.
- Se realizaron análisis fisicoquímicos de pH, arsénico e hierro total.

##### **Limitaciones:**

- El estudio se realizó en el periodo sin precipitación fluvial, en esta época las características del agua de río de Sama son constantes.
- Para las pruebas de análisis de arsénico total e hierro total, se realizaron mediante test de arsénico y para hierro total se utilizó el método estándar de Fenantrolina 3500-Fe B (APHA, AWWA and WPCF, 1999).

#### **1. 5. Objetivos**

##### **Objetivo general**

- Evaluar la remoción de arsénico del río Sama a nivel domiciliario utilizando lana de acero complementado con aireación y propuesta de diseño de un reactor batch.

##### **Objetivos específicos**

- Determinar la influencia de los factores: pH, tiempo de contacto y masa de lana de acero en la remoción de arsénico.
- Determinar la eficiencia de remoción de arsénico total.
- Realizar la propuesta de diseño de un reactor batch.

## **1. 6. Hipótesis**

### **Hipótesis general**

- Es eficiente la remoción de arsénico del agua del río Sama a nivel domiciliario utilizando lana de acero complementada con aireación en un reactor batch.

### **Hipótesis específicas**

- Los factores: pH, tiempo de contacto y masa de lana de acero influyen en la remoción del arsénico total.
- La tecnología utilizando lana de acero alcanza remociones altas de arsénico total.
- Los resultados obtenidos a escala laboratorio son eficientes y permitirán elaborar la propuesta de diseño de un reactor batch.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2. 1. Antecedentes del estudio**

##### **2. 1. 1. Efecto de las condiciones de operación en las tasas de corrosión del hierro en los sistemas de hierro metálico para la eliminación de arsénico**

Debido a los nuevos estándares de calidad del agua, el uso de la técnica de hierro metálico para la remoción de arsénico está ganando atención. La oxidación química espontánea de hierro metálico por oxígeno disuelto, es un proceso complejo que involucra una variedad de especies intermedias férricas-ferrosas metaestables, se estudió en experimentos por lotes a corto plazo utilizando dos diferentes materiales de hierro metálico comercialmente disponibles. Las diferencias en las tasas de corrosión pueden atribuirse a la diferente reactividad específica de estos materiales. Se investigaron los efectos del pH, la carga de hierro metálico, la conductividad inicial y la concentración de oxígeno disuelto en los perfiles cinéticos Fe (II) y Fe (III). También se estudiaron las tasas de corrosión de hierro metálico en presencia de As (III) y As (V). Dependiendo del pH, las concentraciones de Fe (II) y Fe (III) están

significativamente influenciadas por la presencia de As (III) y As (V). Nuestros resultados pueden ser importantes desde un punto de vista tecnológico, ya que es bien sabido que las tasas de corrosión del hierro rigen la generación de sitios para la eliminación de arsénico (Triszcz, Porta, Fernando & Einschlag, 2009).

### **2.1.2. Estudio de columnas reactivas para la remoción de arsénico mediante el empleo de la técnica hierro metálico**

La remoción de As en agua puede lograrse mediante el empleo de la técnica hierro metálico. El proceso se basa en la oxidación de hierro metálico a especies insolubles de Fe (II) y Fe (III), que dependiendo de las condiciones del medio, generan rápidamente mezclas de oxi/hidróxidos de hierro. Estas partículas juegan un papel fundamental en el secuestro del contaminante mediante mecanismos de adsorción y co-precipitación. Posteriormente las partículas producidas deben ser removidas de la fase acuosa para restablecer las características higiénico-sanitarias de las aguas. En el presente trabajo se muestran los estudios realizados sobre columnas reactivas destinadas a la remoción del contaminante en forma continua (Triszcz, Chippano, Gordon, Porta & García, 2010).

### **2. 1. 3. Oxidación del arsénico (III) por oxígeno y el peróxido de hidrógeno con intervención del hierro: comparación de dispersión y soporte en resina de hierro metálico**

El objetivo fue evaluar las diferencias cinéticas de eliminación del As (III) y los mecanismos entre el hierro metálico dispersado e hierro metálico soportado en la resina en presencia de oxígeno disuelto y peróxido de hidrógeno. Los resultados experimentales muestran que el As (III) puede ser eliminado por todos los sistemas estudiados (hierro metálico dispersado con oxígeno disuelto, hierro metálico dispersado con peróxido de hidrógeno, hierro metálico soportado en la resina con oxígeno disuelto y hierro metálico soportado en la resina con peróxido de hidrógeno). El sistema hierro metálico dispersado con peróxido de hidrógeno fue más eficiente que el hierro metálico soportado en la resina con peróxido de hidrógeno para la oxidación de As (III) (Du, Zhou, Zhang, Pan, Lv, Zhang, & Zhang, 2014). Se observaron tendencias similares en el sistema O<sub>2</sub> para ambos sólidos. Los comportamientos cinéticos, así como la influencia de un eliminador de radicales hidroxilo (2-propanol) en la oxidación de As (III) a diferentes pH sugieren que la oxidación del As (III) en los sistemas hierro metálico dispersado con oxígeno disuelto y hierro metálico dispersado con peróxido de hidrógeno se produjeron principalmente a través de reacciones tipo Fenton. La oxidación de As (III) en los sistemas hierro metálico soportado en la resina con oxígeno disuelto y hierro metálico soportado en la resina con peróxido de hidrógeno

puede esperarse que procede de la siguiente manera: el As (III) fue adsorbido en primer lugar sobre la superficie de hierro metálico soportado en la resina, y luego la oxidación puede proceder principalmente a través de un mecanismo no Fenton que convierte directamente el  $H_2O_2$  en  $O_2$  y  $H_2O$ . Además, ciertos óxidos de hierro en hierro metálico soportado en la resina también podrían servir como oxidantes para la oxidación del As (III). Las diferencias significativas entre los hierros metálicos dispersos y soportados sugieren que la matriz de respaldo interfirió en el proceso de eliminación, que merece una investigación adicional (Du, Q., Zhou, L., Zhang, S., Pan B., Ly L., Zhang W. y Zhang Q., 2014).

## **2. 2. Bases teóricas**

### **2. 2. 1. Problema del arsénico en América Latina**

Al menos cuatro millones de personas dependen del agua contaminada con arsénico (As) ( $> 50 \mu\text{g/L}$ ) en países latinoamericanos como Argentina, Chile, México y Perú. La magnitud de la contaminación en algunos países como Argentina y México, hace de este tema una preocupación primaria de salud pública. Por ejemplo, en Argentina (y también en Chile hasta 1 970) más del 1 % de la población estaba expuesta al agua contaminada. En Bolivia, Brasil, Costa Rica, Ecuador, El Salvador y Guatemala, se detectó que el agua potable en la mayoría de estos países, la contaminación por As es causada por la aparición de geogénicos, principalmente relacionados con el volcanismo en los Andes

(Argentina, Bolivia, Chile, Perú) y su continuación en Centroamérica (Nicaragua, México, El Salvador). A partir de estas fuentes el As es liberado al medio ambiente (aguas superficiales, suelos, etc.), por disolución natural y erosión de la roca (Argentina, Chile, Bolivia, Perú, Nicaragua, El Salvador, México) y/o por actividades mineras. (Chile, Bolivia, Perú, México). Otras fuentes de liberación de As, que son de importancia menor y muy local, son artificiales (por ejemplo, debido a procesos de producción de metal electrolítico (Brasil)), y actividades agrícolas (por ejemplo, el uso de plaguicidas que contienen As) (Bundschuh, J et al, 2009).

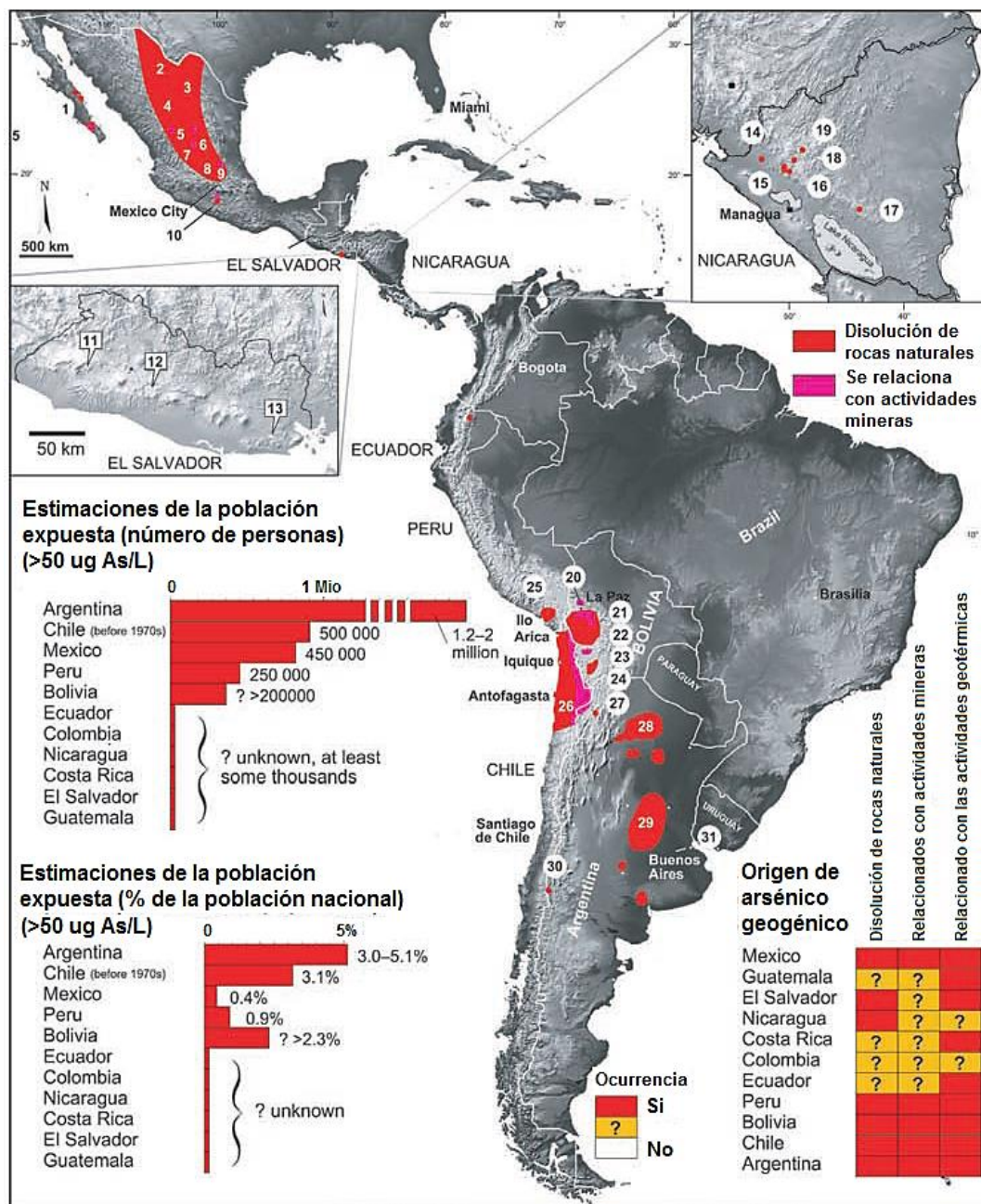
### **2. 2. 2. Distribución regional del arsénico en América Latina**

La presencia de As en aguas subterráneas y superficiales de fuentes geogénicas (incluidas las liberadas a través de actividades mineras) ha sido documentada en Argentina, Chile, Perú y México (Figura 1) Durante las últimas décadas en estos países, son comunes las concentraciones en el rango de 0,01 a varios mg/L. En otros países, como Bolivia, Brasil, Ecuador, Nicaragua y El Salvador, este problema sólo se ha detectado e investigado recientemente a lo largo de los últimos años (Figura 1) (Bundschuh, J et al, 2009).

## **Contaminación por arsénico en el Perú**

Se estima que en el Perú, el número de personas expuestas a concentraciones de arsénico superiores a los niveles recomendados en el agua supera los 250 mil (Bundschuh, J. et al., 2009 y Castro de Esparza, M. L., 2006).

En el Perú, los contaminantes geológicos del arsénico están presentes en la laguna Aricota, cuyas aguas que se utilizan para el suministro de agua a la ciudad de Ilo (Figura 1). Esta laguna es alimentado por los ríos Callazas y Salado, que pasan por el área del volcán Yucamani. Las rocas en esta área volcánica son la principal fuente de As. Recientemente, también se reportaron concentraciones altas de agua subterránea en el área de la ciudad de Puno (Bundschuh, J. et al., 2009).



**Figura 1.** Mapa de América Latina indicando la ubicación de zonas con contaminación por arsénico (>50 µg/l).

**Fuente:** Bundschuh, J et al, 2009.

### **Contaminación por arsénico en Chile**

Varias áreas del norte de Chile tienen una historia larga y bien documentada de altas concentraciones de As en el agua potable (Sancha, A.M., Fuentealba, C. & Campos, C., 2004). En esta región, el agua que abastece a la mayoría de las ciudades y pueblos del desierto de Atacama se obtiene de los ríos que se originan en la cordillera de los Andes, que contiene numerosas fuentes de As geológico (Figura 1). Las concentraciones típicas de As de estas aguas fluviales son de 200 a 900 µg/L. La capital provincial, Antofagasta (250 000 habitantes) ha tenido un patrón único de exposición al As. La concentración de As en el suministro público de agua potable de Antofagasta aumentó bruscamente en 1958. (Hopenhayn Rich et al., 2000).

### **Contaminación por arsénico en Argentina**

La contaminación por arsénico en las aguas subterráneas es una preocupación ambiental primordial en partes extendidas de la región de la llanura Chaco-Pampeana en Argentina. Esta área consiste en depósitos terciarios de tipo loess eólico en la llanura pampeana y de sedimentos predominantemente fluviales de edad terciaria y cuaternaria en las llanuras de la región del Chaco, que cubren una superficie de alrededor de 978 634 km<sup>2</sup> (Figura 1).

## Otros países

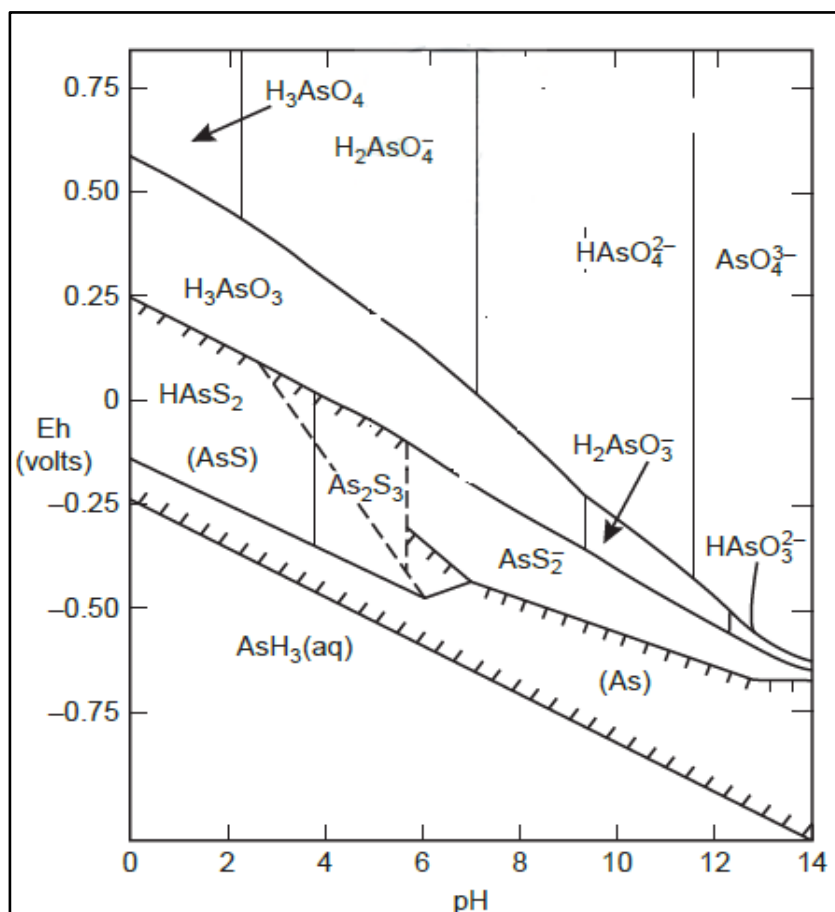
En otros países, con el entorno geológico relacionado con el vulcanismo andino o centroamericano, existe poca información sobre la ocurrencia de As desde fuentes geológicas en aguas superficiales y subterráneas. Se necesitan más investigaciones para evaluar completamente la magnitud de la contaminación por As en América Latina.

### 2. 2. 3. Química del arsénico

El arsénico se clasifica como un metaloide, ya que posee propiedades químicas y físicas tanto de los metales como de los no metales. Presenta cuatro estados de oxidación (+5, +3, 0, -3) bajo condiciones normales siendo los más comunes sus estados trivalentes  $\text{As}^{3+}$  (arsenitos) y pentavalente  $\text{As}^{5+}$  (arsenatos). En aguas naturales de pH 5 a 9 predominan las especies  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  y  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ . Su carácter químico está determinado por el hecho de que cambia rápidamente de un estado de oxidación a otro, a través de reacciones químicas o biológicas que ocurren en el ambiente. Así, el control del equilibrio en la solubilidad y movilidad del arsénico depende de las condiciones de óxido-reducción, el pH y la actividad biológica entre otras. Los estados de oxidación más comunes de arsénico inorgánico en el agua son el arsénico trivalente  $\text{As}^{3+}$ , encontrado en aguas subterráneas, y el arsénico pentavalente  $\text{As}^{5+}$  que prevalece en aguas superficiales. El  $\text{As}^{5+}$  se presenta como  $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ; sus correspondientes

especies de disociación son  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$  y  $\text{AsO}_4^{3-}$ . El  $\text{As}^{3+}$  aparece como  $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ; sus especies de disociación son  $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ ,  $\text{HAsO}_3^{2-}$  y  $\text{AsO}_3^{3-}$  considerada la más tóxica (Cullen, W. R. & Reimer, K. J., 1989).

La química del arsénico en medio acuoso es compleja y depende de varios factores, incluyendo el pH y el potencial redox (Eh). De acuerdo al diagrama potencial redox-potencial hidrógeno (Eh-pH) mostrado en la Figura 2, el arsénico es un elemento seminoble; es decir, se requieren condiciones de oxidación o reducción de moderadas a altas para solubilizarlo. La presencia del oxígeno atmosférico u otro oxidante promueve su disolución (Pourbaix, 1966).



**Figura 2.** Diagrama Eh-pH del sistema As-H<sub>2</sub>O.

**Fuente:** Ferguson y Galvis, 1972.

Las reacciones ácido-base del arsénico son muy rápidas, pero las de óxido-reducción son lentas, a menos que se aplique un oxidante fuerte. Las investigaciones demuestran que el  $\text{As}^{3+}$  es estable por varios días en presencia de oxígeno; es decir, a un potencial redox lo suficientemente alto para causar la oxidación espontánea a  $\text{As}^{5+}$ , sin embargo, esta se lleva a cabo lentamente. En aguas que contienen oxígeno, el  $\text{As}^{5+}$  es predominante, existiendo en formas aniónicas como  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ,  $\text{HAsO}_4^{2-}$  o  $\text{AsO}_4^{3-}$  en el pH común del agua (pH 5-12).

Bajo condiciones anóxicas, el  $\text{As}^{3+}$  es estable, con especies no iónicas ( $\text{H}_3\text{AsO}_3$ ) y aniónicas ( $\text{H}_2\text{AsO}_3^-$ ), las cuales predominan respectivamente por arriba y por debajo de un pH de 9,22. Soluciones fuertemente ácidas o alcalinas, así como la presencia de sales de cobre, carbón o altas temperaturas pueden incrementar la velocidad de oxidación (Ferguson, J. F., y Galvis J., 1972.).

#### **2. 2. 4. Corrosión acuosa del hierro**

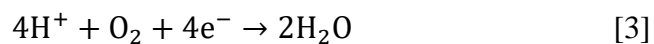
Como los aceros y otras aleaciones basadas en hierro son los materiales metálicos más comúnmente expuestos al agua, se discutirá la corrosión acuosa con un enfoque especial en las reacciones de hierro (Fe) con agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Los iones metálicos entran en solución en áreas anódicas en una cantidad químicamente equivalente a la reacción en áreas catódicas (Figura 3). En los casos de aleaciones basadas en hierro, generalmente tiene lugar la siguiente reacción en áreas anódicas:



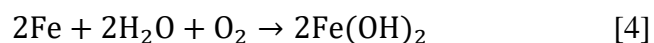
Esta reacción es rápida en la mayoría de los medios, como lo demuestra la falta de polarización pronunciada cuando el hierro se convierte en un ánodo que emplea una corriente externa. Cuando el hierro se corroe, la velocidad generalmente se controla mediante la reacción catódica, que en general es mucho más lenta (control catódico) (Pierre, R. & Roberge, 2000). En soluciones sin aireación, la reacción catódica es:



Esta reacción avanza rápidamente en ácidos, pero solo lentamente en medios acuosos alcalinos o neutros. La reacción catódica puede acelerarse mediante la reducción de oxígeno disuelto de acuerdo con la siguiente reacción, un proceso llamado despolarización:

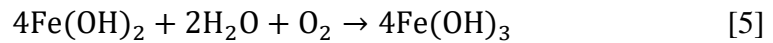


El oxígeno disuelto reacciona con átomos de hidrógeno adsorbidos al azar sobre la superficie del hierro, independientemente de la presencia o ausencia de impurezas en el metal. La reacción de oxidación procede tan rápido como el oxígeno alcanza la superficie del metal (Pierre, R. & Roberge, 2000). De la reacciones (1) y (3), y haciendo uso de la reacción  $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$ , conducen a la reacción (4).

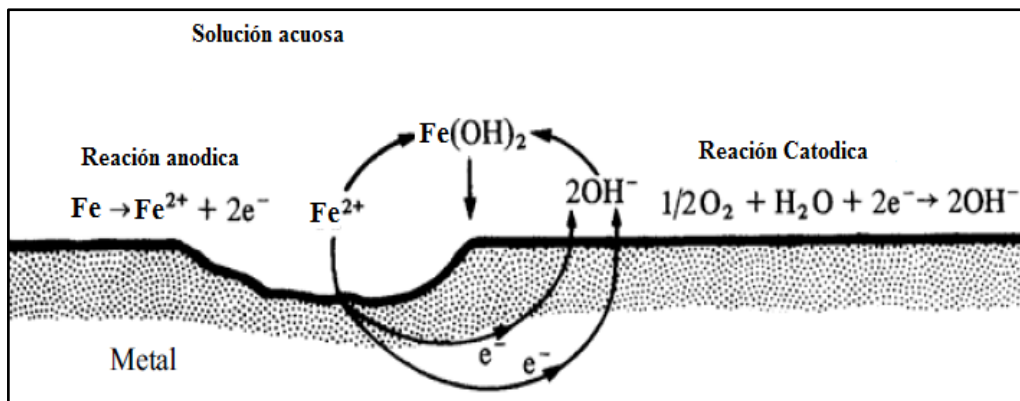


El óxido ferroso hidratado ( $\text{FeO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) o el hidróxido ferroso [ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ] compone la capa de barrera de difusión próxima a la superficie de hierro a través de la cual el  $\text{O}_2$  debe difundirse. El pH de una solución saturada de  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  es de aproximadamente 9,5, de modo que la superficie de hierro que se corroe en agua pura aireada es siempre alcalina (Pierre R. & Roberge, 2000). El color del  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , aunque es blanco cuando la sustancia es pura, normalmente es de color verde a negro verdoso debido a la oxidación incipiente por el aire. En la

superficie externa de la película de óxido, el acceso al oxígeno disuelto convierte el óxido ferroso en óxido férrico hidratado o hidróxido férrico, de acuerdo con:



El óxido férrico hidratado es de color naranja a marrón rojizo y constituye la mayor parte del óxido ordinario. Existe como  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  no magnetita (hematita) o como  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  magnetita, la forma  $\alpha$  tiene la mayor energía de formación libre negativa (mayor estabilidad termodinámica). El  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  saturado es casi neutro en pH. Un hierro férrico ferroso es la magnetita hidratada,  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , a menudo forma una capa intermedia negra entre  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  hidratado y  $\text{FeO}$ . Por lo tanto, las películas de óxido normalmente consisten en tres capas de óxidos de hierro en diferentes estados de oxidación (Pierre R. & Roberge, 2000).



**Figura 3.** Corrosión húmeda del hierro en un electrolito que contiene oxígeno.

**Fuente:** Bardal, Einar, 2004.

### 2. 2. 5. Coagulación

El proceso de coagulación desestabiliza los coloides del agua, al neutralizar las cargas eléctricas de la superficie, permitiendo así que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos. Estos flóculos, inicialmente pequeños, al juntarse formarán aglomerados mayores, que son capaces de asentarse o sedimentar. El proceso de desestabilización (neutralización de la carga) corresponde a la coagulación. Y la etapa de formación de flóculos (formación de aglomerados), corresponde a la floculación. Muchos autores se refieren a ambas etapas como “coagulación”. Como agentes coagulantes se usan, en general, sales de Al o Fe (Letterman, R. D 2002).

La coagulación puede remover, además de materias suspendidas, algunos constituyentes disueltos como arsénico, hierro, manganeso, fosfato, fluoruro, etc. En el caso del arsénico, su remoción se basa en que la reacción del coagulante con el agua forma especies metálicas hidrolizadas con carga positiva y que el arsénico pentavalente (As (V)), en la forma de arseniato, es un anión cargado negativamente.

Durante el proceso de coagulación, el arsénico puede ser removido del agua a través de tres mecanismos principales (Edwards, M., 1994.).

- **Adsorción:** sorción del arsénico disuelto en la superficie del hidróxido metálico insoluble.

- **Precipitación:** formación de compuestos arsenicales insolubles de Al o Fe ( $\text{AlAsO}_4$  o  $\text{FeAsO}_4$ ).
- **Oclusión:** atrapamiento del arsénico adsorbido en el interior de los hidróxidos metálicos en formación.

Las especies de arsénico son removidas, principalmente, por mecanismos de adsorción y/o oclusión en los hidróxidos formados. La precipitación en fases sólidas, con el arsénico como un ion constituyente de estas fases sólidas, sólo podría ocurrir si se excediera el producto de solubilidad del sólido, lo cual es poco probable a bajas concentraciones de arsénico (Amirtharajah, A. & O' Melia, C. R., 1990).

#### **2. 2. 6. Aireación**

La aireación es el proceso mediante el cual el agua se pone en contacto íntimo con el aire para modificar las concentraciones de sustancias volátiles contenidas en ella. A continuación se resumen sus funciones más importantes:

- Transferencia de oxígeno disuelto
- Remoción de sustancias volátiles productoras de olores y sabores
- Remoción de dióxido de carbono
- Remoción de  $\text{H}_2\text{S}$
- Remoción de hierro y manganeso
- Remoción metano, cloro y amoníaco

- Remoción de compuestos orgánicos volátiles

### **2. 2. 7. Tecnologías convencionales de remoción de arsénico**

Las tecnologías de remoción de arsénico más comunes incluyen procesos que pueden usarse solos o en combinación, como oxidación, co-precipitación y adsorción sobre floculos coagulados, tratamiento con cal, adsorción en superficies adecuadas, uso de resinas de intercambio iónico y tecnologías de membrana (Newcombe & Möller, 2008; Ravenscroft, P., Brammer, H. & Richards, K., 2009; Sharma & Sohn, 2009). La mayoría de ellas son tecnologías confiables y bien entendidas para la eliminación de arsénico en plantas de tratamiento a gran y mediana escala para servicios centralizados.

#### **2. 2. 7. 1. Oxidación/reducción**

La oxidación es un paso previamente requerido para transformar especies de As (III) en especies de As (V) más fácilmente removibles. La aireación directa simple es lenta (Bissen y Frimmel, 2003), pero se pueden emplear varios productos químicos, incluidos cloro gaseoso, hipoclorito, ozono, permanganato, peróxido de hidrógeno, óxidos de manganeso y reactivo de Fenton  $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{Fe}^{+2}$  para acelerar la oxidación (Ahmed, M. F., 2002; Pirnie, M., 2000.).

### **2. 2. 7. 2. Precipitación**

Los métodos que aprovechan la insolubilidad de ciertos compuestos inorgánicos arsenicales como el sulfuro de As (III), el arseniato de calcio y el arseniato férrico pueden proponerse para eliminar As del agua. Al agregar sales de calcio, magnesio, manganeso (II) o hierro (III) a soluciones de As (V), se obtienen sólidos que contienen As que pueden eliminarse mediante sedimentación o filtración. Sin embargo, el método generalmente no es adecuado debido a la inestabilidad de la mayoría de los sólidos, también inadecuado para su eliminación directa, aunque puede utilizarse para paliar el problema en los sitios mineros donde esas sales están presentes de forma natural (Ladeira, A.C.Q., Ciminelli, V.S.T. & Nepomuceno, A.L., 2002).

### **2. 2. 7. 3. Coagulación y filtración**

La tecnología más común para la eliminación de arsénico es la coagulación y la filtración. El arsénico se elimina en forma pentavalente, que se adsorbe sobre los flóculos coagulados y luego puede eliminarse por filtración. El As (III) tiene que ser previamente oxidado, generalmente con cloro (Kartinen, E. O., Jr. & Martin, C. J., 1995). Los coagulantes más utilizados son el sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), el cloruro de hierro III ( $\text{FeCl}_3$ ) y el sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ ), siendo las sales de hierro en general mejores agentes de eliminación. El  $\text{FeCl}_3$  genera flóculos relativamente

grandes, mientras que los más pequeños se forman con  $\text{FeSO}_4$  (Edwards, 1994; Newcombe, R.L. & Möller, G., 2008; Pirnie, M., 2000; Ravenscroft et al., 2009). La filtración es un paso necesario. Sin filtración, la eliminación de arseniato es de alrededor del 30 %, pero con un filtro de 0,1 ó 1,0  $\mu\text{m}$ , la eliminación de arseniato mejora a más del 96 % (Chwirka, J., Colvin, C., Gómez, J. & Mueller, P., 2000; Madiec, H., Cepero, E. & Mozziconacci, D., 2000; Sancha, A., 1999, 2000). La tecnología de filtración de coagulación es simple, sólo se usan productos químicos comunes, los costos de instalación son pequeños y se puede aplicar fácilmente a grandes volúmenes de agua. Sin embargo, se forman volúmenes relativamente grandes de lodos que contienen As, que generalmente se eliminan en los vertederos y son una posible fuente de contaminación.

#### **2. 2. 7. 4. Ablandamiento con cal**

En presencia de agua y ácido carbónico, la cal forma carbonato de calcio y puede usarse para adsorber arsénico, y el proceso termina con un paso de coagulación. El método es eficiente para tratar aguas con alta dureza, especialmente a  $\text{pH} > 10,5$ . La adición de cloro para oxidar As (III) es necesaria. Las desventajas son: 1) un pH muy alto en el agua resultante (10-12), lo que implica una etapa adicional de acidificación; 2) se necesita una dosis muy alta de coagulante; 3) eficiencias de eliminación relativamente bajas (generalmente no menos de 1 mg/L), se requieren tratamientos

secundarios (Kartinen & Martin, 1995; Newcombe & Möller, 2008; Pirnie, M., 2000; Ravenscroft et al., 2009).

#### **2. 2. 7. 5. Adsorción**

Se pueden usar óxidos de aluminio (alúmina activada), óxido / hidróxidos de hierro, dióxido de titanio, óxido de cerio o metales reducidos como adsorbentes (Ravenscroft et al., 2009). La alúmina activada granular ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  /  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) es un óxido poroso disponible comercialmente, aplicado con éxito a pH ligeramente ácido (5-7), dando eficiencias superiores al 95 % para As (V) y As (III) (Pirnie, M., 2000). La tecnología es muy simple, no requiere adición de productos químicos y es útil a nivel comunitario o doméstico.

#### **2. 2. 7. 6. Procesos de membrana**

A partir de los posibles procesos de membrana, la microfiltración (MF) o ultrafiltración (UF), que utilizan membranas de baja presión (grandes tamaños de poro nominales con presiones 10-30 psi) no son completamente adecuadas porque las especies de arsénico son muy pequeñas y pueden atravesar las membranas. Por el contrario, la nanofiltración (NF) u ósmosis inversa (OI), utilizan membranas de alta presión, 75-250 psi o incluso más (Clifford, D., 1999; Pirnie, M., 2000). La filtración por ósmosis inversa (OI) y la nanofiltración (NF) son sistemas eficientes en la remoción de arsénico.

#### **2. 2. 7. 7. Resinas de intercambio iónico**

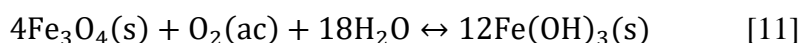
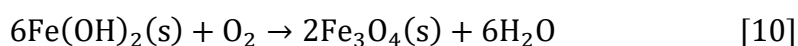
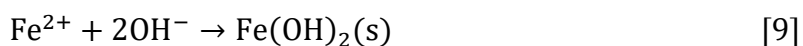
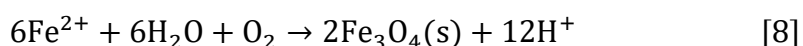
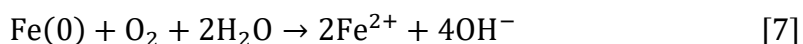
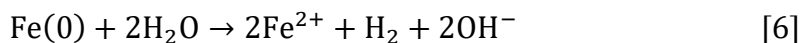
Las resinas de intercambio iónico, generalmente son de matriz polimérica (poliestireno reticulado con divinilbenceno), unidas a grupos funcionales cargados, pueden aplicarse para la eliminación de As; los grupos de amina cuaternaria,  $-N^+(CH_3)_3$ , son los grupos preferidos. La remoción de arseniato es eficiente, produciendo efluentes con menos de  $1 \mu\text{g/L}$  de arsénico, mientras que el arsenito, al no estar cargado, no se elimina, y es necesario un paso previo de oxidación (Pirnie, M., 2000; Ravenscroft et al., 2009).

#### **2. 2. 7. 8. Tecnologías basadas en el hierro metálico**

El hierro metálico es un material cada vez más usado para el tratamiento de diversos contaminantes, en particular los metales tóxicos. Es el componente principal de las barreras subsuperficiales reactivas permeables (PRBs), una alternativa económica consistente en un tratamiento pasivo in situ que degrada o inmoviliza los contaminantes a medida que el agua subterránea fluye a través de él. Las principales ventajas del hierro metálico incluyen su bajo costo, simplicidad en el manejo y escalabilidad. El método convierte el Cr (VI) en Cr (III) insoluble mediante un mecanismo reductivo, y se cree que este mecanismo también opera en el caso de otros metales como Ni, Pb, Cd, Zn y Cu (Leupin, O. X. & Hug, S.J., 2005). La remediación de

aguas contaminadas con As mediante esta tecnología emergente es un aspecto muy estudiado en los últimos tiempos.

En el caso de As (III) y As (V), la remoción por hierro metálico se debe principalmente a procesos de adsorción y coprecipitación sobre oxihidróxidos de hierro que se forman durante la oxidación del hierro metálico. (Lackovic J., Nikolaidis N. & Dobbs G., 2000). El mecanismo involucra en primer lugar la corrosión del Fe(0): la oxidación de hierro metálico en presencia de agua y oxígeno produce Fe (II) y posteriormente magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), hidróxido ferroso Fe(OH)<sub>2</sub> e hidróxido férrico (Fe(OH)<sub>3</sub>), dependiendo de las condiciones rédox y el pH:



A partir de aquí, se formarían complejos de As (III) y As (V) sobre los oxihidróxidos de Fe(II) y Fe(III) formados in situ.

### **2. 2. 8. Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano**

El acceso al agua potable es una necesidad primaria y por lo tanto un derecho humano fundamental, en este contexto era necesario actualizar el Reglamento de los requisitos Oficiales Físicos, Químicos y Bacteriológicos que deben reunir las aguas de bebida para ser consideradas potables, que por su antigüedad (1946), se hacía inaplicable; es entonces que en el año 2000, la Dirección General de Salud Ambiental, asume la tarea de elaborar el “Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano” el 26 de setiembre del 2010, a través del D.S. N° 031-2010-Salud Ambiental, ver tabla 2 y 3. (DIGESA, 2011).

**Tabla 2**

Límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica.

	<b>Parámetros</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
1	Olor	---	Aceptable
2	Sabor	---	Aceptable
3	Color	UCV escala Pt/Co	15
4	Turbiedad	UNT	5
5	pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
6	Conductividad (25°C)	µmho/cm	1 500
7	Sólidos totales disueltos	mg/L	1 000
8	Cloruros	mg Cl / L	250
9	Sulfatos	mg SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> /L	250
10	Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	500
11	Amoniaco	mg N /L	1,5
12	<b>Hierro</b>	<b>mg Fe /L</b>	<b>0,3</b>
13	Manganeso	mg Mn /L	0,4
14	Aluminio	mg Al /L	0,2
15	Cobre	mg Cu/L	2
16	Zinc	mg Zn/L	3
17	Sodio	mg Na/L	200

UCV = Unidad de color verdadero

UNT = Unidad nefelométrica de turbiedad

**Fuente:** DIGESA, 2011.

**Tabla 3**

Límites máximos permisibles de parámetros químicos inorgánicos.

<b>Parámetros Inorgánicos</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
1 Antimonio	mg Sb/L	0,02
2 <b>Arsénico (nota 1)</b>	<b>mg As/L</b>	<b>0,01</b>
3 Bario	mg Ba /L	0,7
4 Boro	mg B /L	1,5
5 Cadmio	mg Cd/L	0,003
6 Cianuro	mg CN <sup>-</sup> /L	0,07
7 Cloro (nota 2)	mg /L	5
8 Clorito	mg/L	0,7
9 Clorato	mg/L	0,7
10 Cromo total	mg Cr/L	0,05
11 Flúor	mg F <sup>-</sup> /L	1
12 Mercurio	mg Hg/L	0,001
13 Niquel	mg Ni/L	0,02
14 Nitratos	mg NO <sup>3</sup> /L	50
15 Nitritos	mg NO <sup>2</sup> /L <sup>-</sup>	3,00 Exposición corta
		0,20 Exposición larga
16 Plomo	mg Pb/L	0,01
17 Selenio	mg Se/L	0,01

**Nota 1:** En caso de los sistemas existentes se establecerá en los Planes de Adecuación Sanitaria el plazo para lograr el límite máximo permisible para el arsénico de 0,010 mg/L.

**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:** DIGESA, 2011.

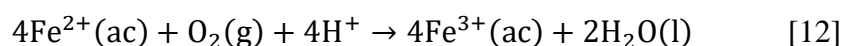
### 2. 3. Definición de términos

- **Arsénico**

El arsénico (As) es un elemento natural distribuido extensamente en la corteza de la Tierra. Su concentración en la superficie de la Tierra es de 1,5 a 2,0 mg /L, siendo principalmente 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. (Jones, 2007).

- **Hierro**

El hierro existe en disolución acuosa en el estado de oxidación ya sea +2 (ferroso) ó +3 (férico). En presencia de aire, en cambio, el  $\text{Fe}^{2+}(\text{ac})$  tiende a oxidarse a  $\text{Fe}^{3+}(\text{ac})$ .



- **Oxígeno disuelto**

Gas de baja solubilidad en el agua, requerido para la vida acuática aerobia. La solubilidad del oxígeno atmosférico en aguas dulces oscila entre 7 mg/L a 308,15 K y 14,6 mg/L a 273,15 K para presión de una atmósfera. La baja disponibilidad de oxígeno disuelto (OD) limita la capacidad autopurificadora de los cuerpos de agua y hace necesario el tratamiento de las aguas residuales para su disposición en ríos y embalses. La concentración de saturación de OD es función de la temperatura, de la presión atmosférica y de la salinidad del agua. (Romero, 2008).

- **pH**

El pH del agua a tratar juega un rol importante en la eficiencia del proceso de coagulación para la remoción de arsénico, al incidir en la especiación del elemento, en el aumento del número de sitios cargados positivamente de las partículas de oxihidróxidos de Fe(III) y de Al (III) y en la solubilidad de los hidróxidos formados. (Edwards, 1994).

- **Oxidación del arsénico**

Consiste en la conversión de Arsenito ( $As^{+3}$ ) en Arsenato ( $As^{+5}$ ), debido a que las tecnologías de remoción de arsénico son más eficientes para el arsenato, debido a que el arsenito no carga por debajo de un pH de 9,2. (Villalobos & Hidalgo, 2011). Puede llevarse a cabo mediante:

- Aireación simple
- Agentes oxidantes
- Radiación

- **Coagulación**

La coagulación es un paso de neutralización de carga que involucra el acondicionamiento de la materia suspendida, coloidal y disuelta al añadir coagulantes (Mihelcic, J.R. & Zimmerman J. B., 2012).

- **Floculación**

La floculación involucra la agregación de partículas desestabilizadas y la formación de partículas más grandes conocidas como flóculo (Mihelcic, J.R. & Zimmerman J. B., 2012).

- **Filtración**

En la mayoría de los casos, los coágulos que contienen arsénico sedimentan muy lentamente debido al tamaño fino. Por lo tanto, la sedimentación no es una forma efectiva de separar los coágulos del agua. Es necesario aplicar filtración para separar los coágulos del agua y así eliminar el arsénico del agua (Feenstra, L., Van Erkel, J. & Vasak, L., 2007). Los medios filtrantes (materiales porosos) utilizados en este paso podrían ser ropas, cauchos porosos, cerámicas y membranas porosas, etc

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3. 1. Tipo y diseño de la investigación**

Para definir donde se ubica el tipo de investigación la clasificaremos según el tipo de diseño.

- Es prospectivo.
- Es transversal.
- Es experimental.

El presente trabajo de investigación, está basado en pruebas experimentales donde existe una relación del tipo causa- efecto. Se analizó el efecto producido por la manipulación de tres factores ( $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ ); sobre dos factores de respuesta ( $y_1$  y  $y_2$ ). Para el análisis de datos se utilizó la metodología de superficie de respuesta con un diseño de Box-Behnken.

#### **3. 2. Población y muestra**

Se tomó muestras representativas del canal del rio Sama, cuya ubicación satelital es latitud  $17^{\circ}47'4.49''$  S y  $70^{\circ}30'8.02''$  O, ésta ubicación queda en la entrada a la planta de tratamiento de agua potable del pueblo de Sama Inclan.

La ubicación de la toma de muestra se muestra en la Figura 4:



**Figura 4.** Ubicación de punto de muestreo.

**Fuente:** Google earth Pro 2018.

### 3.3. Operacionalización de variables

Para la demostración y comprobación de la hipótesis formulada, se manipularon las variables, y de los indicadores de cada una de ellas, es así que a través de la relación causa – efecto, se evaluaron las variables dependientes (VD),

En la Tabla 4 se presentan la operacionalización de variables:

**Tabla 4**

Operacionalización de variables.

<b>Variables</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>
Remoción de Arsénico Total (VD)	Concentración de Arsénico	Análisis de arsénico total (mg/L)
Remoción de Hierro Total (VD)	Concentración de Hierro	Análisis de hierro total (mg/L)
Tiempo de remoción (VI)	Tiempo	Registro de tiempo de reacción (min)
Lana de acero (VI)	Masa de Hierro	Peso de la masa de lana de acero (g)
pH (VI)	Concentración de H <sup>+</sup>	Detección de pH

**Fuente:** Elaboración Propia.

**Donde:**

VD: variable dependiente.

VI: variable independiente.

### **3. 4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos**

#### **3. 4. 1. Instrumentos, equipos, materiales y reactivos**

##### **a) Equipos e instrumentos**

- 01 pH metro.
- 01 balanza analítica.
- 01 turbidímetro Hach 2 100p (2 100Q portable, rango 0-1 000 NTU).

- 01 equipo multiparametro 9310 IDS WTW (para oxígeno disuelto).
- 01 espectrofotómetro UV-visible doble haz. Marca Thermo Scientific, modelo Genesys 10S.
- 01 equipo aireador de pecera, de 0,8 a 3,2 L/min (ver anexo 01).

**b) Materiales**

- 12 vasos de precipitados de 100 mL.
- 12 vasos de precipitados de 1000 mL.
- 02 varillas de vidrio.
- 15 fioles de 25 ml.
- 15 matraces de 50 ml.
- 02 cocinas eléctricas.
- 06 pipetas.
- 04 pro pipetas.
- 01 balde de caucho de 12 L.
- 01 tubo de desagüe de 10 cm.

**c) Reactivos**

- 200 g lana de acero (ver anexo 2),
- 01 kit reactivos para determinar arsénico (test de Merck de comparación visual mediante varilla analítica en rango: 0,00–005 – 0,010 – 0,025 – 0,05 – 0,10 – 0,25 – 0,50 (mg/L) (ver anexo 3)).

- 50 g de 1,10 - fenantrolina.
- 250 g de acetato de amonio.
- 250 ml de ácido acético.
- 50 g de cloruro de hidroxilamina.
- 100 ml de ácido clorhídrico.
- 200 g de hidróxido de sodio.
- 10 L de agua destilada.
- papel filtro, tipo rápido.

#### **3. 4. 2. Técnicas de recolección de datos**

Las técnicas para la recolección de datos que se aplicó en la tesis, son específicas para cada momento de la investigación. Para procesamiento de datos se utilizó los softwares y paquetes estadísticos en sus versiones de prueba, como el Excel, minitab, diseño experto y statgraphics. Y para el análisis químico de las muestras se utilizaron las siguientes técnicas:

- NTP 214.003.87 Agua para consumo humano.
- Técnica AWWA APHA (1999) para determinación de hierro por espectrofotometría visible técnica de la fenantrolina 3500-Fe B (ver anexo 4).
- NTP 214.025:1990 Agua potable. Determinación del pH. Método potenciométrico.

- Calidad de agua muestro: Guía para la preservación y manejo de muestras Norma Técnica Peruana ISO 5667-3-2001.
- Nefelométrico para determinación turbidez método 2130B de los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales.

### 3. 5. Procesamiento y análisis de datos

La estrategia que se ha seguido para el análisis de datos, es utilizar la metodología de superficie de respuesta aplicando el diseño Box-Behnken. En la tabla 5 se muestra el arreglo experimental planteado.

**Tabla 5**

Arreglo experimental del diseño de Box-Behnken.

Nivel	Masa de Fe <sup>0</sup> (g)	Tiempo de contacto (min)	pH	Variables codificada		
				x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>
<b>Alto</b>	1,5	70	8,14	1	1	1
<b>Medio</b>	1	60	7,07	0	0	0
<b>Bajo</b>	0,5	50	6	-1	-1	-1

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 6**

Delineamiento estadístico del diseño de Box-Behnken.

N°	Variable de nivel codificado			Variable de nivel real			Respuesta	
	Masa (g)	Tiempo (min)	pH	Masa (g)	Tiempo (min)	pH	Arsénico	Hierro total
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>
1	-1	-1	0	0,5	50	7,07		
2	1	-1	0	1,5	50	7,07		
3	-1	1	0	0,5	70	7,07		
4	1	1	0	1,5	70	7,07		
5	-1	0	-1	0,5	60	6		
6	1	0	-1	1,5	60	6		
7	-1	0	1	0,5	60	8,14		
8	1	0	1	1,5	60	8,14		
9	0	-1	-1	1	50	6		
10	0	1	-1	1	70	6		
11	0	-1	1	1	50	8,14		
12	0	1	1	1	70	8,14		
13	0	0	0	1	60	7,07		
14	0	0	0	1	60	7,07		
15	0	0	0	1	60	7,07		

**Fuente:** Elaboración propia.

Para modelo estructural del diseño Box y Benhken donde:  $x_1$  masa en gramos (lana de acero),  $x_2$  el tiempo de contacto y  $x_3$  pH. La especificación del modelo es el siguiente:

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_3 * x_3 + \beta_4 * x_1 * x_2 + \beta_5 * x_1 * x_3 + \beta_6 * x_2 * x_3 + \beta_7 x_1^2 + \beta_8 * x_2^2 + \beta_9 * x_3^2 + \varepsilon \quad [13]$$

Para estimar la varianza se utilizara la tabla 7:

**Tabla 7**  
Análisis de varianza.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Regresión	SSR	k	MSR	MSR/MSE
Error o residual	SSE	n-k-1	MSE	
Total	SST	n-1		

**Fuente:** Rodríguez Ojeda, L., 2007; Navidi, W., 2006.

Donde:

$$\text{SSR: Suma de los cuadrados de la regresión: } SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

$$\text{SSE: Suma de los cuadrados del error: } SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$\text{SST: Suma total de los cuadrados: } SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Los estadísticos que utilizaremos en la regresión múltiple son:

Coficiente de determinación múltiple  $R^2$  y  $R^2$  ajustado.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad [14]$$

$$R_{ajustada}^2 = 1 - \frac{SSE/(n-p)}{SST/(n-1)} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p}\right) (1 - R^2) \quad [15]$$

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4. 1. Resultados de la matriz de superficie de respuesta diseño Box–Behnken para la remoción de arsénico y hierro total**

En la Tabla 8, se muestra el arreglo del diseño Box–Behnken, con las variables independientes (codificadas y sin codificar) y los resultados obtenidos de arsénico total y hierro total (variables dependientes), en el agua tratada (filtrada). En esta tabla también se incluyó los resultados en términos porcentaje de remoción de arsénico, tomando como base la concentración de las aguas de río Sama que es de 0,3 mg/L, y eso a su vez se corroboró con los datos de monitoreo de DIRESA del año 2017 (ver anexo 5).

**Tabla 8**

Matriz de diseño experimental, respuesta de arsénico, hierro total y porcentaje de remoción de arsénico.

N°	Variable de nivel codificado			Variable de nivel real			Respuesta		% de remoción de Arsénico total
	Masa (g)	Tiempo (min)	pH	Masa (g)	Tiempo (min)	pH	Arsénico total	Hierro total	
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	
1	-1	-1	0	0,5	50	7,07	0,025	0,08	91,67
2	1	-1	0	1,5	50	7,07	0,005	0,057	98,33
3	-1	1	0	0,5	70	7,07	0,01	0,031	96,67
4	1	1	0	1,5	70	7,07	0,005	0,049	98,33
5	-1	0	-1	0,5	60	6	0,005	0,026	98,33
6	1	0	-1	1,5	60	6	0,005	0,275	98,33
7	-1	0	1	0,5	60	8,14	0,025	0,03	91,67
8	1	0	1	1,5	60	8,14	0,005	0,057	98,33
9	0	-1	-1	1	50	6	0,005	0,185	98,33
10	0	1	-1	1	70	6	0,005	0,3	98,33
11	0	-1	1	1	50	8,14	0,05	0,107	83,33
12	0	1	1	1	70	8,14	0,01	0,022	96,67
13	0	0	0	1	60	7,07	0,005	0,081	98,33
14	0	0	0	1	60	7,07	0,005	0,009	98,33
15	0	0	0	1	60	7,07	0,01	0,037	96,67

**Fuente:** Elaboración propia

## 4. 2. Análisis estadístico para la remoción de arsénico

En la tabla 9 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para visualizar los efectos de los factores experimentales en la remoción de la variable respuesta As total; los resultados se han evaluado a partir del modelo de Regresión Múltiple donde  $x_2$  (tiempo de contacto),  $x_3$  (pH) y  $x_2*x_3$  (tiempo\*pH) son relevantes al 5 % de significancia (ver tabla 10). En la tabla 11 se observa el valor encontrando  $R^2$  0,9058, es decir que el 90,58 % de la variación de la remoción de arsénico está explicada por las variables independientes (masa, tiempo y pH) y  $R^2$  ajustado 0,7362.

Adicionalmente se observa que el valor F para el modelo es 5,341 lo que implica que el modelo es significativo.

**Tabla 9**

Análisis de varianza para la remoción de As.

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	Grados de Libertad (gl)	Suma de cuadrados medios (SCM)	Estadístico F
Debido a la regresión	0,002022917	9	0,0002247685	5,341034105
Debido a los residuales de error	0,0002104167	5	0,000042083333	
Total	0,0022333333	14		

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 10**Análisis respecto a la regresión para la remoción de As. <sup>2</sup>

Parámetro	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	$4,693 \times 10^{-3}$	0,00375	1,78	0,135
Masa (g)	$2,149 \times 10^{-2}$	0,00229	-2,45	0,0578
Tiempo (min)	$-2,080 \times 10^{-3}$	0,00229	-3,00	<b>0,0302</b>
pH	$1,442 \times 10^{-2}$	0,00229	3,82	<b>0,0124</b>
Masa <sup>2</sup> (g <sup>2</sup> )	$-5,833 \times 10^{-3}$	0,00338	-0,43	0,6838
Tiempo <sup>2</sup> (min <sup>2</sup> )	$6,042 \times 10^{-5}$	0,00338	1,79	0,1335
pH <sup>2</sup>	$4,185 \times 10^{-3}$	0,00338	1,42	0,215
Masa (g)xTiempo (min)	$7,500 \times 10^{-4}$	0,00324	1,16	0,2999
Masa (g)xpH	$-9,346 \times 10^{-3}$	0,00324	-1,54	0,1838
Tiempo (min)xpH	$-9,346 \times 10^{-4}$	0,00324	-3,08	<b>0,0274</b>

Fuente: Elaboración propia.

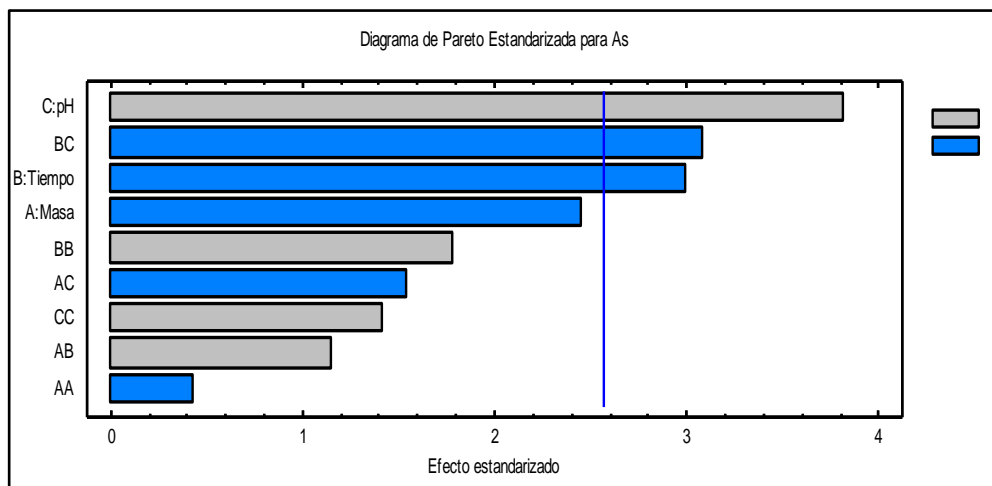
**Tabla 11**

Resumen de ajuste estadístico.

Estadística de regresión	
Coefficiente de determinación (R <sup>2</sup> )	0,9058
R <sup>2</sup> ajustado	0,7362
Observaciones	15

Fuente: Elaboración propia.

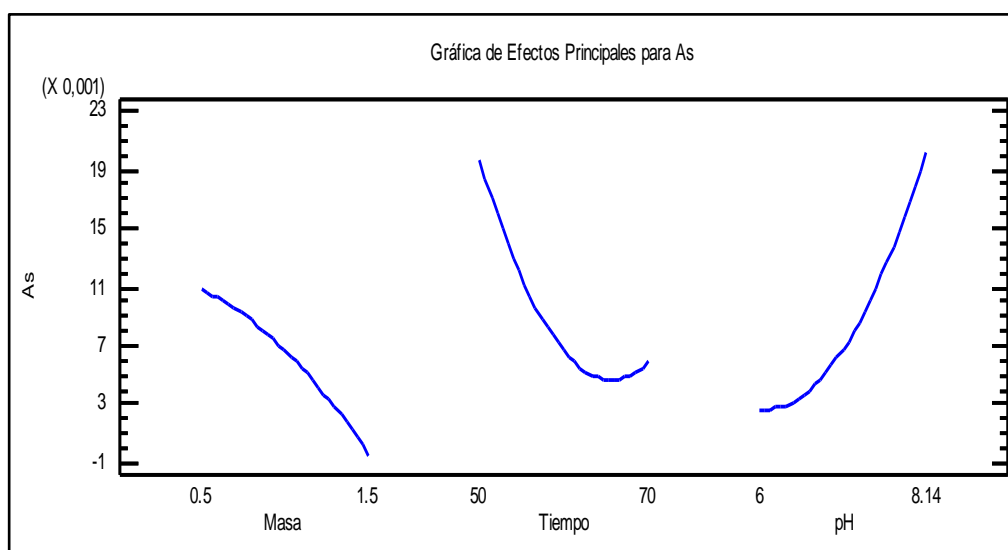
En la figura 5, se muestra los factores significativos y no significativos (Diagrama de Pareto Estandarizada para As).



**Figura 5 .** Diagrama de Pareto para la remoción de As.

**Fuente:** Elaboración propia con software stargraphics (versión demo).

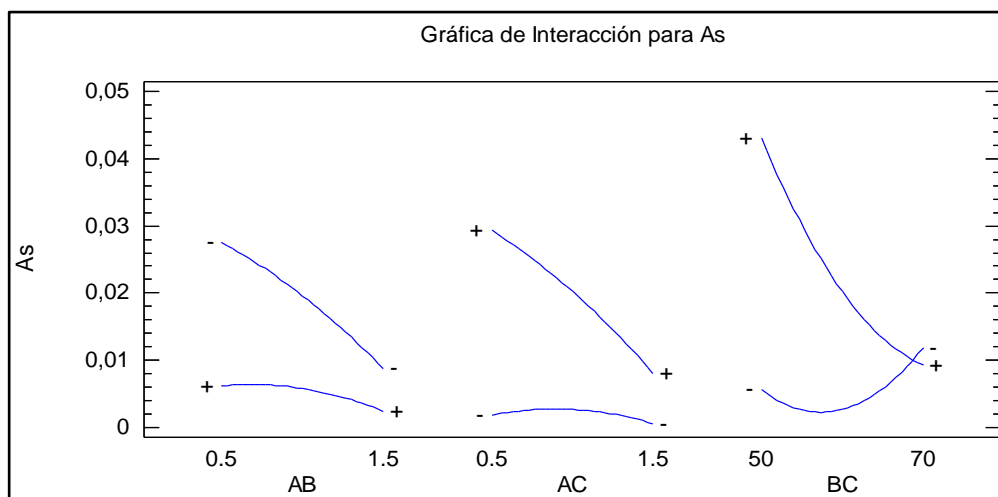
En la figura 6, se muestra el efecto de las principales variables con relación a la variable respuesta para el proceso de remoción de arsénico.



**Figura 6 .** Gráfica de efectos principales para As.

**Fuente:** Elaboración propia con software stargraphics (versión demo).

En la figura 7, de las interacciones, la más significativa es el tiempo pH.



**Figura 7 .** Gráfica de las interacciones para arsénico

**Fuente:** Elaboración propia con software stargraphics (versión demo).

### 4. 3. Desarrollo de la ecuación del modelo de regresión

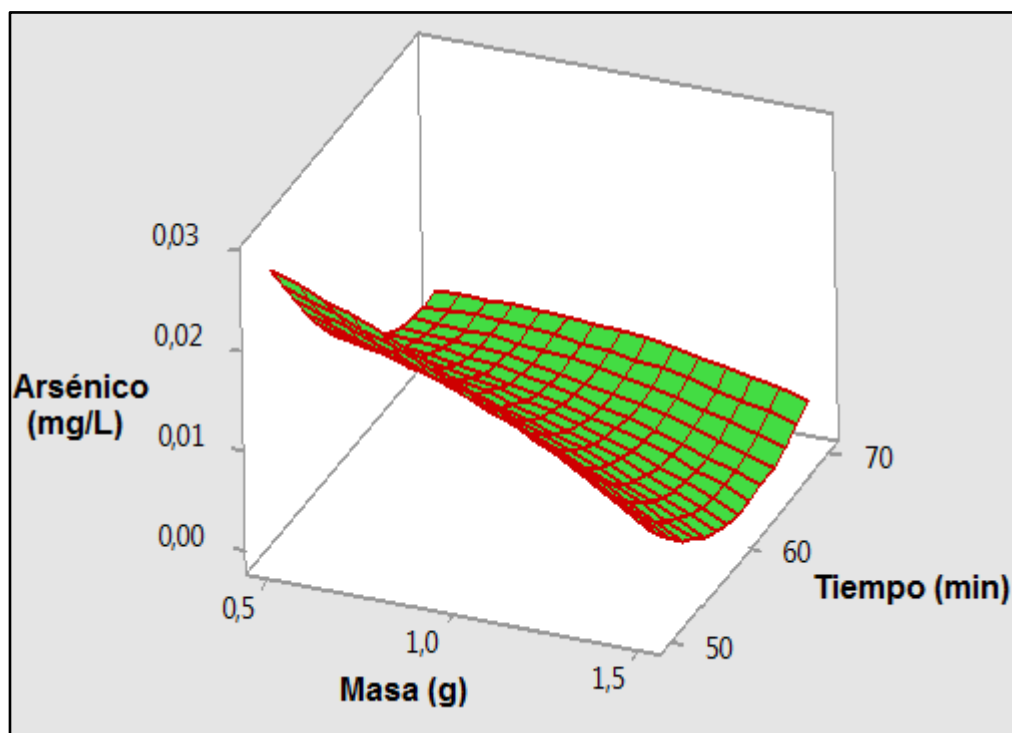
El diseño Box – Behnken se ha utilizado para desarrollar una correlación entre tres variables y la remoción de As total. El rango experimental y los niveles de variables independientes se han representado en la tabla 8. Con el diseño Box – Behnken se obtiene modelo cuadrático. El diseño de este experimento se muestra en la Tabla 8 junto con los resultados experimentales. El modelo empírico final en términos de factores codificados y el factor real para la remoción de arsénico ( $y_1$ ) se muestra en la ecuación (16) (ver anexo 6 de la desarrollo de la ecuación 16).

$$\begin{aligned}
 y_1 = & 4,693 \cdot 10^{-3} + 2,149 \cdot 10^{-2} x_1 - 2,080 \cdot 10^{-3} x_2 + 1,442 \cdot 10^{-2} x_3 + 7,500 \cdot 10^{-4} \\
 & x_1 x_2 - 9,346 \cdot 10^{-3} x_1 x_3 - 9,346 \cdot 10^{-4} x_2 x_3 - 5,833 \cdot 10^{-3} x_1^2 + 6,042 \cdot 10^{-5} x_2^2 \\
 & + 4,185 \cdot 10^{-3} x_3^2
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

#### **4. 4. Efecto combinado de las condiciones de operación sobre la remoción de arsénico**

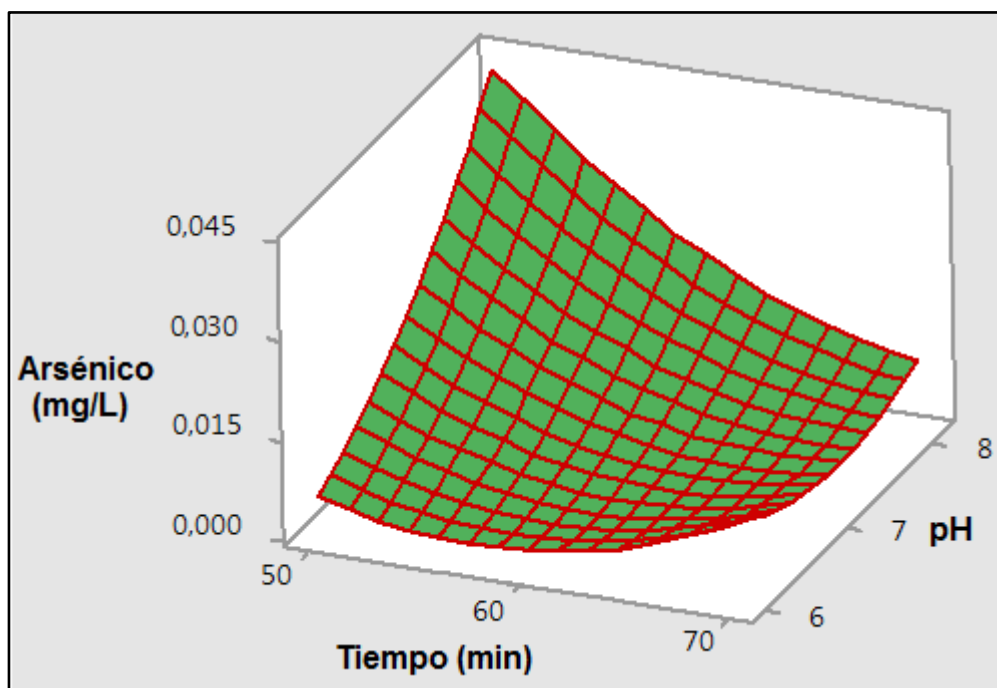
Para ver los efectos de los tres factores sobre la de remoción de arsénico, se utilizó la Metodología de la Superficie de Respuesta y se han construido gráficos tridimensionales. Estos gráficos se muestran en las Figuras N° 8, N° 9 y N° 10.

La figura 8 muestra la superficie de respuesta tridimensional que se han construido para mostrar las dos variables (masa y tiempo) en la remoción de As total a pH 7,07 constante. Se observa que en todo el rango de masa de hierro aplicado hay remoción de arsénico, también se observa que en todo el rango de tiempo hay remoción de As, pero obteniendo una remoción máxima con 1,5 g de masa de hierro y tiempos (50, 60 y 70 min).



**Figura 8.** Superficie de respuesta para la variable dependiente de arsénico total Vs las variables independientes masa de hierro y tiempo, manteniendo constante el pH a 7,07.

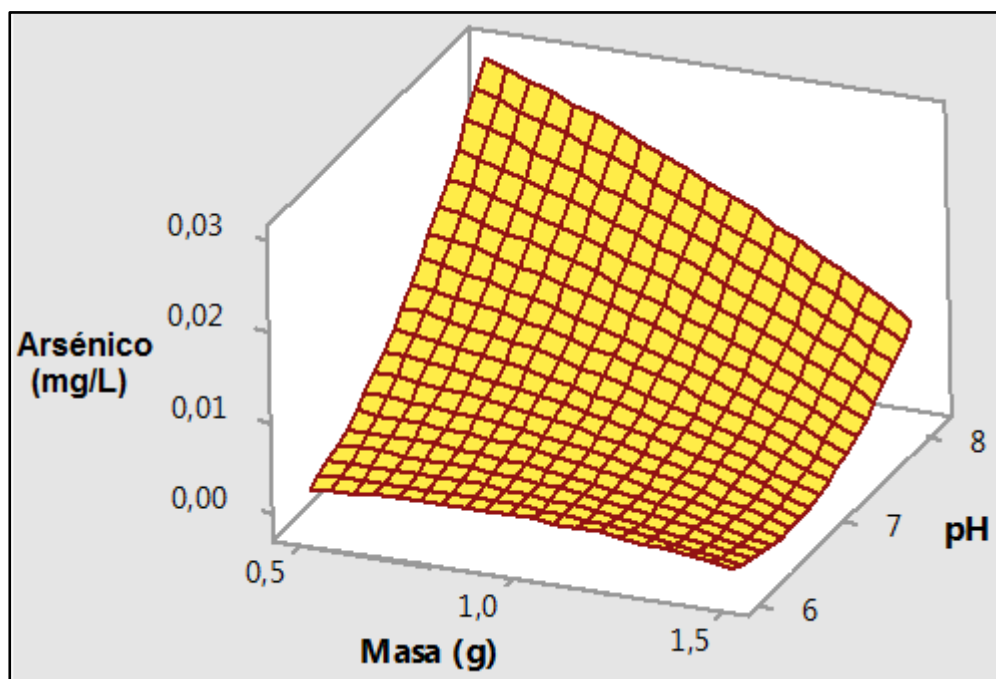
**Fuente:** Elaboración propia con software Minitab 17 versión demo.



**Figura 9.** Superficie de respuesta para la variable dependiente de arsénico total Vs las variables independientes tiempo de contacto y pH, manteniendo constante la masa 1g.

**Fuente:** Elaboración propia con software Minitab 17 versión demo.

La figura 9 muestra la superficie de respuesta tridimensional, del efecto combinado de tiempo y pH a masa de hierro constante de 1 g. Se observa que en todo el rango de tiempo existe remoción de As y también en el rango de pH, lográndose una remoción máxima en un tiempo de 70 min a pH 7.



**Figura 10.** Superficie de respuesta para la variable dependiente de arsénico total Vs las variables independientes masa de hierro y pH, manteniendo el tiempo de contacto 60 min.

**Fuente:** Elaboración propia con software Minitab 17 versión demo.

En la figura 10 se observa una alta remoción de As total en todo el rango de la masa de hierro a pH=6, también es posible observar que manteniendo 1,5 g de masa de hierro y pH=7 una mayor remoción de As total.

#### **4. 5. Determinación de las mejores condiciones de operación de masa, tiempo y pH en la remoción de arsénico**

A partir de la ecuación de la regresión múltiple (16) y aplicando el teorema o criterio de la segunda derivada (matriz Hessiana).

De las primeras derivadas parciales e igualar a 0 la ecuación (16) para hallar los puntos críticos (ver anexo 7):

Puntos críticos: (1,069; 47,55; 4,78).

Calculando los Hessiano (criterio de la segunda derivada) para estudiar si los puntos obtenidos son máximos, mínimos o puntos de silla (Malakhaltsev M. A., Arteaga B. J. R.).

Del criterio de la segunda derivada

Si  $H_1(f) > 0$ ,  $H_2(f) > 0$  y  $H_3(f) > 0$ , entonces  $f$  posee un mínimo local.

Si  $H_1(f) < 0$ ,  $H_2(f) > 0$  y  $H_3(f) < 0$ , entonces  $f$  posee un máximo local.

Si  $H_2(f) < 0$ , entonces  $f$  posee un punto de silla.

De las Hessianas  $H f(x_1, x_2, x_3)$ :

$$H_1(f) = -1,167 \times 10^{-2} < 0$$

$$H_2(f) = -1,972 \times 10^{-6} < 0$$

$$H_3(f) = -3,771 \times 10^{-9} < 0$$

Donde  $y_1 = f$ .

Al evaluar la  $f(x_1, x_2, x_3)$  alrededor de los puntos críticos (1,069; 47,55; 4,78), con el criterio de la segunda derivada o Hessianas pues no satisface el orden de los signos en la sucesión de los determinantes para que haya un extremo local (máximo

y mínimo), El hecho es que el punto crítico es un punto de silla multidimensional (ver anexo 6 de la resolución).

#### **4. 6. Análisis estadístico para la remoción de hierro**

De los resultados obtenidos de concentración de hierro total, que se muestran en la tabla 9, es posible observar que los 15 resultados del análisis hierro total están por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en el Reglamento de Agua para Consumo Humano D. S. 031 – 2010- Salud ambiental (ver tabla 2) y por lo tanto no es necesario realizar un análisis estadístico.

#### **4. 7. Discusión de resultados**

A partir de los datos estadísticos obtenidos podemos afirmar que el efecto del pH influye en la remoción de arsénico, otros autores confirman lo mencionado con otros estudios del efecto del pH sobre la remoción de especies de arsénico en sistemas batch como Bang, S., Johnson, M. D., Korfiatis, G. P. & Meng, X., 2005; Bang, S., Korfiatis, G.P. & Meng, X., 2005 y H. Sun (2006). Además el efecto del pH sobre la remoción de arsénico por los óxidos de hierro y los hidróxidos de hierro está bien establecido por Su C. y Puls R.W., 2001; Meng, X., Bang, S. y Korfiatis, G. P., 2000 & Y. Jia Y., Xu L., Z. Fang, & Demopoulos G.P., 2006. Por lo tanto también podemos afirmar que el efecto del pH es un factor importante para producción óxidos de hierro y los hidróxidos de hierro a partir de lana de acero con suministro continuo de aire, esta afirmación son corroborados con otros estudios de

Su C. & Puls R.W., 2001; Meng, X., Bang, S. & Korfiatis, G. P., 2000 y Jia Y., Xu L., Z. Fang, & Demopoulos G.P., 2006. Vale la pena enfatizar que estos resultados son importantes desde un punto de vista tecnológico, ya que las tasas de corrosión del hierro dependen fuertemente del pH para la remoción de As.

El efecto de tiempo de contacto con el hierro es también significativa lo cual también es afirmado, según Su C. & Puls R.W., 2001, el tiempo de reacción es importante por la formación de óxidos de fierro, para la remoción de arsénico.

Otro de los factores importantes (significativo) es la interacción pH y tiempo, es posible indicar que a menor pH y menor tiempo hay mayor remoción de arsénico, esto es debido a la rapidez corrosión del hierro, caso contrario mientras a mayor pH la corrosión del hierro es menor por lo cual se necesita mayores tiempos para la corrosión del hierro.

#### **4. 8. Propuesta de diseño del reactor**

Para la propuesta del diseño de un reactor de 10 Litros, son considerados los factores significativos en las condiciones de mayor remoción considerando el pH natural de la fuente de agua analizada; con el fin de reducir al máximo errores de operación por parte de los usuarios y porque los ácidos son insumos controlados por el Decreto Supremo N° 348-2015-EF. Los factores propuestos (condiciones de operación) son: masa de lana de acero igual a 15 g, tiempo de contacto de 70 minutos, pH natural de 8,14 y un caudal de aireación constante de 10 L/min.

#### 4. 8. 1. Cálculo del volumen del tanque (reactor)

Para el volumen de un tanque (reactor) de forma cilíndrica el cálculo se realiza multiplicando el área de la base por la altura del reactor  $V_{T1}=A_{T1} \times H_{T1}$ , (Spellman, F. R., 2003).

$$V_{T1} = \frac{\pi * (D_{T1})^2}{4} * H_{T1} \quad [17]$$

Para el escalamiento del tanque (reactor) de Kayode Coker A., 2012., la relación de escala R es:

$$R = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\pi \times (D_{T2})^3 / 4}{\pi \times (D_{T1})^3 / 4} = \frac{D_{T2}^3}{D_{T1}^3} \quad [18]$$

$$R = \frac{D_{T2}}{D_{T1}} = \left( \frac{V_{T2}}{V_{T1}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [19]$$

$$H_{T2} = R \times H_{T1} \quad [20]$$

$$D_{T2} = R \times D_{T1} \quad [21]$$

Para el volumen de tanque (reactor), en la remoción de arsénico se tiene:

$$H_{T1} = 14 \text{ cm.}$$

$$D_{T1} = 10,5 \text{ cm.}$$

$$V_{T1} = \frac{\pi \times (10,5)^2}{4} \times 14$$

$$V_{T1} = 1212,260 \text{ cm}^3 = 1,2123 \text{ L.}$$

Para volumen del soporte (S) de la masa de hierro, de:

$$H_{S1} = 7 \text{ cm.}$$

$$D_{S1} = 5 \text{ cm.}$$

$$V_{S1} = \frac{\pi \times (5)^2}{4} \times 7$$

$$V_{S1} = 137,44 \text{ cm}^3 = 0,137 \text{ L.}$$

De la propuesta de aumentar el volumen el tanque a 10 veces el volumen original, donde:

$$V_{T2} = 10 \times V_{T1}$$

$$V_{T2} = 10 \times 1212,260 \text{ cm}^3 = 12\,122,620 \text{ cm}^3 = 12,123 \text{ L.}$$

$$R = (10)^{1/3} = 2,154$$

$$D_{T2} = 2,154 \times 10,5 \text{ cm} = 22,620 \text{ cm.}$$

$$H_{T2} = 2,154 \times 14 \text{ cm} = 30,162 \text{ cm.}$$

Para volumen del soporte (S) de la masa de hierro aumentado a 10 veces el volumen,  $V_{S2} = 10 \times V_{S1}$

$$V_{S2} = 10 \times 137,44 \text{ cm}^3 = 1374,44 \text{ cm}^3 = 1,374 \text{ L.}$$

$$R = (10)^{1/3} = 2,154$$

$$D_{S2} = 2,154 \times 5 \text{ cm} = 10,772 \text{ cm.}$$

$$H_{S1} = 2,154 \times 7 \text{ cm} = 15,081 \text{ cm.}$$

#### 4. 8. 2. Cálculo de la eficiencia del aireador a condiciones estándar

Calculo del coeficiente de transferencia de gas  $K_{La(T)}$ , para la concentración de saturación de OD a 27,7 °C y 1 atm es de 7,692 mg/L y la concentración de saturación de OD corregido a la altitud de la ciudad de Tacna (562 msnm) es de:

$$C_{S(T,A)} = C_{S(T,0)} \times \left(1 - \frac{A}{9450}\right) \quad [22]$$

$$C_{S(T,A)} = 7,235 \text{ mg/L}$$

Donde:

- $C_{S(T, A)} = C_S$  = concentración de saturación de oxígeno a la temperatura y altitud correspondiente, mg/L (Romero Rojas J. A., 2008).
- A : altitud en msnm
- T: temperatura °C.
- $C_{S(T,0)}$ : Concentración de saturación de OD para la temperatura T y 0 msnm.
- OD: Oxígeno disuelto.
- C: concentración de gas en la fase líquida para el tiempo t, mg/L.

Para el valor  $K_{La(27,7\text{ }^{\circ}\text{C})}$  utilizaremos la ecuación (23) (Metcalf & Eddy, 2003) y regresión lineal.

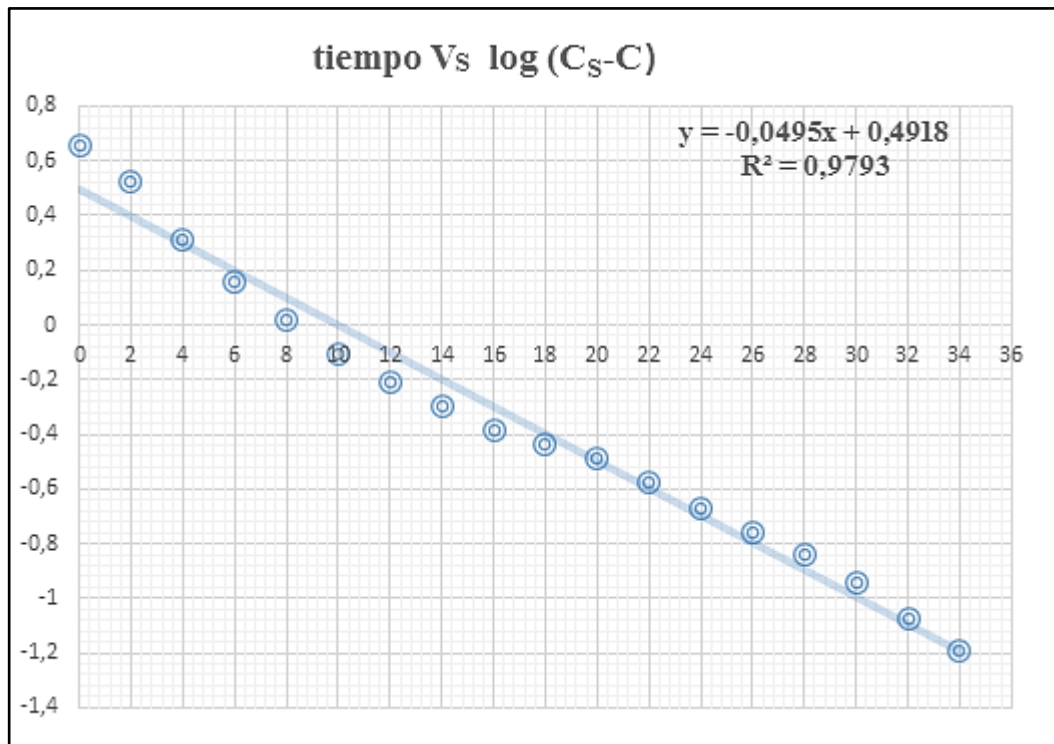
$$\log(C_s - C) = \log(C_s - C_0) - \frac{K_{La}}{2,303}xt \quad [23]$$

**Tabla 12:** Recopilación de datos de OD, (C<sub>s</sub>-C) y log (C<sub>s</sub>-C).

<b>Tiempo de aireación t (min)</b>	<b>OD (C) mg/L</b>	<b>(C<sub>s</sub>-C)</b>	<b>log (C<sub>s</sub>-C)</b>
0	2,71	4,5245	0,655570593
2	3,88	3,3545	0,525627796
4	5,19	2,0445	0,310587115
6	5,8	1,4345	0,156700553
8	6,19	1,0445	0,018908444
10	6,45	0,7845	-0,105407052
12	6,62	0,6145	-0,211478113
14	6,73	0,5045	-0,297138829
16	6,82	0,4145	-0,382475465
18	6,87	0,3645	-0,438302467
20	6,91	0,3245	-0,488785299
22	6,97	0,2645	-0,577574324
24	7,02	0,2145	-0,668572703
26	7,06	0,1745	-0,758204569
28	7,09	0,1445	-0,840132153
30	7,12	0,1145	-0,941194513
32	7,15	0,0845	-1,073143291
34	7,17	0,0645	-1,190440285
36	7,19	0,0445	-1,351639989
38	7,22	0,0145	-1,838631998
40	7,23	0,0045	-2,346787486

**Fuente:** Elaboración propia.

Graficando t Vs log (C<sub>s</sub>-C):



**Figura 11.** Tiempo Vs (C<sub>s</sub>- C)

**Fuente:** Elaboración propia.

De la regresión:

$$Y = 0,4918 - 0,0495X$$

Entonces:

$$K_L a_{(27,7)} = 2,303 \times 0,0495 = \frac{0,1139985}{\text{min}} = \frac{6,83991}{h} = \frac{6,840}{h}$$

Calculo del valor de  $K_{La}$ , en condiciones estándar de 20 °C con la ecuación

24:

$$K_{La(T)} = K_{La(20)} \theta^{T-20} \quad [24]$$

$$K_{La(20)} = K_{La(T)} / \theta^{(T-20)}$$

$$K_{La(20)} = 6,840 / (1,020)^{(27,7-20)}$$

$$K_{La(20)} = 5,873/h$$

Donde:

$\theta = 1,020$  para sistemas de burbuja (Romero Rojas J. A., 2008).

$K_{La}(T)$  = coeficiente de transferencia del gas a T °C .

$K_{La}(20)$  = coeficiente de transferencia del gas a 20 °C.

Calculo de la tasa de transferencia oxígeno estándar para el equipo de aireación, utilizando la ecuación 25 de Lawson, T. B., 2002. A condiciones estándar la  $C_{S20}$  es 9,08 mg/L (por tablas) y volumen de 1 L. se tiene:

$$N = \text{SOTR} = K_{La(20)} \times C_{S20} * V \quad [25]$$

$$N = \frac{5,873}{h} \times \frac{9,08 \text{mg}}{L} * 1L$$

$$N = 5,332 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg O}_2}{h}$$

Donde:

$$N=SOTR$$

N: Tasa de transferencia oxígeno estándar.

Calculo de la eficiencia del aireador estándar (SAE), utilizaremos la ecuación 26 de Lawson, T. B., 2002, donde la potencia del aireador es 1,3 W.

$$SAE = \frac{N}{\text{Potencia consumida}} \quad [26]$$

$$SAE = \frac{5,332 * 10^{-5} \text{ Kg O}_2}{1,3} \times \frac{\text{W * h}}{\text{W * h}}$$

$$SAE = 4,102 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg O}_2}{\text{W * h}}$$

Para la propuesta, se calcula la nueva tasa de transferencia oxígeno estándar y la eficiencia del aireador estándar (SAE), se utiliza las ecuaciones (25 y 26), para volumen de 10 L y potencia de consumo de 6,75 W. A condiciones estándar de 20 °C, 1 atm la  $C_{S20}$  es 9,08 mg/L (por tablas). Se tiene:

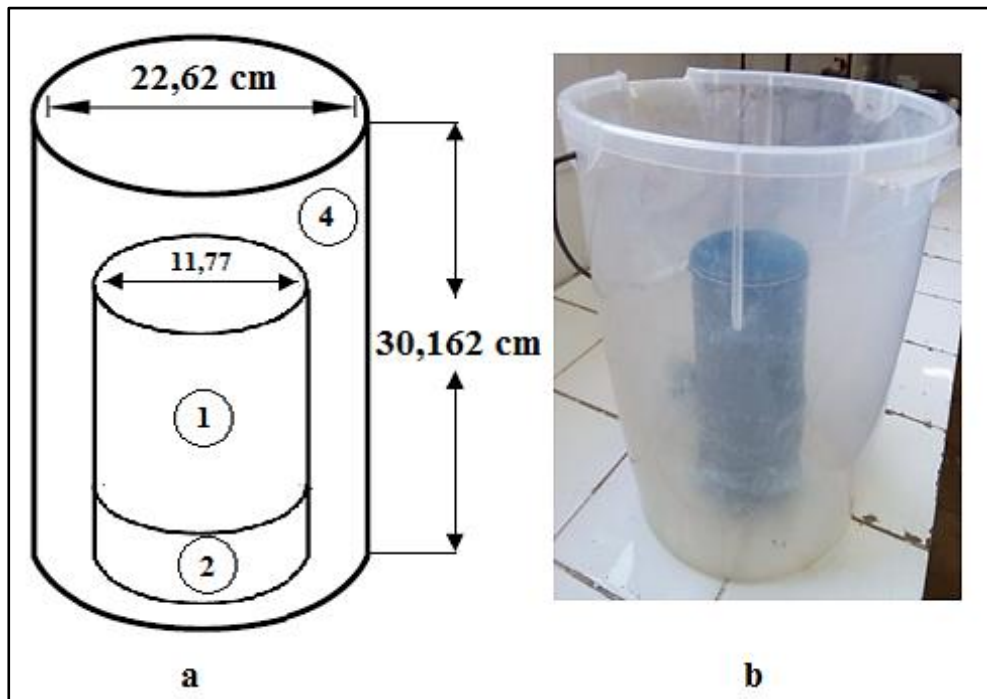
$$N = \frac{5,873}{h} \times \frac{9,08 \text{mg}}{L} \times 10 \text{L}$$

$$N = 5,332 \times 10^{-4} \frac{\text{Kg O}_2}{h}$$

$$SAE = \frac{5,332 * 10^{-4} \text{ Kg O}_2}{6,5} \times \frac{\text{W * h}}{\text{W * h}}$$

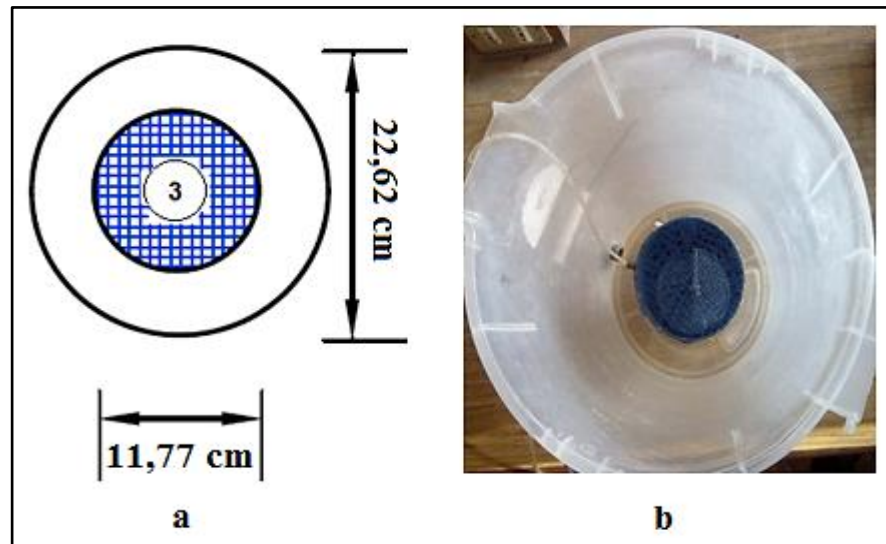
$$SAE = 7,8997 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg O}_2}{\text{W * h}}$$

#### 4. 8. 3. Dimensionamiento del tanque (reactor)



**Figura 12.** a.- Diseño del tanque para 10 L, b.- Imagen del tanque para 10 L.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 13.** a.- Vista superior del tanque (reactor), b.- vista superior del tanque (reactor).

**Fuente:** Elaboración propia.

Donde:

1. - Soporte de la masa de hierro.
2. - Entrada de aireación.
3. - La malla de soporte para la masa de hierro.
4. - Tanque (reactor).

## CONCLUSIONES

Se logró la evaluación de los factores pH, tiempo de contacto y masa lana de acero complementado con aireación, logrando remover la concentración de arsénico de 0.3 mg/L a 0,005 mg/L, que está por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la normativa nacional e internacional de 0,01 mg/L. Permitiendo el diseño de un reactor a nivel domiciliario.

El análisis de varianza realizado, los factores que influyen significativamente en la remoción de arsénico en el agua destinada para consumo humano del distrito de Sama Inclán, son pH, tiempo de contacto y la interacción tiempo con pH; siendo el de mayor significancia el pH con 0,0124.

De los resultados de la tabla 8 obtenidos en la remoción de arsénico en el agua del río Sama mediante la técnica utilizada, se demuestran una eficiencia de remoción de 98,33 % como máximo y 83,33 % como mínimo.

De los resultados obtenidos a escala laboratorio, se realizó el diseño del reactor batch, escalando de 1 L a un volumen de 10 litros, de tal manera que el agua tratada cumplirá con los límites máximos permisibles para arsénico.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar la construcción del equipo propuesto (Equipo piloto) y la instalación con fines de prueba de remoción de arsénico en el distrito de Sama Inclán.

Los desechos generados deben ser adecuadamente manejados bajo un sistema de gestión de residuos peligrosos que deberá implementarse en la municipalidad del distrito de Sama Inclán

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed M. F., (2002). “International workshop on arsenic mitigation in Bangladesh, water supply options, alternative water supply options for arsenic affected areas of Bangladesh”. Dhaka, 14–16 Jan, [http://www.physics.harvard.edu/~wilson/arsenic/conferences/Feroze\\_Ahmed/Sec\\_3.htm](http://www.physics.harvard.edu/~wilson/arsenic/conferences/Feroze_Ahmed/Sec_3.htm).
- Amirtharajah, A. & O’ Melia, C. R., (1990). “Coagulation processes: Destabilization, mixing and flocculation”. En: F.W. Pontius (ed): Water Quality and Treatment. McGraw-Hill, 4th ed., Nueva York, N.Y., EE .UU. págs. 269-365.
- APHA, AWWA and WPCF, (1999). “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”. 20th Edition, American Public Health Association, Washington DC.
- Bang S., Johnson M. D., Korfiatis G. P. & Meng X., (2005). “Chemical reactions between arsenic and zero-valent iron in water”, Water Res. 39 pag. 763–770.
- Bang S., Korfiatis G.P. & Meng X., (2005). “Removal of arsenic from water by zero-valent iron”, J. Hazard. Mater. 121 pag. 61–67.
- Bardal & Einar, (2004). “Corrosion and Protection”. Springer.

- Bissen, M. & Frimmel, F.H., (2003). "Arsenic – a review. Part II: Oxidation of arsenic and its removal in water treatment". *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 31, 97–107.
- Bundschuh J. et al., (2012). "One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries". *Science of the Total Environment* 429, 2-35.
- Bundschuh, J. et al., (2009). "Natural Arsenic in Groundwater in Latin America". CRC Press/Balkema. Taylor & Francis Group, London, United Kingdom.
- Castro de Esparza, M. L., (2006). "The presence of arsenic in drinking water in Latin America and its effect in public health. International Congress". *Natural Arsenic in Groundwater of Latin America*. Mexico City, 20-24 June 2006.
- Chávez, M., (2009). "Evaluación de dos técnicas analíticas para la especiación de arsénico en aguas superficiales del sur del Perú". *Revista peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*. 26(1): 20-26. Lima, Perú.
- Chwirka, J., Colvin, C., Gómez, J. & Mueller, P., (2000). "Arsenic removal from drinking water using the coagulation/microfiltration processes". *Journal of American Water Works Association*, 96 (3), 106–114.
- Clifford, D., (1999). "In Water Quality and Treatment". Ed. by A. Letterman (AWWA, McGraw Hill, New York). Chapter 9.
- Cullen, W. R. & Reimer, K. J., (1989). "Arsenic speciation in the environment". *Chemical Reviews*. Vol. 89 (4): pág. 713-764. Canada.

- DIGESA, (2011). “Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano”.  
J.B. GRAFIC, 1ra. Edición. Lima – Perú.
- Du Q., Zhou L., Zhang., Pan B., Ly L., Zhang W. & Zhang Q., (2014). “Oxidación del arsénico (III) por oxígeno y el peróxido de hidrógeno con intervención del hierro: comparación de dispersión y soporte en resina el hierro metalico”. Elsevier, *Journal of Colloid and Interface Science*. 428, 179–184.
- Edwards, M., (1994). “Chemistry of arsenic removal during coagulation and Fe-Mn oxidation”. *J. Am. Water Works Assoc.*, 86, págs. 64-78.
- Feenstra, L., van Erkel, J. & Vasak, L., (2007). “Arsenic in groundwater: Overview and evaluation of removal methods”. Utrecht: *Int. Groundwater Res. Assess. Centre*, 2–23.
- Ferguson, J. F., & Galvis J., (1972). “A revied of arsenic cycle in natural waters”. *Water Resourcer*, 6: 1259 -1274.
- Hall, A. (2002). “Chronic arsenic poisoning. *Toxicology Letters*”, 128, pp. 69–72.
- Hopenhayn, R. C., Browning, S., Hertz, P. I., Ferreccio, C., Peralta, C. & Gibb, H., (2000). “Chronic arsenic exposure and risk of infant mortality in two areas of Chile”. *Environ. Health Perspect.* 108 (7): 2000, pp. 667–673.
- Jia, Y., Xu L., Z. Fang, & Demopoulos G. P., (2006). “Observation of surface precipitation of arsenate on ferrihydrite”, *Environ. Sci. Technol.* 40 pag. 3248–3253.
- Jones, F. T., (2007). “A broad view of arsenic”. *Poult Sci*, Vol 86 N° 1 pp. 2-14.

- Kartinen, E. O., Jr. & Martin, C. J., (1995). "An overview of arsenic removal processes". *Desalination*, 103, 79–88.
- Kavitha, C., Malarvizhi, A., Kumaran, S. S. & Ramech, M., (2010). "Toxicological effects of arsenate exposure on hematological, biochemical and liver transaminases activity in an Indian major carp, Catlacatla. *Food Chem. Toxicol.* 48, 2848-2854.
- Kayode Coker A., (2012). "Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Design". Gulf Publishing. United States of America.
- Lackovic J., Nikolaidis N. & Dobbs G., (2000). "Inorganic arsenic removal by zero-valent iron", *Environ. Eng. Sci.* 17 (1). 29–39.
- Ladeira, A. C. Q., Ciminelli, V.S.T. & Nepomuceno, A.L., (2002). "Soil selection for arsenic immobilization (in Portuguese)". *REM*, 55, 215–221.
- Lawson, T. B., (2002). "Fundamentals of Aquacultural Engineering". Chapman & Hall. Second Printing, USA.
- Letterman, R. D., (2002). "Calidad y tratamiento del agua". Manual de suministros de agua comunitaria. McGraw Hill (ed). American Water Works Association. Madrid, España.
- Leupin, O. X. & Hug, S.J., (2005). "Oxidation and removal of arsenic (III) from aerated groundwater by filtration through sand and zero-valent iron". *Water Res.* 39, págs. 1729-1740.

- Madiec, H., Cepero, E. & Mozziconacci, D., (2000). "Treatment of arsenic by filter coagulation: a South American advanced technology". *International Water Association, Water Supply*, 18, 613–618.
- Malakhaltsev, M. A. y Arteaga, B. J. R., (2003). "Cálculo vectorial". Cengage Learning Editores. Bogotá.
- Meng, X., Bang S. & Korfiatis, G. P., (2000). "Effect of silicate, sulfate and carbonate on arsenic removal by ferric chloride", *Water Res.* 34 pag. 1255–1261.
- Metcalf & Eddy, (2003). "Wasterwater Engineering Treatment and Reuse". Mc Graw Hill. Fourth edition.
- Mihelcic, J.R. y Zimmerman J. B., (2012). *Ingeniería ambiental: Fundamentos, Sustentabilidad. Diseño.* Editorial Alfaomega primera edición, Mexico.
- Navidi, W., (2006). "Estadística para ingenieros y científicos" McGraw-Hill Companies, primera edición. México.
- Newcombe, R. L. & Möller, G., (2008). "Arsenic removal from drinking water: a review". Available from: <http://www.blueh2o.net/docs/asreview%20080305.pdf> [accessed July 2015].
- Nicolli, H. et. al., (1985). "Geoquímica del arsénico y de otros oligoelementos en aguas subterráneas en la llanura suroriental de la provincia de Córdoba, s/d". [www.bibliotecas.unc.edu.ar/cgi-bin/LibreoOPAC?accionbuscar&expresionARSENICO](http://www.bibliotecas.unc.edu.ar/cgi-bin/LibreoOPAC?accionbuscar&expresionARSENICO), p:112.

- Pierre, R. & Roberge, (2000). "Handbook of Corrosion Engineering". McGraw-Hill.
- Pirnie, M., (2000). "Technologies and costs for removal of arsenic from drinking water". US EPA Report 815-R-00-028.
- Pourbaix, M., (1966). "Atlas of electrochemical equilibrium in aqueous solutions". Pergamon Press, Oxford, Nueva York.
- Ravenscroft, P., Brammer, H. & Richards, K., (2009). "Arsenic pollution: a global synthesis". Wiley-Blackwell, Oxford, UK.
- Rivera Huerta M. L. y Piña S. M., (2005). "Tratamiento de agua para remoción de arsénico mediante adsorción sobre zeolita natural acondicionada". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Romero Rojas J. A., (2008). "Tratamiento de Aguas Residuales", Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Tercera edición, segunda reimpresión.
- Rodríguez Ojeda, L., (2007). "Probabilidad y estadística básica para ingenieros". Instituto de ciencias matemáticas. Ecuador.
- Sancha, A.M., Fuentealba, C. and Campos, C., (2004.). "Assessing arsenic removal technologies for drinking water production: the Chilean experience". In: A.M. Sancha (ed): Tercer Seminario Internacional sobre Evaluación y Manejo de las Fuentes de Agua de Bebida contaminadas con Arsénico (proceedings available as CD), Universidad de Chile, November 08-11, 2004, Santiago de Chile, Chile.

- Sancha, A., (2000). "Removal of arsenic from drinking water supplies: Chile experience". *Water Supply*, 18, 621–625.
- Sancha, A., (1999). "Full-scale application of coagulation processes for Arsenic removal in Chile: a successful case study. In: Chappell, W., Abernathy, C., Calderon, R., (eds.) *Arsenic exposure and health effects*". Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. pp. 373–378.
- Sharma, V.K. y Sohn, M., (2009). "Aquatic arsenic: Toxicity, speciation, transformation, and remediation". *Environ. Jnt.* 35, 743-759.
- Spellman, F. R., (2003). "Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations". LEWIS PUBLISHERS. Vol II. London New York Washington, D.C.
- Su, C. & Puls, R.W., 2001. "Arsenate and arsenite removal by zero valent iron: kinetics, redox transformation and implications for in situ groundwater remediation", *Environ. Sci. Technol.* 35 1487–1492. U.S Oklahoma.
- Sun, H., Wang, L., Zhang R., Sui, J. & Xu, G., (2006). "Treatment of groundwater polluted by arsenic compounds by zero valent iron", *J. Hazard. Mater.* B129 pag. 297–303.
- Triszcz Juan M., Chippano Luciana, Gordon Andrés, Porta Andrés y García Einschla Fernando, (2010). "Estudio de columnas reactivas para la remoción de arsénico mediante el empleo de la técnica zvi". *Cuadernos del Curiham*, Vol. 16, 43-48.

- Triszcz Juan M., Porta Andrés y García Einschlag Fernando S., (2009). " Efecto de las condiciones de operación en las tasas de corrosión del hierro en los sistemas de hierro metálico para la eliminación de arsénico ". Elsevier. *Chemical Engineering Journal*. 150, 431–439.
- Villalobos S. H. y Hidalgo M. J., (2011). " Informe: Arsénico en el Agua Potable". Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Costa Rica.
- Villena Chávez, J., (2006). Fuentes de agua y contaminación fisicoquímica en Simposio "El agua y la población: abastecimiento, contaminación y problemática del agua en el Perú". Academia Nacional de Medicina – Anales p. 49-56. Lima, Perú.

## ANEXOS

### Anexo 1: Bomba de aireación.

- Modelo #: S-4000 (Este modelo tiene la función ajustable).
- Voltaje: 220-240 V, 50/60Hz.
- Potencia: 9 W.
- 0.012MPa.
- Salida de gas: 4\*3,2 L/min.
- Dimensión: 206X149x96 mm.



**Figura 14.** bomba de aireación.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Anexo 2:** Lana de acero.

- Lana acero N° 0000 o Grado: 0000
- Abrasivos flexibles



**Figura 15.** Lana de acero.

**Fuente:** Elaboración propia.

### Anexo 3: Test de arsénico.

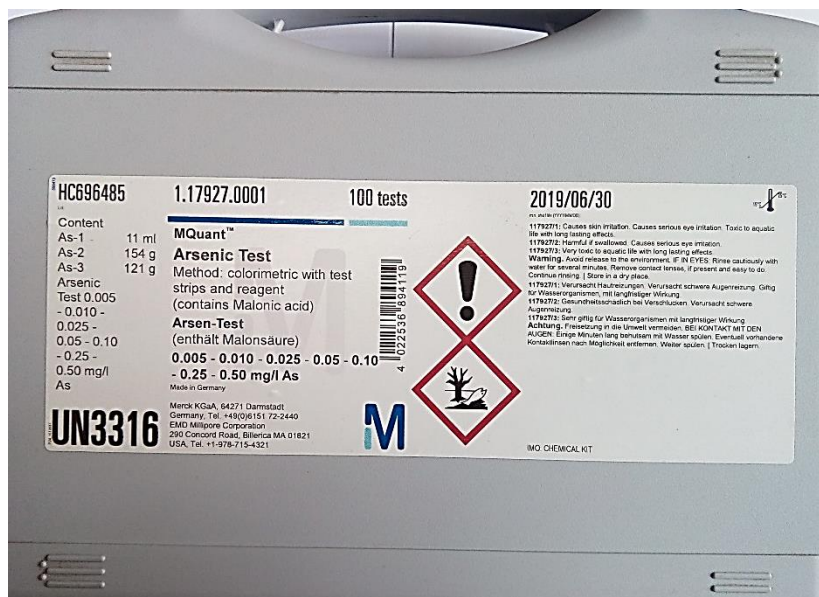


Figura 16. Test de arsénico.

Fuente: Elaboración propia.

## **Anexo 4:** 3500-Fe D. Método de fenantrolina

### **1. Discusión general**

a) *Principio:* Se disuelve el hierro, se reduce al estado ferroso por ebullición con ácido e hidroxilamina y se trata con 1,10-fenantrolina a pH de 3,2 a 3,3. El complejo rojo-naranja que se forma es un quelato de tres moléculas de fenantrolina por cada átomo de hierro ferroso. La solución coloreada obedece a la ley de Beer; su intensidad es independiente del pH entre 3 y 9. Un pH entre 2,9 y 3,5 asegura un rápido desarrollo del color en presencia de un exceso de fenantrolina. Los patrones del color son estables durante al menos 6 meses.

b) *Concentración mínima detectable:* Concentraciones de hierro disuelto o total tan bajas como 10 µg/l pueden determinarse con un espectrofotómetro provisto de células con un trayecto luminoso de 5 cm o más largo. Trátase un blanco con el procedimiento completo para la corrección.

### **2. Instrumental**

a) *Equipo calorimétrico:* Se necesita uno de los siguientes:

1) *Espectrofotómetro,* para utilizarlo a 510 nm, que proporciona un trayecto luminoso de 1 cm o más largo.

2) *Fotómetro de filtro,* que proporciona un trayecto luminoso de 1 cm o más largo y equipado con un filtro verde con una transmitancia máxima próxima a 510 nm.

3) *Tubos de Nessler,* emparejados, 100 ml, forma alargada.

b) *Material de vidrio lavado con ácido:* Lávese todo el material de vidrio con ácido clorhídrico conc. (HCl) y enjuáguese con agua destilada antes de utilizarlo, con objeto de eliminar depósitos de óxido de hierro.

c) *Embudos de separación:* 125 ml, forma Squibb, con espitas y tapones de vidrio o TFE.

### **3. Reactivos**

Utilícense reactivos bajos en hierro.

Para preparar las soluciones patrón y de los reactivos, empléese agua destilada libre de hierro. Almacénense los reactivos en botellas con tapón de vidrio. Las soluciones de HCl y acetato de amonio son estables indefinidamente si están herméticamente tapadas. Las soluciones de hidroxilamina, de fenantrolina y de hierro de reserva son estables durante varios meses. Las soluciones de hierro patrón no son estables; prepárense a diario según se necesiten, por dilución de la solución de reserva. Los patrones visuales en tubos de Nessler son estables durante varios meses si están bien cerrados y protegidos de la luz.

a) *Ácido clorhídrico,* HCl conc. con menos de 0.5 ppm de hierro.

b) *Solución de hidroxilamina:* Disuélvanse 10 g de NH<sub>2</sub>OH·HCl en 100 ml de agua.

c) *Solución tampón de acetato de amonio:* Disuélvanse 250 g de NH<sub>4</sub>C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub> en 150 ml de agua. Añádanse 700 ml de ácido acético conc. (Glacial).

Como incluso el NH<sub>4</sub>C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub> de buena calidad contiene una cantidad significativa de hierro, prepárense nuevos patrones de referencia con cada preparación del tampón.

d) *Solución de fenantrolina:* Disuélvanse 100 mg de monohidrato de 1,10-fenantrolina, C<sub>12</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O, en 100 ml de agua por agitación y calentamiento a 80 °C. No hervir. Descártese la solución si se oscurece. El calentamiento es innecesario si se añaden al agua dos gotas de HCl conc. (NOTA: Un mililitro de este reactivo es suficiente para no más de 100 µg Fe).

e) *Solución de hierro de reserva:*

Si se prefiere sulfato amónico ferroso, añádanse lentamente 20 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> conc. a 50 ml de agua y disuélvase 1,404 g de Fe(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O. Añádase permanganato potásico (KMnO<sub>4</sub>) 0,1N gota a gota hasta que persista un color rosa pálido. Dilúyase hasta 1.000 ml con agua y mézclese; 1,00 ml = 200 µg Fe.

f) *Soluciones de hierro patrón:* Prepárense diariamente para su uso.

1) Llévase con la pipeta 50,00 ml de solución de reserva a un matraz volumétrico de 1.000 ml y dilúyase con agua hasta la señal; 1,00 ml = 10,0 µg Fe.

2) Llévase con la pipeta 5,00 ml de solución de reserva a un matraz volumétrico de 1.000 ml y dilúyase con agua hasta la señal; 1,00 ml = 1,00 µg Fe.

#### 4. Procedimiento

a) *Hierro total:* Mézclese cuidadosamente la muestra y mézclense 50,0 ml en un Erlenmeyer de 125 ml. Si este volumen de muestra contiene más de 200 µg de hierro, utilícese una porción más pequeña medida con precisión y dilúyase hasta 50,0 ml. Añádanse 2 ml de HCl conc. y 1 ml de solución de NH<sub>2</sub>OH·HCl. Añádanse unas cuantas bolas de vidrio y caliéntese a ebullición. Para asegurar la disolución de todo el hierro, continúese la ebullición hasta que el volumen se reduzca a 15-20 ml. (Si la muestra ha sido sometida a combustión seca, disuélvase el residuo en 2 ml de HCl conc. y 5 ml de agua). Enfríese hasta temperatura ambiente y pásese a un matraz volumétrico de 50 o 100 ml o a un tubo de Nessler. Añádanse 10 ml de solución tampón de NH<sub>4</sub>C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub> y 4 ml de solución de fenantrolina y dilúyase con agua hasta la señal. Mézclese cuidadosamente y déjese al menos durante 10 a 15 minutos para que se desarrolle el color al máximo.

b) *Medida del color:* Prepárese una serie de patrones llevando con la pipeta volúmenes calculados con precisión de soluciones de hierro patrón (utilícese una solución más débil para medir porciones de 1 a 10 µg) a matraces erlenmeyer de 125 ml, diluyendo hasta 50 ml por adición de volúmenes medidos de agua y realizando los pasos indicados en el apartado 4a. Para comparación visual, prepárese una serie de 10 patrones por lo menos, cuyo contenido varié de 1 a 100 µg Fe en el volumen final de 100 ml. Compárense los colores en tubos de Nessler de 100 ml de forma alargada. Para la medida fotométrica, utilícese la tabla 3500-Fe: I como una guía aproximada para la selección del apropiado trayecto luminoso a 510 nm. Léanse los patrones frente a agua destilada fijada a absorbancia cero y trácese una curva de calibración, incluyendo un blanco.

#### 5. Cálculos

Cuando la muestra ha sido tratada según 4a:

$$\text{mg Fe/L} = \frac{\mu\text{g Fe (in 100 mL final volume)}}{\text{mL sample}}$$

Anótense los detalles de la toma de la muestra, almacenamiento y tratamiento previo, si son oportunos para la interpretación de los resultados.

**Anexo 5:** Informe de ensayo



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO No. LE - 080



**INFORME DE ENSAYO N.º 0562-2017-LM**

Pág. 1 de 3

Expediente N.º 50161-2017-DRS

**Solicitante:** AGU-DCOVI-DIGESA/DIRESA TACNA  
**Domicilio:** Las Amapolas 350 Lince, Lima  
**Muestra declarada:** Agua. Muestra proporcionada por el solicitante  
**Cantidad de muestras:** 8 frascos proporcionados por la DIRESA  
**Fecha de ingreso:** 2017-10-18  
**Lugar de ensayo:** Laboratorio sede La Molina

**Identificación de la muestra**

Código laboratorio	Código campo	Matriz / Punto de muestreo / Distrito / Provincia / Departamento	Fecha de muestreo
02979	01-FQ	Agua natural / Ingreso de PTA convencional de Inclán / Inclán / Tacna / Tacna	2017-10-12
02980	02-FQ	Agua para uso y consumo humano / Salida de PTA convencional de Inclán / Inclán / Tacna / Tacna	2017-10-12
J2981	03-FQ	Agua para uso y consumo humano / Reservorio R1 de PTA compacta / Inclán / Tacna / Tacna	2017-10-12
02982	05-FQ	Agua para uso y consumo humano / Tacho almacenamiento intradomiciliario Fam. Lupaca Flores, PTA compacta / Inclán / Tacna / Tacna	2017-10-12

Nota: Los datos de las muestras son proporcionados por el solicitante.

Lima, 2017-10-26

JLR/CLA/daf

F01-AC-PS-13 Rev 06

Los resultados de este Informe corresponden a las muestras sometidas a ensayo. La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito de este laboratorio. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado de sistema de calidad de la entidad que lo produce.

---

Laboratorio sede La Molina  
Calle Los Pinos N° 259,  
Urb. Camacho, La Molina-Lima 12  
T (511) 4341912

[www.digesa.minsa.gob.pe](http://www.digesa.minsa.gob.pe)  
[www.digesa.sld.pe](http://www.digesa.sld.pe)

Laboratorio sede principal  
Calle Las Amapolas N° 350  
Urb. San Eugenio, Lince – Lima 14, Perú  
Central telefónica (511) 6314430

**INFORME DE ENSAYO N.° 0562-2017-LM**

Pág. 2 de 3

**Resultados**

Código laboratorio	Aluminio (mg/L)	Boro (mg/L)	Barlo (mg/L)	Berilio (mg/L)	Cadmio (mg/L)	Cobalto (mg/L)	Cromo (mg/L)	Cobre (mg/L)	Hierro (mg/L)	Litio (mg/L)	Magnesio (mg/L)
02979	0,10	9,54	0,046	<0,0002	<0,0005	<0,003	0,033	0,012	0,272	1,34	47,6
02980	0,07	9,75	0,044	<0,0002	<0,0005	<0,003	0,030	0,011	0,118	1,36	46,2
02981	0,04	9,22	0,046	<0,0002	<0,0005	<0,003	0,031	0,014	0,257	1,28	42,2
02982	0,04	8,88	0,045	<0,0002	<0,0005	<0,003	0,027	0,014	0,152	1,23	40,5
LC	0,03	0,01	0,0005	0,0002	0,0005	0,003	0,001	0,002	0,005	0,01	0,008
Método	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7
Fecha de ensayo	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24

Código laboratorio	Manganeso (mg/L)	Molibdeno (mg/L)	Sodio (mg/L)	Níquel (mg/L)	Plomo (mg/L)	Antimonio (mg/L)	Selenio (mg/L)	Vanadio (mg/L)	Zinc (mg/L)	Arsénico (mg/L)
02979	0,079	0,024	296	0,005	<0,007	<0,02	<0,03	0,003	0,021	0,30
02980	0,026	0,022	287	<0,005	<0,007	<0,02	n.a.	0,003	0,021	0,30
02981	0,004	0,021	260	0,005	<0,007	<0,02	n.a.	0,003	0,028	0,23
02982	0,003	0,019	285	0,008	<0,007	<0,02	n.a.	0,002	0,021	0,23
LC	0,0005	0,002	0,07	0,005	0,007	0,02	0,03	0,002	0,008	0,01
Método	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7	EPA 200.7
Fecha de ensayo	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24	2017-10-24

n.a.: No aplica

LC: Límite de cuantificación

Métodos:

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  
 SMEWW: Standard Method for Examination of Water and Wastewater. APHA-AWWA-WEF.

MINISTERIO DE SALUD  
 Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria  
  
 BCGA. JULIA IVONNE LOAYZA RAMOS  
 CEP 2841  
 JEFA DE LABORATORIO DE CONTROL AMBIENTAL  
 DIGESA



Lima, 2017-10-26

F01-AC-PS-13 Rev 06

JLR/CLP/daf

Los resultados de este informe corresponden a las muestras sometidas a ensayo. La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito de este laboratorio. Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado de sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Laboratorio sede La Molina  
 Calle Los Pinos N° 259,  
 Urb. Camacho, La Molina-Lima 12  
 T (511) 4341912

[www.digesa.minsa.gob.pe](http://www.digesa.minsa.gob.pe)  
[www.digesa.sid.pe](http://www.digesa.sid.pe)

Laboratorio sede principal  
 Calle Las Armapolas N° 350  
 Urb. San Eugenio, Lince - Lima 14, Perú  
 Central telefónica (511) 6314430

**Anexo 6:** Determinación de la ecuación de regresión múltiple

Arreglo de la matriz para la ecuación de segundo orden:

		<b>x1</b>	<b>x2</b>	<b>x3</b>	<b>x1x2</b>	<b>x1x3</b>	<b>x2x3</b>	<b>x1x1</b>	<b>x2x2</b>	<b>x3x3</b>	
<b>x=</b>	1	0,5	50	7,07	25	3,535	353,5	0,25	2500	49,9849	<b>y=</b>
	1	1,5	50	7,07	75	10,605	353,5	2,25	2500	49,9849	
	1	0,5	70	7,07	35	3,535	494,9	0,25	4900	49,9849	
	1	1,5	70	7,07	105	10,605	494,9	2,25	4900	49,9849	
	1	0,5	60	6	30	3	360	0,25	3600	36	
	1	1,5	60	6	90	9	360	2,25	3600	36	
	1	0,5	60	8,14	30	4,07	488,4	0,25	3600	66,2596	
	1	1,5	60	8,14	90	12,21	488,4	2,25	3600	66,2596	
	1	1	50	6	50	6	300	1	2500	36	
	1	1	70	6	70	6	420	1	4900	36	
	1	1	50	8,14	50	8,14	407	1	2500	66,2596	
	1	1	70	8,14	70	8,14	569,8	1	4900	66,2596	
	1	1	60	7,07	60	7,07	424,2	1	3600	49,9849	
	1	1	60	7,07	60	7,07	424,2	1	3600	49,9849	
	1	1	60	7,07	60	7,07	424,2	1	3600	49,9849	

x' =	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5	1,5	1	1	1	1	1	1	1
	50	50	70	70	60	60	60	60	50	70	50	70	60	60	60
	7,07	7,07	7,07	7,07	6	6	8,14	8,14	6	6	8,14	8,14	7,07	7,07	7,07
	25	75	35	105	30	90	30	90	50	70	50	70	60	60	60
	3,535	10,605	3,535	10,605	3	9	4,07	12,21	6	6	8,14	8,14	7,07	7,07	7,07
	353,5	353,5	494,9	494,9	360	360	488,4	488,4	300	420	407	569,8	424,2	424,2	424,2
	0,25	2,25	0,25	2,25	0,25	2,25	0,25	2,25	1	1	1	1	1	1	1
	2500	2500	4900	4900	3600	3600	3600	3600	2500	4900	2500	4900	3600	3600	3600
	49,9849	49,9849	49,9849	49,9849	36	36	66,2596	66,2596	36	36	66,2596	66,2596	49,9849	49,9849	49,9849

	15	15	900	106,05	900	106,05	6363	17	54800	758,9327
	15	17	900	106,05	1020	120,19	6363	21	54800	758,9327
	900	900	54800	6363	54800	6363	387436	1020	3384000	45535,96
	106,05	106,05	6363	758,9327	6363	758,9327	45535,96	120,19	387436	5495,165
x'x=	900	1020	54800	6363	62100	7211,4	387436	1260	3384000	45535,96
	106,05	120,19	6363	758,9327	7211,4	860,0474	45535,96	148,47	387436	5495,165
	6363	6363	387436	45535,96	387436	45535,96	2772604	7211,4	23924880	329709,9
	17	21	1020	120,19	1260	148,47	7211,4	27,5	62100	860,0474
	54800	54800	3384000	387436	3384000	387436	23924880	62100	2,12E+08	2772604
	758,9327	758,9327	45535,96	5495,165	45535,96	5495,165	329709,9	860,0474	2772604	40234,77

$(x'x)^{-1}$	1405,822	-100,769	-19,915	-216,792	0,600	6,175	0,926	10,305	0,106	10,910
	-100,769	97,492	0,800	8,234	-0,600	-6,175	0,000	-8,667	-0,002	-0,146
	-19,915	0,800	0,510	1,235	-0,010	0,000	-0,015	-0,100	-0,003	-0,022
	-216,792	8,234	1,235	50,155	0,000	-0,873	-0,131	-1,029	-0,003	-2,922
	0,600	-0,600	-0,010	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	6,175	-6,175	0,000	-0,873	0,000	0,873	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,926	0,000	-0,015	-0,131	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
	10,305	-8,667	-0,100	-1,029	0,000	0,000	0,000	4,333	0,001	0,073
	0,106	-0,002	-0,003	-0,003	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
	10,910	-0,146	-0,022	-2,922	0,000	0,000	0,000	0,073	0,000	0,207

x'y=	0,175	$\hat{\beta}_{MCO} = (X'X)^{-1}(X'Y)$	$\beta_0$	0,004693
	0,1525		$\beta_1$	0,021491
	9,95		$\beta_2$	-0,00208
	1,31215		$\beta_3$	0,014419
	8,675		$\beta_4$	0,00075
	1,142375		$\beta_5$	-0,00935
	74,4125		$\beta_6$	-0,00093
	0,15125		$\beta_7$	-0,00583
	575,5		$\beta_8$	6,04E-05
	9,932383		$\beta_9$	0,004185

**Modelo de regresion:**

$$y_1 = 0,004692713334478 + 0,0214914330217846 * x_1 - 0,0020800233644 * x_2 + 0,014419017673049 * x_3 + 0,00075 * x_1 * x_2 - 0,00934579439252049 * x_1 * x_3 - 0,000934579439254225 * x_2 * x_3 - 0,00583333 + 0,0000604166666663517 * x_2^2 + 0,00418522723961878 * x_3^2$$

[15]

**Anexo 7:** Determinación de las mejores condiciones de operación de masa, tiempo y pH en la remoción de arsénico

$$\begin{aligned}
 y_1 &= f(x_1, x_2, x_3) \\
 &= 0,00469271333447807 + 0,0214914330217846 * x_1 \\
 &\quad - 0,00208002336443611 * x_2 + 0,014419017673049 * x_3 \\
 &\quad + 0,000750000000000287 * x_1 * x_2 - 0,00934579439252049 * x_1 \\
 &\quad * x_3 - 0,000934579439254225 * x_2 * x_3 \\
 &\quad - 0,00583333333334524x_1^2 + 0,0000604166666663517 * x_2^2 \\
 &\quad + 0,00418522723961878 * x_3^2
 \end{aligned}$$

Calculemos las derivadas parciales e igualemos a 0 para hallar los puntos críticos:

$$\begin{aligned}
 \frac{df(x_1, x_2, x_3)}{dx_1} &= 0,0214914330217846 - 0,011666667 * x_1 \\
 &\quad + 0,000750000000000287 * x_2 - 0,00934579439252 * x_3 = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{df(x_1, x_2, x_3)}{dx_2} &= -0,00208002336443611 + 0,000750000000000287 * x_1 \\
 &\quad + 0,000120833 * x_2 - 0,000934579439254225 * x_3 = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{df(x_1, x_2, x_3)}{dx_3} &= 0,014419017673049 - 0,00934579439252049 * x_1 \\
 &\quad - 0,000934579439254225 * x_2 + 0,008370454 * x_3 = 0
 \end{aligned}$$

$x_1$	$x_2$	$x_3$	
[-0,011666667	0,00075	-0,009345794	-0,021491433]
0,00075	0,000120833	-0,000934579	0,002080023]
-0,009345794	-0,000934579	0,008370454	-0,014419018]

Del sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= 1,069369973 \\
 x_2 &= 47,5536193 \\
 x_3 &= 4,780831099
 \end{aligned}$$

Punto crítico (1,069369973; 47,5536193; 4,780831099)

Calculando de los Hessiano para estudiar si los puntos obtenidos son máximos, mínimos o puntos de silla.

Criterio de la segunda derivada

$$Hf(x_1, x_2, x_3) = \begin{vmatrix} \frac{d^2f(x_1, x_2, x_3)}{dx_1^2} & \frac{d^2f(x_1, x_2, x_3)}{dx_1x_2} & \frac{d^2f(x_1, x_2, x_3)}{dx_1x_3} \\ \frac{d^2f(x_1, x_2, x_3)}{dx_2x_1} & \frac{d^2f(x_1, x_2, x_3)}{dx_2^2} & \frac{d^2f(x_1, x_2, x_3)}{dx_2x_3} \\ \frac{d^2f(x_1, x_2, x_3)}{dx_3x_1} & \frac{d^2f(x_1, x_2, x_3)}{dx_3x_2} & \frac{d^2f(x_1, x_2, x_3)}{dx_3^2} \end{vmatrix}$$

Si  $H_1(f) > 0$ ,  $H_2(f) > 0$  y  $H_3(f) > 0$ , entonces  $f$  posee un mínimo local.

Si  $H_1(f) < 0$ ,  $H_2(f) > 0$  y  $H_3(f) < 0$ , entonces  $f$  posee un máximo local.

Si  $H_2(f) < 0$ , entonces  $f$  posee un punto de silla.

$$Hf(x_1, x_2, x_3) = \begin{vmatrix} -0,011666667 & 0,00075 & -0,009345794 \\ 0,00075 & 0,000120833 & -0,000934579 \\ -0,009345794 & -0,000934579 & 0,008370454 \end{vmatrix}$$

$$H_1(f) = |-0,011666667| = -0,011666667$$

$$H_2(f) = \begin{vmatrix} -0,011666667 & 0,00075 \\ 0,00075 & 0,000120833 \end{vmatrix} = -1,97222 * 10^{-6}$$

$$H_3(f) = \begin{vmatrix} -0,011666667 & 0,00075 & -0,009345794 \\ 0,00075 & 0,000120833 & -0,000934579 \\ -0,009345794 & -0,000934579 & 0,008370454 \end{vmatrix}$$

$$H_3(f) = -0,011666667 * \begin{vmatrix} 0,000120833 & -0,000934579 \\ -0,000934579 & 0,008370454 \end{vmatrix} - 0,00075 *$$

$$\begin{vmatrix} 0,00075 & -0,000934579 \\ -0,009345794 & 0,008370454 \end{vmatrix} + (-0,009345794) *$$

$$\begin{vmatrix} 0,00075 & 0,000120833 \\ -0,009345794 & -0,000934579 \end{vmatrix}$$

$$H_3(f) = -1,6099 * 10^{-9} + 1,84241 * 10^{-9} - 4,00326 * 10^{-9}$$

$$H_3(f) = -3,77075 * 10^{-9}$$

Entonces se tiene:

$$H_1(f) = -0,011666667 < 0$$

$$H_2(f) = -1,97222 * 10^{-6} < 0$$

$$H_3(f) = -3,77075 * 10^{-9} < 0$$