



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL CHIMBORAZO

REMOCIÓN ELECTROQUÍMICA DE ARSÉNICO EN AGUAS RESIDUALES DE PROCESOS DE PLANTAS METALÚRGICAS EN EL CANTÓN CAMILO PONCE ENRÍQUEZ

CRISTINA VANESSA FERNÁNDEZ VÉLEZ

Trabajo de Titulación modalidad: Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado
ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH como requisito
parcial para a la obtención del grado de:

MAGÍSTER EN INGENIERÍA QUÍMICA APLICADA

Riobamba -Ecuador

ENERO 2022

©2021, Cristina Vanessa Fernández Vélez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Titulación modalidad **Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado **Remoción electroquímica de arsénico en aguas residuales de procesos de plantas metalúrgicas en el Cantón Camilo Ponce Enríquez** de responsabilidad de la Ingeniera Química Cristina Vanessa Fernández Vélez ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Ing. Luis Eduardo Hidalgo Almeida; PhD.

PRESIDENTE

Firmado digitalmente por LUIS EDUARDO HIDALGO ALMEIDA
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC, o=BANCO CENTRAL DEL ECUADOR, ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE INFORMACION ECIBCE, l=QUITO, serialNumber=000445780, cn=LUIS EDUARDO HIDALGO ALMEIDA
Fecha: 2022.01.10 09:00:35 -05'00'

LUIS EDUARDO
HIDALGO
ALMEIDA

Dr. Hugo Italo Romero Bonilla; PhD.

DIRECTOR

Firmado electrónicamente por:
HUGO ITALO
ROMERO
BONILLA

Ing. Juan Carlos González García; PhD.

MIEMBRO

Firmado electrónicamente por:
JUAN CARLOS
GONZALEZ
GARCIA

Dr. Jorge Efrén Silva Yumi; PhD.

MIEMBRO

Firmado electrónicamente por:
JORGE EFREN
SILVA YUMI

Riobamba, enero 2022

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, **Cristina Vanessa Fernández Vélez**, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



Ing. Quim. Cristina Vanessa Fernández Vélez

CI: 0706262698

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, **Cristina Vanessa Fernández Vélez**, declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor/a, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de Maestría.



Ing. Quim. Cristina Vanessa Fernández Vélez

CI: 0706262698

DEDICATORIA

Primeramente, dirigido en especial a mi Padre Celestial que ha sido personaje primordial en mi toma de decisiones y así ejecutar a cabalidad mis metas, sueños e ideales dando paso a crecer, desarrollarme y evolucionar cada día. A mi abuelita María Merchán Merino, mi madre Darinca Vélez Vivanco y mi padrastro José Líder Jirón por su paciencia, amor, esfuerzo y sacrificio que me han brindado en el trayecto de mi vida personal y profesional, a su vez son mi motor principal de seguir perseverando y alcanzando muchos logros para nuestra bendecida familia, me demuestran los 365 días que son ejemplo de perseverancia y lucha constante y que a pesar de tantos obstáculos y calamidades que se nos presenta en la vida todos tenemos la capacidad suficiente para salir adelante y lograr lo que nos proponemos. A todas las personas que de una u otra manera me han motivado y me siguen motivando a cumplir esta y muchas metas propuestas y verlos realizados mis sueños profesionales y espirituales.

Cristina

AGRADECIMIENTO

Gracias infinitas al Dr. Hugo Romero Bonilla, PhD, a los miembros asesores de tesis, Ms. Juan Carlos González García y Dr. Jorge Efrén Silva Yum, PhD, por vuestra dirección, experiencia y discernimiento para el cumplimiento del presente trabajo científico, que en un inicio no resulto fácil, pero mediante pautas y guías, esta investigación culminó con triunfo.

Gratificar al Instituto de Posgrados y Educación Continua de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo, que ha consentido el amplio aprendizaje, mediante sus docentes, se ha adquirido conocimientos idóneos para esta profesión; a la Universidad Técnica de Machala que consagro los recursos e instrumentos para poder culminar esta investigación científica.

A todos muchas gracias.

Cristina

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xvi
SUMARY	xvii
CAPÍTULO I	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Sistematización del problema	2
1.3. Formulación del problema	3
1.4. Objetivos de la investigación	3
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	3
1.4.2. <i>Objetivo Específicos</i>	3
1.5. Justificación de la investigación.....	4
1.6. Hipótesis	4
1.6.1. <i>Hipótesis general</i>	4
1.6.2. <i>Hipótesis específicas</i>	4
CAPÍTULO II	
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes del problema	6
2.2. Bases teóricas	7
2.2.1. Industria Minera en el cantón Camilo Ponce Enríquez	7
2.2.2. Planta de Beneficio Franco Romero & Castro FRANROMEC CIA LTDA	7
2.2.3. Procesos metalúrgicos	8
2.2.4. Arsénico	8

2.2.5.	Tecnologías para el abatimiento de arsénico en aguas	10
2.2.6.	Proceso de remoción	12
2.2.6.1.	pH y potencia redox	12
2.2.6.2.	Cinética de remoción electroquímica	13
2.2.7.	T-NEC	14
2.2.7.1.	Celda electroquímica	15
2.2.7.2.	Fundamentos teóricos	15
2.2.8.	Espectrofotometría de Absorción Atómica.....	16
2.2.9.	Prueba estadística STATGRAPHICS	16

CAPÍTULO III

3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
3.1.	Tipo y diseño de investigación	18
3.2.	Método de investigación	18
3.3.	Enfoque de la investigación	18
3.4.	Identificación de las variables	19
3.4.1.	<i>Variable independiente</i>	19
3.4.2.	<i>Variables dependientes</i>	19
3.4.3.	<i>Operacionalización de las variables</i>	20
3.5.	Diseño de la investigación	23
3.6.	Población y muestra de estudio	24
3.7.	Unidad de Análisis	24
3.8.	Localización de la investigación	24
3.9.	Selección y tamaño de la muestra	25
3.10.	Técnicas de recolección de datos	25

3.11.	Tratamiento y diseño experimental	25
3.12.	Diagrama del proceso de remoción	25
3.13.	Procedimiento Experimental	27
3.13.1.	<i>Preparación de la muestra</i>	27
3.13.1.1.	<i>Muestras de agua sintética</i>	27
3.13.1.2.	<i>Muestras de agua reales</i>	27
3.13.2.	<i>Equipamiento del T-NEC</i>	28
3.13.3.	<i>Ensayo Electroquímico</i>	28
3.13.4.	<i>Proceso electroquímico</i>	28
 CAPÍTULO IV		
4.	RESULTADOS	30
4.1.	Limpieza del equipo T-NEC	30
4.2.	Efecto del pH en la remoción de arsénico	30
4.3.	Análisis de las muestras de agua	30
4.3.1.	<i>Muestras de aguas sintéticas</i>	30
4.3.2.	<i>Muestras de aguas sintéticas</i>	31
4.4.	Porcentaje de remoción	32
4.4.1.	<i>Efecto del tiempo de contacto</i>	34
4.4.2.	<i>Cinética de remoción</i>	34
4.5.	Pruebas estadísticas mediante STATGRAPHICS Centurión XVI Versión 16.1.11	35
4.6.	Discusión	37

CAPÍTULO V

5.	PROPUESTA	39
5.1.	Cálculos Ingenieriles empleados a la planta de beneficio Franco Romero & Castro (FranRomec)	39
5.1.1.	<i>Balance de materia de la planta de beneficio Franco Romero & Castro</i>	<i>41</i>
5.1.2.	<i>Balance de materia del proceso de oxidación</i>	<i>42</i>
5.1.3.	<i>Balance de energía para estimar el aumento de temperatura</i>	<i>43</i>
	CONCLUSIONES	47
	RECOMENDACIONES	48
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2	Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso9
Tabla 1-3	Tabla de operación de la variable dependiente20
Tabla 2-3	Tabla de operación de la variable independiente.....21
Tabla 3-3	Diseño lineal general: % de remoción de arsénico vs: pH del agua residual de procesos auríferos, tiempo de remoción electroquímica23
Tabla 1-4	Datos obtenidos de la remoción de arsénico en muestras sintéticas de 2 ppm a distintos niveles de pH30
Tabla 2-4	Datos obtenidos de la remoción de arsénico de cada repetición de las muestras de aguas residuales, a distintos niveles de pH31
Tabla 3-4	Porcentaje de remoción de arsénico obtenidos mediante el equipo T-NEC a distintos niveles de pH con respecto al tiempo33
Tabla 4-4	Pruebas estadísticas realizadas a las muestras de aguas residuales previamente removidas de arsénico a varios niveles de pH, en diferentes tiempos35
Tabla 1-5	Procesos convencionales para la remoción de arsénico de aguas46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2	Diagrama de Pourbaix de arsénico	13
Figura 2-2	Descripción de las piezas del equipo alemán T-NEC	14
Figura 3-2	Componentes interiores de la celda electroquímica del equipo T-NEC	15
Figura 1-3	Mapa satelital del cantón Camilo Ponce Enríquez	24
Figura 2-3	Diagrama de proceso de remoción de arsénico en aguas	26
Figura 3-3	(A) Electrodo de hierro sin partículas, (B) Parte frontal del electrodo de hierro adherido partículas de arsénico, (C) Parte lateral del electrodo de hierro adherido partículas de arsénico	29
Figura 1-5	Diagrama de proceso de la Planta de Beneficio Franco Romero & Castro	40

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4	Efecto del % remoción de arsénico con respecto al tiempo a distintos niveles de pH 2, 4 y 8	31
Gráfico 2-4	Efecto del tiempo de remoción con respecto a la concentración de arsénico a distintos niveles de Ph	34
Gráfico 3-4	Cinética de remoción de arsénico con respecto al tiempo, en aguas residuales metalúrgicas	35
Gráfico 4-4	Grafico de caja y bigotes de la concentración final de arsénico después del proceso de remoción electroquímico de las muestras de aguas residuales de la planta de beneficio FranRomec	37

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A	Equipamiento del T-NEC
Anexo B	Resultados de los análisis de las muestras de agua sintética.
Anexo C	Resultados de los análisis de las muestras de agua residual minera
Anexo D	Cronograma de actividades
Anexo E	Presupuesto

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación consistió en remover mediante la aplicación de un método electroquímico el arsénico presente en aguas residuales provenientes de las plantas metalúrgicas existentes en el cantón Camilo Ponce Enríquez. La industria minera se remonta al siglo XVI y hoy por hoy es una actividad económica importante para el país, sin embargo, con el pasar de los años ha afectado negativamente al medio ambiente principalmente al agua debido a las aguas residuales generadas de los procesos hidrometalúrgicos, estos contienen exceso de plomo, cadmio, arsénico entre otros. Se obtuvo las muestras de agua residual de la relavera de la planta de beneficio FranRomec, la misma que tiene una concentración inicial de arsénico de 0,70 ppm, se utilizó el equipo T-NEC, mediante fundamentos de electroquímica se determinó la cinética de remoción en función al pH, se realizaron 3 repeticiones variando el pH a niveles de 2, 4 y 8, se determinó la concentración de arsénico cada 30 minutos durante 2,5 horas; las muestras de aguas previamente removidas de arsénico se midieron utilizando la técnica de espectroscopia de absorción atómica. Mediante análisis se pudo obtener porcentajes de remoción de arsénico, quedando que a un pH 4 dio un mejor porcentaje de remoción de 91,90 % a comparación de los pH 2 y 8, que dieron menor a 85 % el porcentaje de remoción, quedando así el agua tratada con una concentración final de As de 0,06 ppm según lo dispuesto en la norma ecuatoriana un pH 4, mientras que a un pH de 2 y 8 la concentración final es de 0,12 ppm. En conclusión, el pH óptimo para remover arsénico en aguas residuales es a un pH 4, ya que dio un mayor porcentaje de remoción y alcanzo los límites máximos permisibles de arsénico en aguas residuales.

Palabras claves: ARSÉNICO (As), ELECTROQUÍMICA, PROCESO DE REMOCIÓN, PROCESOS HIDROMETALÚRGICOS, AGUAS RESIDUALES.

**LUIS
ALBERTO
CAMINOS
VARGAS**

Firmado digitalmente
por LUIS ALBERTO
CAMINOS VARGAS
DN: cn=LUIS ALBERTO
CAMINOS VARGAS
c=EC, I=RIOBAMBA
Motivo: Soy el autor de
este documento
Ubicación:
Fecha: 2021-12-20
17:02:05:00



SUMMARY

The objective of this research consisted of removing, by applying an electrochemical method, the arsenic that exists in wastewater from metallurgical plants found in the Camilo Ponce Enriquez canton. The mining industry dates back to 16th century and today it is an important economic activity for the country, however, over the years, the environment has been negatively affected, mainly water, due to the wastewater generated from hydrometallurgical processes, these contain excess of lead, cadmium, arsenic among others. The residual water samples were obtained from the tailings facility of the Fran Romec benefit, the same one that has an initial arsenic concentration of 0.70 ppm, is used the T-NEC equipment, by electrochemistry means it was determined the kinetics of removal depending on the pH; 3 repetitions were carried out varying the pH at levels of 2, 4 and 8, it was determined the arsenic concentration every 30 minutes for 2.5 hours; the water samples previously removed of arsenic were measured using the absorption spectroscopy technique atomic. Through analysis it was possible to obtain arsenic removal percentages, having that at a pH 4 it was obtained a better removal percentage of 91.90% compared to pH 2 and 8, which had less than 85% the removal percentage, having that the treated water with a final concentration of As of 0.06 ppm according to the provisions of the Ecuadorian standard a pH of 4, while at a pH of 2 and 8 the final concentration is 0.12 ppm. In conclusion, the optimum pH to remove arsenic in wastewater is at a pH 4, since it produced a higher percentage of removal and reached the limits maximum allowable of arsenic in wastewater.

Keywords: <ARSENIC>, <ELECTROCHEMISTRY>, <REMOVAL
PROCESS>, <HYDROMETALLURGIC PROCESSES>, <WASTEWATER>

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

La minería por mucho tiempo ha sido considerada como una de las actividades con un mayor beneficio económico para el ser humano, de allí esta actividad se la ha realizado en el Ecuador desde el siglo XVI hasta la actualidad y posiblemente durante varias décadas más a futuro, es normal que ciertas empresas extranjeras hayan querido explotar minerales (oro y plata principalmente) ya que el beneficio que recibían era considerable, además que en esos tiempos la actividad minera no estaba muy regularizada por ende dichas empresas no controlaban lo que a contaminación se refiere, brindando importancia a las utilidades generadas por la venta de los tan preciados metales sin importar lo que esto afecte negativamente al medio ambiente.

Después de un largo tiempo algunas empresas se retiraron del territorio dejando los sitios de explotación minera en manos del estado ecuatoriano, pero el estado no estaba capacitado para la administración correcta de dichos lugares y esto dio paso a la creación de asentamientos informales por personas que lo desarrollaban como una fuente de trabajo. Esto progresivamente dio inicio a lo que se conoce como minería a pequeña escala y eventualmente la minería se posicionaría como una de las actividades de mayor relevancia económica para el Ecuador, siendo así que lograría aportar al Banco Central del Ecuador alrededor de unos 153 millones de dólares al año (Camacho, Andrea ; Peña 2021).

La contaminación que se ha producido a partir de los procesos hidrometalúrgicos ha resultado toxica para el medio ambiente siendo perjudicado el recurso hídrico, misma contaminación que va en ascenso con el pasar del tiempo, en los procesos de extracción minera, sin ningún tipo de control, y se producía residuos que contienen exceso de plomo, cadmio, el arsénico, entre otros, luego las aguas utilizadas serian vertidas en las corrientes de agua cercanas, esto resulta perjudicial ya que la contaminación del agua abarca grandes extensiones por lo que los elementos contaminantes se distribuyen a lo largo de la cuenca perjudicando así no solo al ecosistema acuático sino que también a los seres vivos tanto humanos como animales que se abastecen con dichas aguas (Guerra y Zaldumbide 2010).

Podemos entender que los procesos hidrometalúrgicos utilizan abundante agua la cual se obtiene un residuo mezclado de plomo, cadmio, arsénico, entre otros, este trabajo de investigación se enfocara en el metaloide arsénico ya que tiene la característica de acumularse en el organismo, eventualmente si estos se seguirían almacenando generarían complicaciones; tales como lesiones en la piel al estar en contacto directo, lesiones en los órganos internos como el hígado, afecta significativamente al sistema nervioso, causa fiebre, anemia y hasta

fue clasificado como sustancia cancerígena por la IARC y la OMS (Londoño Franco, Londoño Muñoz, y Muñoz Garcia 2016).

Una solución para evitar o mitigar la contaminación de los recursos hídricos con arsénico sería realizar determinaciones periódicas en las fuentes hídricas de las concentraciones de estos elementos y tener en cuenta si esos valores se encuentran por debajo del límite permisible establecido en la norma Ecuatoriana que indica que debe estar debajo de 0.05 ppm (TULSMA Libro VI Anexo 1 2011). Aunque se quiera realizar procesos para determinar concentraciones bajas de analito lo difícil es encontrar una técnica accesible ya que algunas podrían llegar a ser muy costosas o abarcar periodos de tiempo demasiado largos, por ello se busca desarrollar métodos analíticos los cuales son más sensibles llegando a mediciones de ppb y ppm con costos de trabajo muy rentables (Romero et al., 2019).

1.1. Planteamiento del problema

El metaloide arsénico es motivo de múltiples investigaciones, como agente causal de varios cuadros de intoxicación, especialmente intoxicación crónica. En comunidades de bajos recursos, el agua contaminada con arsénico se ha utilizado para consumo humano sin pensar en los riesgos a los que están expuestos los habitantes al estar en contacto con este metaloide. Los efluentes generados del proceso de cianuración en la minería no son caracterizados debido a que las empresas no disponen de equipos para la identificación de este metaloide presentes en los lixiviados (Teixeira, et al., 2020).

En el territorio ecuatoriano, las actividades mineras han incrementado en un 2,40 % en los tres últimos años, a nivel artesanal y pequeña minería, donde ambas tienen una relación en común, que es el inadecuado manejo de tratamiento de aguas residuales de plantas metalúrgicas, lo que conlleva el inconveniente de presencia de estos elementos nocivos para la salud humana y animal, entre ellos el arsénico. Se ha determinado que los cuerpos hídricos del distrito minero de Camilo Ponce Enríquez, presentan valores promedio de arsénico veinte veces por encima de los límites máximos permisibles (Quishpe y Guevara 2020). Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce del Acuerdo Ministerial 097 A del Ministerio del Ambiente (Ministerio del Ambiente 2015).

1.2. Sistematización del problema

La presente investigación pretende aplicar un método electroquímico para la remoción de arsénico, en efluentes de la industria minera, ubicado en el sector Camilo Ponce Enríquez empleando la técnica electroquímica que resulta amigable con el ambiente a su vez contribuye a preservar y mejorar la salud humana.

1.3. Formulación del problema

Debido a los elevados niveles de arsénico en efluentes mineros y escasa implementación de tratamientos de aguas residuales para eliminación de arsénico. ¿Es viable la aplicación de métodos electroquímicos para la remoción de arsénico en efluentes de plantas metalúrgicas?

Preguntas directrices o específicas de la investigación

- ¿Es posible remover arsénico de aguas residuales de plantas auríferas por método electroquímico?
- ¿Qué variables de operación influyen significativamente para alcanzar el porcentaje deseado en el proceso de remoción electroquímica del arsénico presente en aguas residuales de plantas metalúrgicas?
- ¿Qué métodos alternativos permiten la remoción de arsénico de aguas residuales de plantas metalúrgicas?
- ¿Es posible realizar los cálculos para la adaptación de una celda electroquímica en remoción de arsénico en aguas residuales de plantas metalúrgicas?

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo General

- Remover electroquímicamente arsénico en aguas residuales de procesos de plantas metalúrgicas en el cantón Camilo Ponce Enríquez.

1.4.2. Objetivo Específicos

- Identificar las variables de operación en la celda electroquímica para la remoción de arsénico presente en los efluentes de procesos metalúrgicos.
- Cuantificar la concentración de arsénico en efluentes de procesos metalúrgicos mediante la técnica analítica de absorción atómica.
- Proponer un proceso electroquímico para alcanzar un porcentaje de remoción de arsénico ≥ 85 %.
- Validar el proceso de remoción electroquímica mediante los cálculos de ingeniería para el diseño de la celda electroquímica en aguas residuales de plantas metalúrgicas.

1.5. Justificación de la investigación

La presente investigación se realiza con el propósito de aportar al conocimiento existente sobre manejo de remoción de arsénico mediante la aplicación del método electroquímico,

cuyos resultados podrán sistematizarse en una propuesta, para ser incorporado mediante cálculos ingenieriles en plantas metalúrgicas de tratamientos de aguas residuales con elevadas concentraciones de arsénico.

Esta investigación se realiza porque existe la necesidad de mejorar y preservar los recursos hídricos del distrito Camilo Ponce Enríquez, ya que al presentarse alrededor actividades mineras y no contar con tratamientos de efluentes mineros, éstos son enviados clandestinamente a cuerpos de agua dulce, donde se utiliza como líquido vital para riego de plantaciones y consumo humano-animal.

El arsénico es un elemento que se encuentra ampliamente distribuido en todo el medio ambiente. Sus compuestos se hallan principalmente en estado de oxidación pentavalente y trivalente; en formas orgánicas e inorgánicas. Las especies arsenicales varían en su grado de toxicidad, siendo los compuestos inorgánicos más tóxicos que los orgánicos, y los compuestos trivalentes más tóxicos que los pentavalentes.

En la revisión bibliográfica se encuentra una variedad de desarrollo e implementación de métodos de remoción de arsénico, tanto convencionales como emergentes e innovadores, donde se indaga mediante métodos científicos, situaciones que pueden ser investigadas por la ciencia, esta investigación una vez que demuestre su validez y confiabilidad podrá ser utilizada en otros trabajos de investigación y aplicación en otras industrias.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

- Las celdas electroquímicas permiten la remoción de arsénico presente en las aguas residuales que proviene de procesos de plantas metalúrgicas en el cantón Camilo Ponce Enríquez.

1.6.2. Hipótesis específicas

- Se logrará la concentración final deseada de arsénico por debajo de 0,05 ppm límite máximo permisible de acuerdo a la Tabla 1. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce del Acuerdo Ministerial 097 A del Ministerio del Ambiente.
- Se obtendrá las condiciones óptimas para la operación de variables necesarias en la remoción de arsénico de efluentes mineros.
- El proceso electroquímico será susceptible para la remoción de arsénico en efluentes mineros.

- Se obtendrá los cálculos respectivos para validación e implementación de la celda electroquímica en la remoción de arsénico en efluentes mineros.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

La presencia de arsénico en el agua suele deberse a procesos geológicos naturales, pero en algunos casos también puede ser resultado de la acción humana debido diversos factores: actividad minera, uso de combustibles fósiles entre otros. La toxicidad del elemento depende de la especie química, siendo las especies inorgánicas más tóxicas que las orgánicas, y el As+3 más tóxico que As+5. Esto implica que sea necesario tener métodos muy sensibles para determinar las diferentes especies de arsénico en el agua, de esta forma se pueden prevenir las enfermedades derivadas de la exposición a este contaminante (Medina et al.,2018).

Con el paso del tiempo, la minería ha llegado a representar un papel importante en el crecimiento económico y el desarrollo sostenible de los países de la región latinoamericana (Mero et al. 2018). En la actualidad, la actividad minera en Ecuador se ha expandido, ya sea como minería informal o artesanal y minería a gran escala, donde persisten problemas socio-ambientales y legales, debido a la emisión de aguas residuales que tienden a presentar altas concentraciones de arsénico, seguido de plomo, cadmio, entre otros; que contribuyen a problemas irreversibles.

En el distrito minero Camilo Ponce Enríquez ubicado en la provincia del Azuay, se encuentran aproximadamente 60 plantas de beneficio de extracción de metales como oro, plata y cobre, el resultado de la extracción de estos metales ha venido desencadenando contaminación a los recursos hídricos, cultivos agrícolas, problemas a la salud humana y animal, este inconveniente se lo relaciona con los vertidos clandestinos de las actividades mineras que contienen sedimentos, mercurio, plomo, sólidos disueltos, aguas ácidas, aceites, lubricantes, y aguas servidas, en esta actividad minera se emplea continuamente la utilización de reactivos químicos que ocasionan alteraciones de aguas superficiales y subterráneas (Duque 2016).

En un estudio reciente acerca de la caracterización de los relaves mineros de la planta MINEREICIS S.A, se registró una elevada concentración de plomo, cadmio y principalmente arsénico, este estudio presenta que en la relavera existe una concentración de 232 ppm, sobrepasando los límites máximos permisibles escritos en la Norma de Calidad Ambiental y descarga de efluentes: recurso agua, que es por debajo del 0,1 ppm.

Otro estudio, manifiesta que los cuerpos de agua dulce del cantón Camilo Ponce Enríquez, se registra valores de concentración de arsénico veinte veces superior a la Normativa Ambiental

para la preservación de la vida acuática y silvestre en agua dulce (0,05 ppm) y 64 veces más que la concentración mínima recomendada por la Organización Mundial de la Salud (Quishpe y Guevara 2020).

2.2. Bases teóricas.

2.2.1. *Industria Minera en el cantón Camilo Ponce Enríquez*

Este cantón minero se destaca históricamente por hacer minería durante 50 años, esta industria extractiva contempla el 38 % del territorio repartido en 6000 concesiones mineras metálicas, el oro ha sido un factor importante en la economía de la provincia, reconocido al cantón Camilo Ponce Enríquez por los altos niveles de contaminación que ha generado durante todo este tiempo, principalmente a las fuentes hídricas (Alvarado Vélez y Rebañ 2018).

Como se puede apreciar aún existen pequeños grupos de personas que ignoran las normas que justamente están para proteger tanto al trabajador como al medio ambiente y trabajan de manera ilegal, lo cual ocasiona un gran problema para el gobierno (Atariguana 2020). Pero el gobierno sigue luchando por promover la minería legal creando leyes o normas para beneficiar a los trabajadores y crear más puestos de trabajo, como en el caso de este año 2021, exactamente el 8 de febrero en el cual 720 mineros del cantón Ponce Enríquez se beneficiaron con la firma de contratos operacionales entre las asociaciones mineras autónomas “12 de Octubre” y la llamada producción minera Ponce Enríquez y la Empresa Nacional Minera (ENAMI EP), indicando así la correcta gestión de parte de las instituciones brindando a cada empleado su respectivo equipo de protección personal y con campamentos que cumplan con las condiciones óptimas de trabajo.

2.2.2. *Planta de Beneficio Franco Romero & Castro FRANROMEC CIA LTDA*

La planta de beneficio FranRomec es una empresa ubicada en la dirección provincial del Azuay en el cantón Camilo Ponce Enríquez, parroquia Camilo Ponce Enríquez, sitio La Fortuna, a unos 700 metros sobre el nivel del mar, el terreno se extiende unos 639 Km² y cuya principal actividad es la de producir, procesar y refinar metales como el oro y plata utilizando procesos de molienda, flotación y lixiviación con cianuro o tiourea.

En esta planta se procesan diferentes materiales como cuarzo, mineral sulfurado, minerales combinados los cuales provienen de distintas minerías del sector.

2.2.3. *Procesos metalúrgicos*

En la planta se realiza el proceso de extracción y refinación de metal por varias etapas, primeramente, como en cualquier planta de beneficio el material que ingresa pasa por trituradoras y molinos los cuales son alimentados manualmente por el personal de la empresa, esto con el fin de que el material pase a través de una malla No. 60 que es el tamaño necesario para continuar al siguiente proceso.

Luego del proceso el mineral pasa por unos canales y se obtiene dos tipos de oro, el grueso y el fino; el oro grueso queda retenido en unas alfombrillas, luego se las lavan y el oro pasa a los molinos de barras donde se le adiciona mercurio para producir una especie de amalgama para después ser fundida y extraer el oro. El oro fino de los canales pasa a los tanques de agitación donde el personal realiza controles de los parámetros como densidad de la pulpa, el pH de la solución, el porcentaje de sólidos que hay en el tanque y la concentración de cianuro de sodio utilizado. Por lo general el pH de trabajo en estos tanques es de entre 10,5 a 11 para modificar el pH se utiliza cal ($Ca(OH)_2$), el cianuro libre esta entre los 200 a 300 ppm; el proceso de agitación permanece alrededor de 7 horas, luego de este tiempo se procede a añadir carbón activado para que adsorba el oro presente en la solución; se realizan análisis en laboratorio de la concentración de oro para finalmente ser recolectado.

Los relaves del proceso de cianuración son enviadas a unas piscinas para posteriormente pasar por el proceso de flotación para recuperar una pequeña parte de mineral que pudo haber quedado en la solución. Los residuos finalmente pasan a las piscinas de relave las cuales están construidas según el Acuerdo Ministerial 018 donde especifica el procedimiento y las condiciones técnicas que se deban satisfacer para la instalación y operación de plantas de beneficio y construcción de relaveras (Unda 2015).

2.2.4. Arsénico

El arsénico es un metaloide que se obtiene tras la extracción de cobre y plomo, como un subproducto (Carrera y Cirelli 2004). Es uno de los elementos más importantes, se encuentra de manera natural ocupando 1/3 en la corteza terrestre en el planeta, es muy común que este articulado a menas de sulfuro, como arsenopirita ($FeAsS$), donde el elemento arsénico es liberado en el proceso hidrometalúrgico de lixiviación, es decir, en la cianuración en los depósitos auríferos por reacción del cianuro con el mineral (Andueza 2020). Su mayor aplicación en la industria es como agente de aleación, en lo que corresponde al proceso del vidrio, industria del textil, industria del papel, en adhesivos metálicos, fabricación de plaguicidas, y productos farmacéuticos (Chata Quenta 2015).

El arsénico debido a su toxicidad y abundancia geológica resulta ser importante en investigaciones, actualmente se lo puede encontrar en el agua potable acarreando efectos

nocivos, a la vez cancerígenos para los seres vivos, dicho metaloide se lo encuentra también en el suelo, bioacumulándose en el organismo de las plantas comestibles, como las hortalizas estos cultivos mantienen contacto con el agua y el suelo, afectando gravemente a las personas que lo consuman (Hermosillo et al., 2019).

Límites permisibles

El arsénico al ser un elemento muy perjudicial para la salud se lo reconoce como uno de los más peligrosos del mundo, amenazando la vida de millones de personas, actualmente la contaminación ha llegado a afectar las aguas subterráneas, investigaciones demuestran que existen grandes cantidades de arsénico (Liu y Huang 2014). Actualmente la Organización Mundial de la Salud (OMS), razono los resultados debido a las enfermedades que traía consigo como el cáncer, publicó una nueva edición que establece que los límites permisibles de arsénico en el agua son de 0,01 ppm (Ahmad y Bhattacharya 2019).

En el caso de nuestro país el Gobierno del Ecuador creó el TULSMA a través del Ministerio del Ambiente en el cual especifica los valores máximos permitidos de contaminantes en aguas que vayan a ser vertidas en los cuerpos hídricos (Tabla 1), para el arsénico se encuentra estipulado que su concentración para la preservación de la flora y fauna acuática debe llegar a no más de 0,05 ppm de contaminante (TULSMA Libro VI Anexo 1 2011).

Tabla 1-2 Límites máximos permisibles para aguas de consumo humano y uso

<i>Parámetros</i>	<i>Expresado</i>	<i>Límite Máximo Permisible (ppm)</i>
<i>Aceites y grasas</i>	<i>Sustancias solubles en hexano</i>	<i>0,30</i>
<i>Aluminio</i>	<i>Al</i>	<i>0,20</i>
<i>Amoniaco</i>	<i>N – Amoniacal</i>	<i>1,00</i>
<i>Amonio</i>	<i>NH₄</i>	<i>0,05</i>
<i>Arsénico (total)</i>	<i>As</i>	<i>0,05</i>
<i>Bario</i>	<i>Ba</i>	<i>1,00</i>
<i>Cadmio</i>	<i>Cd</i>	<i>0,01</i>
<i>Cianuro (total)</i>	<i>CN</i>	<i>0,10</i>

Fuente:(TULSMA Libro VI Anexo 1 2011)

Fuentes y vías de exposición

El arsénico es un elemento que se encuentra naturalmente en la corteza terrestre del planeta, este se puede liberar al medio ambiente a través de las aguas subterráneas, extrayendo minerales del suelo o debido a procesos geotérmicos; el arsénico resulta como un subproducto en la separación de diversos minerales metálicos, por ende que la contaminación de arsénico está estrechamente ligada con la minería (Niemeier y Dames 1992).

Las principales vías de contaminación de arsénico son por ingesta y por inhalación, produciendo problemas neurotóxicos en el organismo; mediante ingesta se debe al consumo de animales que entran en contacto con fuentes de agua contaminadas, por lo general son aguas que vienen de corrientes subterráneas o aguas residuales de actividades industriales; tales como fábricas de pesticidas, fundidoras, quema de petróleo que contiene arsénico, entre otros. La inhalación de arsénico es más común en los lugares de extracción de minerales de arsénico (Chou 2013).

2.2.5. Tecnologías para el abatimiento de arsénico en aguas

Existen varios métodos de remoción de arsénico, a continuación, mencionaremos las tecnologías más aplicadas para remoción de este metaloide:

- a) Precipitación química: Se tiene como objetivo primordial, en el material de desechos en los procesos hidrometalúrgicos el abatimiento de compuestos de arsénico pentavalente (V) debido a su insolubilidad, siendo, la precipitación química un método de remoción de sulfuro de arsénico, arseniato de calcio o arseniato férrico, acorde con la revisión de la literatura se manifiesta que estos componentes son inestables bajo determinadas condiciones, dado, que no es adecuado para la eliminación directa en relaves, ya que producirán lixiviados que contienen arsénico (Wang et al. 2019). La adicción de cal a un pH alto como método de precipitación de arsénico resulta no ser tan estable, en relación al dióxido de carbono en la atmosfera, mediante precipitación pasa a ser carbonato de calcio, liberando el arsénico en una solución en equilibrio con cationes apropiados, llegando a ser menos toxico (Nicomel et al., 2015).
- b) Fitorremediación: La técnica de fitorremediación consiste en la utilización de plantas para tratar medios contaminados, tales como hongos, musgos, entre otros; estos se encargan de absorber los contaminantes de un medio, posterior a ello se efectúa un tratamiento y se mitiga el contaminante (de Souza et al., 2019). Se utilizando tres métodos principales como in situ, in vivo e in vitro (Jasrotia, Kansal, y Mehra 2017). El principal inconveniente es el mantenimiento del crecimiento de estas plantas, que es un parámetro importante para evaluar la tolerancia de las plantas a los

- contaminantes químicos tóxicos y es una característica esencial en las plantas utilizadas en los programas de fitorremediación (Leão et al., 2017; Titah et al., 2018).
- c) Tecnología de membranas: El abatimiento de arsénico (As) de medios acuosos ha sido un área emergente para la tecnología de membranas. Puesto que es difícil de eliminar debido a varios estados de oxidación, rango de toxicidad y solubilidad. Entonces, uno de los principales inconvenientes que presenta esta tecnología de las membranas son las dificultades para alcanzar tanta permeabilidad y rechazo del agua simultáneamente. Por tanto, las membranas con un rendimiento mejorado tienen una demanda urgente de eliminación de As del agua (He et al., 2017).
 - d) Remediación fitobiana: Esta técnica de remediación fitobiana cumple un rol esencial como tecnología innovadora que se emplean plantas y microorganismos, para abatir la contaminación del ambiente por arsénico. Este papel importante tiene como personaje primordial las bacterias promotoras del crecimiento vegetal que en sus siglas en inglés (PGPB), estas ayudan a la fitorremediación, han logrado ser potencialmente promocionadas para mejorar la tolerancia a los metales de las plantas y a su vez el crecimiento de las plantas con el objetivo de la eliminación a gran escala de As (Alka et al. 2020). Pero se necesita más investigación sobre el desarrollo de la tecnología de fito-disposición y nuevas tecnologías para extraer arsénico de la biomasa eliminada y reutilizar la biomasa segura con gran cantidad de carbono secuestrado para biocombustible o forraje (Roy et al., 2015).
 - e) Electrocoagulación: Este tipo de tecnología emergente de tratamiento de agua implica la oxidación electrolítica de un material de ánodo y la generación in situ de coagulante. Al aplicar una corriente entre dos electrodos, los iones metálicos como Fe^{2+} y Al^{3+} que pueden contribuir a la formación del coagulante, se libera por oxidación del ánodo. Posteriormente, el Fe^{2+} se puede oxidar en solución para producir un hidróxido de Fe^{3+} (E. López & Galán, 2013; M. López et al., 2019). Según las diferentes configuraciones geométricas, los reactores de electrocoagulación pueden diseñarse en una variedad de formas con el fin de mitigar arsénico del agua, existen varios tipos; reactor de alto de placa vertical, generalmente produce una gran cantidad de incrustaciones con el requisito de lavado con ácido, lo que resulta en la generación de desechos adicionales. El reactor de placa horizontal corto es adecuado para el tratamiento de altas concentraciones de contaminantes, sin embargo, es difícil detener las fugas de líquido (Song et al. 2017).

2.2.6. *Proceso de remoción*

2.2.6.1. pH y potencia redox

En el tratamiento de aguas residuales el pH es una parte fundamental en los procesos fisicoquímicos, estos pueden ser implementados solos, simultáneos o en serie: oxidación/reducción, coagulación-filtración, precipitación, adsorción e intercambio iónico, separación líquida/sólido, exclusión física, tecnología de membranas, métodos biológicos, etc. La conductividad eléctrica es diferente para cada tipo de estudio o elemento de estudio, está definida como la capacidad de un medio o espacio físico de permitir el paso de la corriente eléctrica. La conductividad está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico (Gutiérrez-Vargas et al. 2021).

Altos valores de conductividad disminuyen la resistencia eléctrica del sistema favoreciendo el fenómeno de electrólisis en los electrodos. Este parámetro está relacionado en función de la naturaleza del sustrato y principalmente de la variación del pH como consecuencia del proceso y puede variar con el tiempo debido a la penetración de los frentes ácido o alcalino y por la solubilización de las especies iónicas ya sea como resultado de los cambios de pH o por un aumento de temperatura. El pH y el potencial redox son los factores esenciales que controlan la especiación del arsénico (Huang 2016).

Ciertos estudios de investigación, demuestra que las especies de arsénico inorgánico trivalentes son más tóxicas y tienden mayor movilidad que las especies pentavalentes. Cabe agregar, que el As⁺⁵ es más probable de ser adsorbido y retenido en varias superficies. Por tanto, en lo general las tecnologías son más competentes en remover el arsénico en su estado pentavalente, por tal razón, es común que el tratamiento empiece por un primer paso de oxidación (Ramón et al., 2019).

El arsénico tiene diferentes estados de oxidación como arseniato, arcina, arsenito y arsénico, el estado de oxidación pentavalente resulta ser más eficaz para la eliminación de arsénico de una solución acuosa, para tener una mejor comprensión es necesario utilizar el Diagrama de Pourbaix, para establecer la interacción de las propiedades absorbentes y el área superficial, este diagrama facilita la aplicación de la relación de potencial y pH en la determinación del comportamiento de la adsorción de arsénico en aguas (Fig. 1) (Emmanuel, Makhatha, y Nheta 2019).

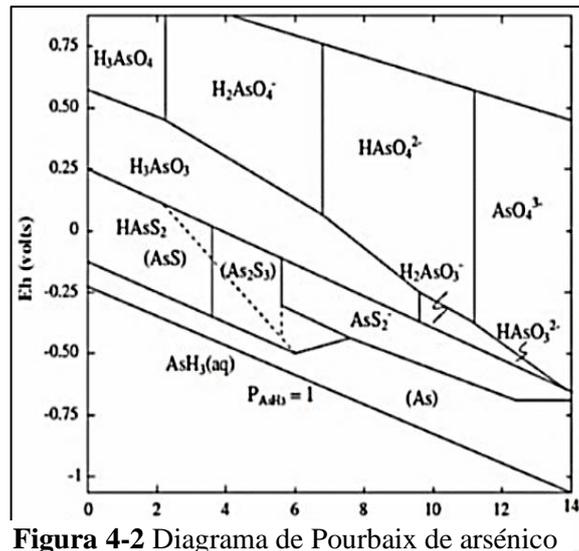


Figura 4-2 Diagrama de Pourbaix de arsénico

Fuente: (Emmanuel et al. 2019)

2.2.6.2. Cinética de remoción electroquímica

La remoción electroquímica es una tecnología estudiada recientemente resultando imprescindible para la remoción de arsénico, se ha analizado en los años recientes métodos de remoción como: precipitación, oxidación-coagulación, membranas de intercambio iónico y adsorción, siendo este el método más interesante para la remoción de arsénico, debido al término de costos (Lobo et al. 2017).

La remoción es un proceso de degradación de la concentración del analito en el medio, en el tratamiento de soluciones acuosas la remoción es dependiente de los parámetros experimentales, tal como el pH, temperatura, fuerza iónica y concentración del soluto (Moussout et al.,2018). El estudio cinético tiene importancia para determinar el grado y utilización de la capacidad de remoción en función del tiempo, por lo tanto se utilizan diferentes modelos para ajustar la cinética obtenida mediante curvas así definir los parámetros de tasa y explicar el mecanismo de degradación del analito (Tsibranska y Hristova 2011).

La remediación electrocinética implica la aplicación de una corriente directa baja o de bajo voltaje, los contaminantes que se encuentran en el agua y de forma iónica son transportados a los electrodos, todo depende de la naturaleza de su carga, la eficacia depende del porcentaje del contaminante, las soluciones de acondicionamiento favorecen la solubilización del arsénico (Rosa, Egido, y Márquez 2017).

Porcentaje de remoción

Este parámetro se calculó haciendo uso de la siguiente fórmula (Albis Arrieta, López Rangel, y Romero Castilla 2017):

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100 \% \quad \text{Ec. 1}$$

C_o = Concentración inicial del analito

C_e = Concentración final del analito

Cinética de remoción

La degradación cinética corresponde a una cinética de primer orden, para obtener esta gráfica se necesita que el coeficiente de regresión sea mayor de 0,90; para esta cinética se utilizó las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ degradación} = \frac{C_e}{C_o} \times 100\% \quad \text{Ec. 2}$$

2.2.7. T-NEC

El T-NEC es un equipo de tecnología alemana que está diseñado para el tratamiento de agua utilizando aplicaciones electrofísicas, está diseñado como una camiseta de tubería, se integra a la perfección a las tuberías, funciona de manera automática y no requiere de ninguna configuración por parte del usuario, el equipo es patentado y tiene integrado un control de inteligencia, (Fig. 2) (NECON 2012).

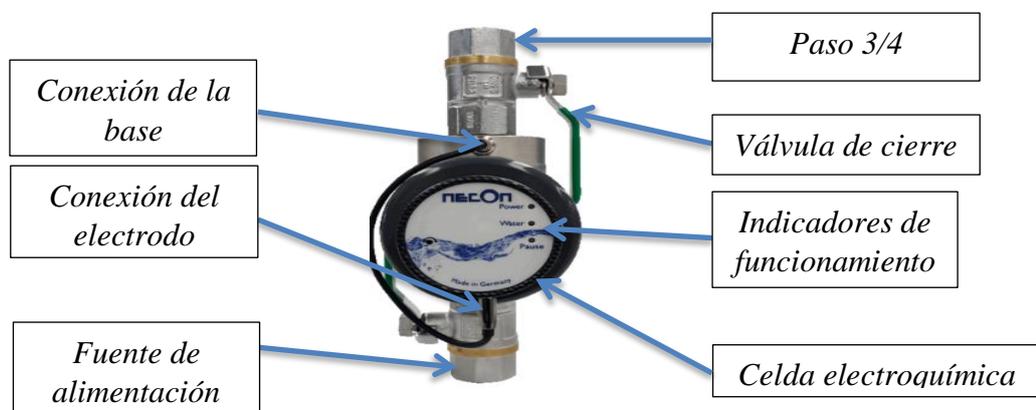


Figura 5-2 Descripción de las piezas del equipo alemán T-NEC

Fuente: (NECON 2012)

Especificaciones técnicas

- Fuente de alimentación: La fuente de alimentación es de enchufe externa tiene como entrada 180 - 240 V; 50/60 Hz.
- Consumo de energía: Dependiendo la conductividad del agua teniendo un Max de 28 V.
- Requisitos para la instalación: Llave de toma de muestra, mangueras para la recirculación del agua, bomba de agua y acoples.
- Conexiones: Válvulas de cierre suministradas.
- Paso: $\frac{3}{4}$ (DN)20
- Resistencia de presión: 16 bar
- Peso: 4 kg incluido el electrodo
- Diseño de la celda de tratamiento: Acero inoxidable
- Es idóneo para el agua potable e industrial.

2.2.7.1. Celda electroquímica



Figura 6-2 Componentes interiores de la celda electroquímica del equipo T-NEC

Realizado por: Fernández C. 2021

- **Base de la celda:** Base o cubierta es donde se sienta el electrodo y pasa la corriente de agua.
- **Cabezal de la celda:** Cabezal o tapa indica el funcionamiento del equipo mediante luces; luz roja indica si el equipo este encendido, luz amarilla indica el paso de agua cuando el electrodo está trabajando.

2.2.7.2. Fundamentos teóricos

La tecnología electroquímica está alcanzando papeles cruciales en el abatimiento de arsénico en los últimos años, esto se debe a las ventajas como la oxidación in situ, donde tenemos menor producción de lodos y alta eficiencia con medidas de bajo costo frente a las técnicas convencionales. Los métodos electroquímicos pueden eliminar tanto el arsenito como el arseniato de la solución acuosa. Las variadas técnicas de separación son electrocoagulación, desionización capacitiva y técnicas de eliminación oxidativa, oxidación electroquímica

indirecta, oxidación anódica y electro-Fenton / bio electroFenton (Syam Babu y Nidheesh 2020).

Liu et al., (2019), indica el uso de birnessita para la adsorción electroquímica de arsénico de aguas residuales de minería a un voltaje de celda constante, también se evaluó el efecto del voltaje de celda y el rendimiento de uso continuo (sin desorción) del electrodo de birnessita. A 1,2 V durante 24 h, las concentraciones de arsénico total y As⁺³ en las aguas residuales disminuyeron de 3808,7 a 73,7 ppm y de 682,8 a 2 ppm, respectivamente. La relación de eliminación de arsénico total aumentó con el aumento del voltaje de la celda y alcanzó el 98,10 % a 1,2 V, que fue más alta que en circuito abierto (84,10 %).

El estudio presenta la remoción electroquímica de arsénico obteniendo un 98,10 % de abatimiento del elemento que incumple con la Normativa de calidad ambiental y descarga de efluentes: recurso agua, por ende, la electroquímica como tecnología de remoción de arsénico tiende a ser aceptable y amigable al medio ambiente, para implementar en aguas residuales de plantas metalúrgicas.

2.2.8. Espectrofotometría de Absorción Atómica

La espectrofotometría de absorción atómica es una técnica cuantitativa que fue desarrollada en el año 1955 por el científico A. Walsh (Pérez-López y Esquivel-Arias 2018). Se la conoce mundialmente como AAS (siglas en inglés atomic absorption spectroscopy), este método es muy usado en todo el mundo por su sensibilidad, su uso se destaca en la determinación de metales pesados en cosméticos y otros, ya que la presencia de estos productos afectan directamente a los seres vivos (Palazón, Irene; Gonzalez, Montserrat; Arroyo 2015). La espectroscopía de adsorción atómica es muy utilizada también en la industria farmacéutica para la medición de las distintas etapas de proceso desde la fabricación hasta obtener el producto final (Pérez & Esquivel, 2018). Este método permite determinar elementos en cantidades de ppm o ppb debido a que las líneas de adsorción del método son extremadamente estrechas y la transición electrónica es diferente para cada elemento (Gallegos, Vega, y Noriega 2012).

2.2.9. Prueba estadística STATGRAPHICS

La estadística estudia el comportamiento de los fenómenos o experimentos aleatorios, como la rama de las matemáticas utiliza cálculos aplicando leyes para predicción y toma de decisiones, la misma ha alcanzado gran importancia en la cultura básica, el trabajo profesional y la investigación, debido a la cantidad de información que el ser humano debe afrontar diariamente en su trabajo, para facilitar la información esta es expresada en tablas y gráficos

estadísticos, necesariamente se debe tener un conocimiento básico del mismo para tener una correcta interpretación. Existen muchos programas estadísticos para la interpretación de datos a gran escala entre ellas se encuentra el statgraphics (Batanerov & Diaz, 2008).

El statgraphics es un conjunto de análisis estadísticos profesionales, que proporcionan estudios de datos necesarios y útiles para realizar investigaciones científicas, el funcionamiento de este programa es muy parecido al uso de otros programas estadísticos, proporciona instrumentos útiles para el análisis de datos, su estructura es amplia y tiene diversas opciones para cambiar los resultados o pedir nuevos análisis (Super 1985).

Batanero; (2008) explica que el paquete estadístico statgraphics está clasificado de la siguiente forma:

- Característica de posición central: Son los valores de los datos que se agrupan alrededor, en este grupo esta englobado la media, la mediana y la moda.
- Características de dispersión: Proporciona una medida de desviación de los datos con respecto a los valores de la tendencia central, como recorrido, varianza, etc.
- Características de forma: Proporciona una medida de la forma gráfica de la distribución, para ello tenemos, simetría, asimetría, etc.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo y diseño de investigación

Al realizarse la debida revisión bibliográfica que engloba al tema de investigación, se prosigue a centrar el alcance del presente trabajo de investigación, la misma se efectuará de manera cuasi experimental. Los diseños cuasi experimentales son guiados por objetivos, y determina las relaciones que existen entre las variables independientes y la variable dependiente, mediante la selección de grupos comparables a través de alguna técnica de ajuste estadístico. Junto con los diseños longitudinales, el investigador agrega la estructura del modelo, y el factor tiempo que se convierte en uno de sus elementos determinantes. De este modo, el diseño longitudinal está directamente vinculado al estudio del paso del tiempo, es decir, al estudio del cambio, en este caso, se busca la viabilidad del método electroquímico para remoción de arsénico, evaluando variables de operación como: intensidad de corriente, pH y tiempo de remoción, donde primero se cuantificará en agua sintética, con una concentración inicial conocida de arsénico, posteriormente se llevara a cabo el tratamiento de eliminación del elemento y se obtendrá la concentración final de arsénico, en efecto se aplicará el mismo tratamiento en muestras reales del campo de estudio, que son los efluentes de plantas metalúrgicas auríferas en el Cantón Ponce Enríquez, con la finalidad de lograr remover por debajo de 0,1 ppm límite máximo permisible.

3.2. Método de investigación

Se pretende realizar un método de investigación sistemático por que se encamina al propósito de corroborar el rendimiento de la celda electroquímica como alternativa para remoción de arsénico en plantas metalúrgicas. El método que se aplicará es de total importancia para una futura toma de decisiones, debido que existe una alta demanda de técnicas de remoción de arsénico, por ende, si se obtiene los resultados esperados, lograra ser un método de implementación en plantas piloto para la industria del tratamiento de aguas residuales.

3.3. Enfoque de la investigación

El enfoque de la presente investigación es tanto, cuantitativo, porque se lleva a cabo medición basadas en técnicas y métodos, recolección de información, análisis de resultados del fenómeno descrito.

3.4. Identificación de las variables

3.4.1. Variable independiente

- Tiempo de remoción electroquímico de arsénico.
- pH del agua residual minero.
- Cálculos de la implementación de la celda electroquímica.

3.4.2. Variables dependientes

- Concentración final de arsénico en el agua residual

3.4.3. Operacionalización de las variables

Tabla 1-3 Tabla de operación de la variable dependiente

<i>Variable dependiente</i>	<i>Conceptualización</i>	<i>Dimensiones</i>	<i>Indicadores</i>	<i>Definición de los indicadores</i>	<i>Criterio de medición</i>	<i>Técnica</i>	<i>Instrumento</i>	<i>Escala</i>
Concentración final de arsénico en el agua residual	La presencia de arsénico en el agua suele deberse a procesos geológicos naturales, pero en algunos casos también puede ser resultado de la acción humana debido diversos factores entre ellos la actividad minera	Concentración de arsénico	Límite máximo permisible para descarga a un cuerpo de agua dulce (0.1 ppm)	Los límites máximos permisibles para descarga a un cuerpo de agua dulce tienen como objetivo proteger la calidad del recurso agua para salvaguardar y preservar la integridad de las personas, de los ecosistemas y sus interrelaciones y del ambiente en general	Continua	Técnica espectrofotométrica de absorción atómica	Espectrofotómetro de Absorción atómica	≥ 0.1 ppm

Realizado por: Fernández C. 2021

Tabla 2-3 Tabla de operación de la variable independiente

<i>Variable independiente</i>	<i>Conceptualización</i>	<i>Dimensiones</i>	<i>Indicadores</i>	<i>Definición de los indicadores</i>	<i>Criterio de medición</i>	<i>Técnica</i>	<i>Instrumento</i>	<i>Escala</i>
pH del agua residual del proceso hidrometalúrgico durante la remoción electroquímica de arsénico.	Se trata de la medición de concentración de iones de H, por tanto, mide la naturaleza ácida o alcalina de una muestra	pH del agua residual	Parámetro fisicoquímico de calidad del agua (muestra)	Algunos parámetros fisicoquímicos pueden alterarse con el paso del tiempo desde el momento que son aislados de su entorno. Por esto, deben ser medidos directamente en campo	Continua	Técnica analítica	Potenciómetro	2 4 8
Tiempo de remoción electroquímica de arsénico presente en el agua residual del proceso hidrometalúrgico.	Es el tiempo que se tarda un Proceso (químico o físico) en separar un componente (disuelto o suspendido) de una fase continua (solvente o dispersante)	Tiempo de remoción	Concentración de Arsénico final	El tiempo de eliminación específica la cantidad mínima de tiempo y la liberación de una señal de control asíncrono.	Continua	-	Timer	-
% de remoción	La remoción eficiente de metal solo es posible si la herramienta tiene las operaciones	Porcentaje de remoción	El porcentaje de remoción debe ser $\geq 85\%$	El % de remoción determina la eficiencia del método o técnica	Porcentaje	-	-	$\geq 85\%$

	óptimas para el abatimiento del metal.			que se está aplicando dicho tratamiento.				
Cálculos ingenieriles	Los cálculos o modelos de ingeniería se utilizan para determinar las características requeridas del sistema y para evaluar las modificaciones del sistema de distribución necesarias para cumplir con nuevas cargas u otros cambios en los sistemas de distribución	Cálculos para la adaptación de la celda electroquímica	Cálculos para implementar la celda electroquímica	Los modelos ingenieriles sirven para optimizar, determinar o evaluar las modificaciones requeridas para un sistema estudiado.	Cálculos	Técnica de Cálculos de Procesos Unitarios	-	-

Realizado por: Fernández C. 2021

3.5. Diseño de la investigación

El diseño experimental que se aplicará en el trabajo de investigación se resume en la Tabla 4.

Tabla 3-3 Diseño lineal general: % de remoción de arsénico vs: pH del agua residual de procesos auríferos, tiempo de remoción electroquímica.

<i>Factor</i>	<i>Tipo</i>	<i>Niveles</i>	<i>Valores /unidades</i>
			<i>pH A (niveles de pH)</i>
<i>pH del agua residual de procesos auríferos</i>	<i>Fijo</i>	<i>3</i>	<i>pH B</i>
			<i>pH C</i>
			<i>t1 (min)</i>
<i>Tiempo de remoción electroquímica</i>	<i>Fijo</i>	<i>5</i>	<i>t2</i>
			<i>t3</i>
			<i>t2</i>
			<i>t3</i>

Realizado por: Fernández C. 2021

El análisis estadístico correspondiente a los datos experimentales de diseño experimental se realizará mediante el paquete estadístico Statgraphics Centurión XVI versión 16.1.11, en entorno Windows 7.

El funcionamiento de una planta de beneficio se divide en dos etapas: producción y regeneración. En la etapa de producción contempla los procesos asociados a la generación de aguas residuales contaminantes, posterior a ello se continua con la etapa de regeneración que consiste en llevar a cabo un tratamiento de los efluentes mineros.

Una vez que se observe la calidad de agua residual de estudio, y tener fijo el objetivo puntual que es abatir el elemento arsénico en los efluentes de la planta metalúrgica.

Cabe recordar que para los estudios del medio (descritos anteriormente), y el método llega ser viable y confiable, el módulo de tratamiento se modelará físicamente con celdas electroquímicas donde se considere mayor concentración de arsénico. Se establece la configuración del montaje experimental, se realizó el escalamiento para llevar a cabo el criterio; la capacidad de remoción unitaria observada en los procesos de cianuración, es una propiedad intrínseca del medio, y por esto, es independiente de la instalación. Así, la cantidad del medio de alimentación necesaria para la planta piloto será estimada mediante un cálculo lineal (se considera la constante la proporción de elemento de arsénico removido por volumen

unitario del medio). Mantener el tiempo de contacto entre el medio y el agua a tratar. Esto último significaría finalmente conservar el tiempo de residencia del agua en el módulo de tratamiento.

3.6. Población y muestra de estudio

La población de estudio es la Planta de Beneficio FranRomec, ubicado en distrito Camilo Ponce Enríquez, provincia del Azuay. Primero se llevará a cabo una remoción electroquímica en una muestra de agua sintética de concentración de arsénico conocida, posterior a ello las muestras reales.

3.7. Unidad de Análisis

Se utilizó una solución patrón de arsénico de (1000 ppm), para desarrollar agua sintética, que se aplicó en la celda electroquímica, tras la obtención de información de las concentraciones finales de arsénico en el agua sintética, se procedió aplicar el método electroquímico en muestras reales en diferentes puntos de agua residual de la planta minera del cantón Camilo Ponce Enríquez.

3.8. Localización de la investigación

Cantón Camilo Ponce Enríquez, provincia del Azuay, Ecuador, donde se seleccionará las muestras de aguas residuales de procesos auríferos (Fig. 4).

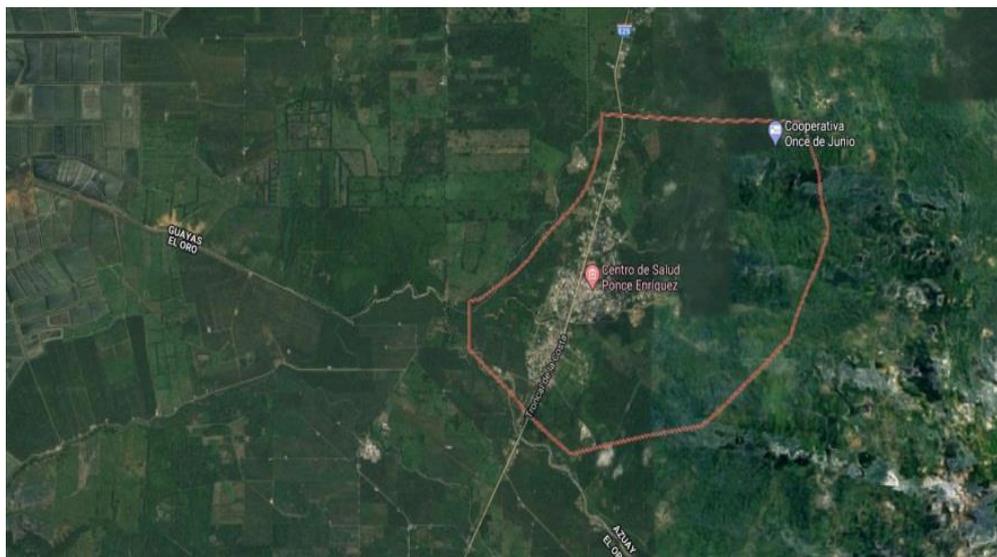


Figura 1-3 Mapa satelital del cantón Camilo Ponce Enríquez

Fuente: (Anón 2020)

3.9. Selección y tamaño de la muestra

Se tiene en consideración que las muestras de estudio se aplicarán al 100 %, las muestras que se emplearán en la investigación provienen de aguas residuales de plantas metalúrgicas presentes en el distrito Camilo Ponce Enríquez. Se aplicaron en las muestras un método electroquímico, para remoción del elemento arsénico, se evaluará la concentración y tiempo de remoción del mismo.

3.10. Técnicas de recolección de datos

Recolección de datos primarios:

- Preparación de agua sintética, a partir de una solución patrón de arsénico de 1000 ppm, para experimentar el rendimiento de remoción de la celda electrolítica.
- *Evaluación de la concentración y tiempo de remoción de arsénico, en muestra de estudio, mediante metodología electroquímica.*

3.11. Tratamiento y diseño experimental

Para comprobar que el equipo T NEC de tecnología alemana, puede remover el arsénico de las aguas residuales de los procesos hidrometalúrgicos, se realizaron ensayos modificando el pH de dichas aguas con el fin de minimizar la concentración de arsénico en el medio y llegar al límite permisible que está establecido en la norma ecuatoriana, comprobando que este equipo se lo puede utilizar de manera industrial.

3.12. Diagrama del proceso de remoción

Para iniciar con el proceso se realizó la recolección de las muestras semanalmente obteniendo 3 muestras con un volumen de 20 L cada una, a dichas muestras se les modifico el pH a escala de 2, 4, 8; con el fin de optimizar el proceso, percatándose cual pH da mejor porcentaje de remoción. Para el equipamiento del T-NEC se necesitó, mangueras, llave de toma de muestra y bomba de agua, la misma que trabaja a un voltaje de 180, el agua recircula por el equipo durante 2,5 horas y cada media hora se va tomando una muestra, luego de obtener todas las muestras, se las filtra y se las lleva al laboratorio para su posterior análisis de arsénico mediante la técnica de espectroscopia de adsorción atómica.

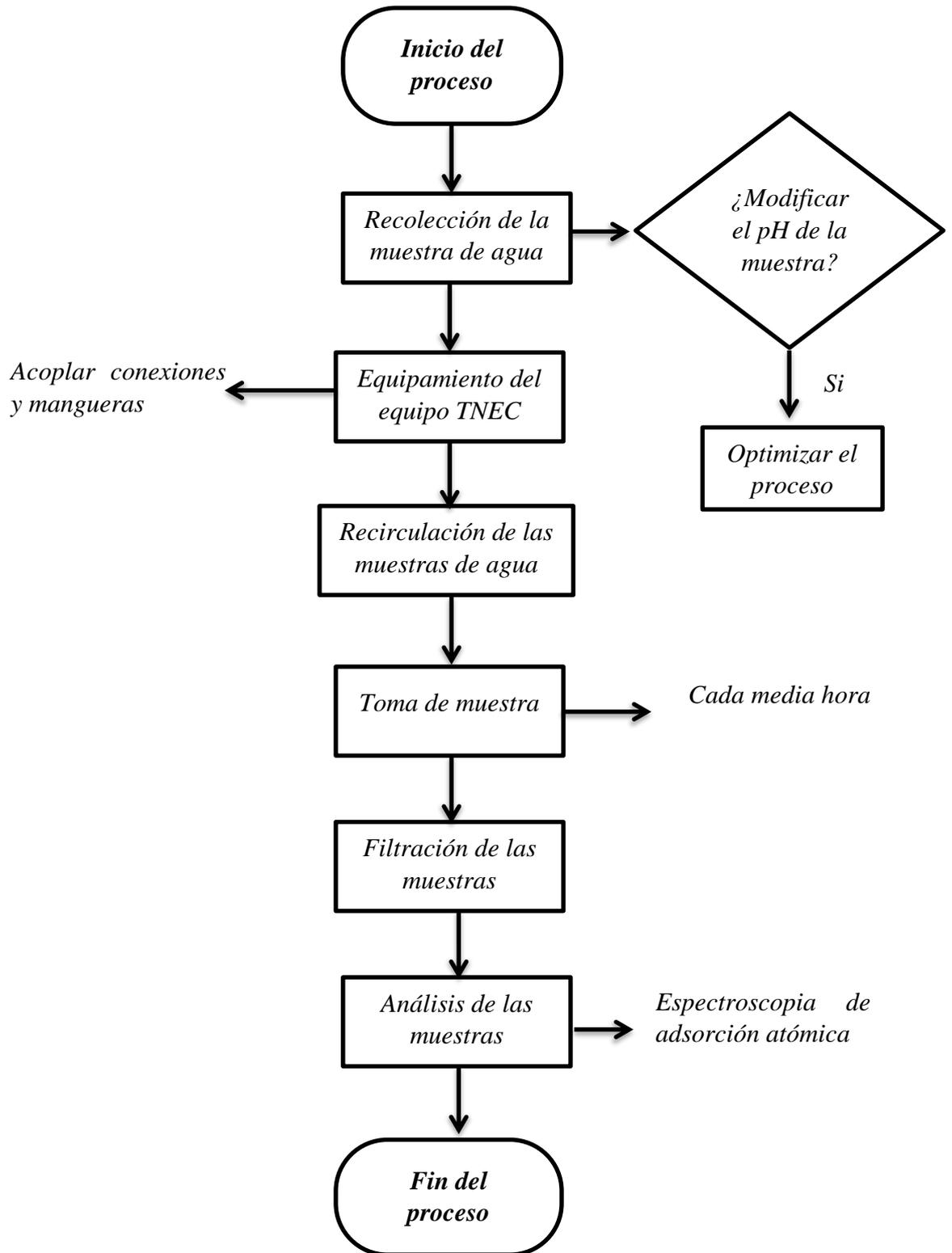


Figura 2-3: Diagrama de proceso de remoción de arsénico en aguas

Realizado por: Fernández C. 2021

3.13. Procedimiento Experimental

3.13.1. Preparación de la muestra

El estudio experimental de la investigación se lo realizó en muestras de agua sintética y muestras de aguas residuales de procesos metalúrgicos.

3.13.1.1. Muestras de agua sintética

Para comprobar que el equipo T NEC ayuda a remover el arsénico de las aguas, se realizó una serie de experimentos, primero en agua sintética de 2 ppm, para comprobar su efectividad con el fin de remover arsénico de las aguas residuales a nivel industrial, para la preparación de las aguas sintéticas se utiliza la ecuación de dilución, descrita a continuación:

$$C1 \times V1 = C2 \times V2$$

Ec. 6

- En un envase de 20 L se colocó agua destilada libre de cloruros, se realizaron 3 repeticiones, con el fin de variar el pH.
- A partir de una solución patrón de arsénico de 1000 ppm, se preparó 2 ppm, tomando 40 mL de As puro, esta cantidad se obtuvo mediante la utilización de la ecuación 6, dicha cantidad se colocó en cada envase de 20 L para su posterior análisis.
- Se midió el pH de las aguas con la ayuda de un pH metro, de los cuales se realizaron 3 muestras a pH de 2, 4 y 8, para poder modificar el pH se utilizó hidróxido de potasio (KOH) para llegar a un pH básico y para obtener un pH ácido, se necesitó ácido clorhídrico (HCl).

3.13.1.2. Muestras de agua reales

Se obtuvieron 3 muestras de agua residual, cada muestra fue tomada de distintos puntos de la relavera de la planta de beneficio, se la almacenó en un envase de 20 L y transportó hasta el laboratorio de Electroquímica de la Universidad Técnica de Machala para su posterior remoción de arsénico.

- Cada muestra de agua que estaba contenida en el envase de 20 L fue agitada y se midió el pH inicial mismo que fue de 8,3.
- Para la obtención de mejores resultados se varió el pH de la misma manera que se le realizó a las muestras de agua sintética a escala de 2, 4 y 8.
- Se utilizó ácido clorhídrico para llegar a un pH ácido, si el mismo descendía bruscamente se utilizó hidróxido de potasio para llegar a un pH básico, así se obtuvo los pH indicados anteriormente.

3.13.2. Equipamiento del T-NEC

El equipo funciona de manera automática, se le acoplo una bomba de agua, mangueras y una llave de toma de muestras (Ilustración 1), para facilitar la recirculación del agua y remover la cantidad de arsénico presente en las aguas,

3.13.3. Ensayo Electroquímico

Después de obtener las muestras de agua residual minera, con la respectiva modificación del pH a escala 2, 4, 8, se realizó el ensayo de remoción electroquímica utilizando un equipo T-NEC que contiene electrodos de hierro. El efecto será evaluado mediante la remoción de arsénico, en primera instancia con agua sintética a una concentración de 2 ppm, preparada a partir de una solución patrón de arsénico de 1000 ppm marca Merck. Se utilizará un volumen de 20 L de agua tanto sintética como residual.

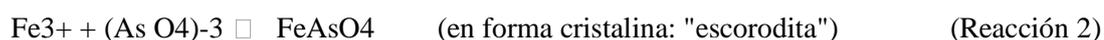
Es necesario que el líquido tenga suficiente conductividad para permitir el flujo iónico entre ánodo y cátodo. El volumen de muestra que fue monitoreado para determinar el porcentaje de remoción de arsénico fue 200 mL cada 30 minutos durante 2.5 horas. Estas muestras fueron filtradas utilizando papel de filtro JP41. Este permite filtrar precipitados finos como ácido silícico, sulfato, hidróxido férrico y ferroso. Finalmente se procede la determinación de la concentración de las muestras de agua mediante espectroscopia de absorción atómica.

3.13.4. Proceso electroquímico

El arsénico está presente en solución acuosa como (AsO_4^{3-}) , principalmente en la etapa de oxidación de $(As+5)$ debido al oxígeno atmosférico. Durante el proceso electroquímico dentro de la celda, el electrodo de hierro metálico genera iones de Fe^{3+} (electrólisis), se forman ahora los precipitados de $(FeAsO_4)$, pero al mismo tiempo hidróxidos $Fe(OH)_3$ en forma principalmente coloidal. Estos se coagulan con los precipitados de $FeAsO_4$ y son separados por filtros. Se tratará de alcanzar durante la remoción cantidades de arsénico $As < 0,05$ ppm. El volumen de agua recircula con la asistencia de una bomba de agua por el interior de la celda electroquímica que contiene el electrodo de hierro, mediante la corriente eléctrica producirá la siguiente reacción:



(Oxidación de As (III) a As(V) con el oxígeno atmosférico)





Al momento de hacer la recirculación del agua por el equipo, en la celda sucede una reacción entre el arsénico presente en el agua y el electrodo de hierro. Cuando comienza a trabajar el equipo ocurre la reacción de oxidación N.º 2 en el electrodo que se encuentra dentro de la celda, el método consiste que en cada recirculación de agua el metaloide se oxida de As+3 a As+5, desprendiendo partículas de arsénico el mismo que se adhiere al electrodo de hierro, dejándolo con una costra en su superficie (Fig. 6).

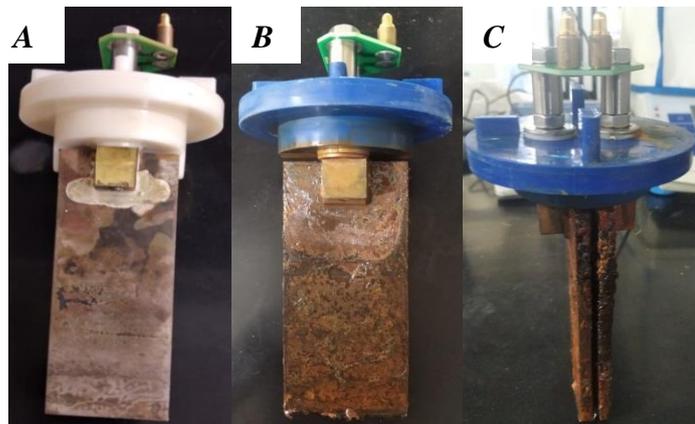


Figura 3-3 (A) Electrodo de hierro sin partículas, (B) Parte frontal del electrodo de hierro adherido partículas de arsénico, (C) Parte lateral del electrodo de hierro adherido

Realizado por: Fernández C. 2021

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Limpieza del equipo T-NEC

Para obtener mejores resultados en la remoción de arsénico, se debe limpiar y pulir el electrodo de hierro que se encuentra dentro de la celda electroquímica, dejando reposar por 8 horas en ácido nítrico a 0,1 M, si se encuentra aún sustancias incrustadas se puede lijar con una lija de agua solo en las partes afectadas, todo con el fin de eliminar elementos incrustados que puedan interferir en los resultados. La limpieza del electrodo se lo puede hacer después de cada paso de muestra, luego de ello se arma de nuevo el equipo procurando conectar bien los circuitos de la celda electroquímica.

4.2. Efecto del pH en la remoción de arsénico

Para optimizar los resultados se evaluó la variación del pH; en base al diagrama de Pourbaix de arsénico (Fig. 1), este indica los estados de oxidación As+3 y As+5, en este trabajo se necesitó pasar del estado As+3 a As+5, siendo este menos toxico, el estado As+3 según el diagrama se puede trabajar de un pH 0 a 9 y el voltaje es de 0,25 a 0,5 V, en base a ello se utilizó los pH 2, pH 4, pH 8; dando un voltaje de proceso de 0,5; al final cuando las aguas fueron parcialmente depuradas de arsénico con la ayuda del equipo T-NEC estas tuvieron un pH menor a 2 y su voltaje fue de 0.6 debido a que paso a ser arsénico en estado +5, con cantidades mínimas de este elemento y siendo menos contaminante para el ambiente.

4.3. Análisis de las muestras de agua

4.3.1. Muestras de aguas sintéticas

A continuación, se presenta la (Tabla 5) que indica los datos obtenidos de la remoción de arsénico en muestras de agua sintética de 2 ppm a los distintos niveles de pH.

Tabla 1-4: Datos obtenidos de la remoción de arsénico en muestras sintéticas de 2 ppm a distintos niveles de pH.

<i>pH</i>	<i>Muestras de agua</i>	<i>Concentración de arsénico (ppm)</i>
2	<i>Muestra 1</i>	<i>0,020</i>
	<i>Muestra 2</i>	<i>0,015</i>
	<i>Muestra 3</i>	<i>0,010</i>
	<i>Muestra4</i>	<i>0,008</i>
	<i>Muestra 5</i>	<i>0,005</i>

	<i>Muestra 1</i>	0,006
	<i>Muestra 2</i>	0,003
4	<i>Muestra 3</i>	0,000
	<i>Muestra4</i>	0,000
	<i>Muestra 5</i>	0,000
	<i>Muestra 1</i>	0,017
	<i>Muestra 2</i>	0,013
8	<i>Muestra 3</i>	0,009
	<i>Muestra4</i>	0,005
	<i>Muestra 5</i>	0,000

Realizado por: Fernández C. 2021

Se realizaron análisis a muestras de agua sintética de 2 ppm, con el fin de encontrar el pH óptimo para remover arsénico en aguas, de los resultados se obtuvo un mayor porcentaje de remoción de arsénico a un pH de 4 ya que se remueve en su totalidad quedando en 0 ppm, mientras que a un pH de 2 y 8 el porcentaje de remoción es aceptable según el TULSMA Libro VI Anexo 1, pero su degradación es más lenta, a diferencia del pH 4.

4.3.2. *Muestras de aguas residuales mineras*

Después de haber obtenido los resultados de las muestras de agua sintética y observar que el porcentaje de remoción va aumentando con el pasar del tiempo, se procedió a pasar el agua de muestras reales de la planta de beneficio FranRomec, por el equipo T-NEC, se realizó 3 repeticiones a distintos niveles de pH, teniendo como concentración inicial 0,7 ppm.

Los valores de concentración (ppm) obtenidos de las 3 repeticiones de la remoción de arsénico de las muestras de agua residual minero metalúrgicas, en la (Tabla 6) se encuentran las concentraciones del análisis de remoción para cada nivel de pH, se puede apreciar que al pH 4 las concentraciones de arsénico son más bajas a comparación de los pH 2 y pH 8.

Tabla 2-4: Datos obtenidos de la remoción de arsénico de cada repetición de las muestras de aguas residuales, a distintos niveles de pH.

<i>pH</i>	<i>Muestras de agua</i>	<i>Concentración de arsénico (ppm)</i>			<i>Promedio</i>
		<i>Repetición 1</i>	<i>Repetición 2</i>	<i>Repetición 3</i>	
2	<i>Muestra 1</i>	0,660	0,640	0,600	0,63
	<i>Muestra 2</i>	0,465	0,470	0,435	0,46
	<i>Muestra 3</i>	0,270	0,300	0,270	0,28

	<i>Muestra4</i>	0,210	0,205	0,185	0,20
	<i>Muestra 5</i>	0,150	0,110	0,100	0,12
4	<i>Muestra 1</i>	0,220	0,180	0,190	0,20
	<i>Muestra 2</i>	0,170	0,125	0,150	0,15
	<i>Muestra 3</i>	0,120	0,070	0,080	0,09
	<i>Muestra4</i>	0,110	0,045	0,065	0,07
	<i>Muestra 5</i>	0,100	0,020	0,050	0,06
8	<i>Muestra 1</i>	0,650	0,510	0,580	0,58
	<i>Muestra 2</i>	0,540	0,355	0,415	0,44
	<i>Muestra 3</i>	0,430	0,200	0,250	0,29
	<i>Muestra4</i>	0,335	0,130	0,175	0,21
	<i>Muestra 5</i>	0,240	0,060	0,100	0,13

Realizado por: Fernández C. 2021

Se realizaron 3 repeticiones a las muestras reales de los procesos hidrometalúrgicos, los mismos que fueron obtenidos cada semana, para la remoción se modificó el pH del agua, con el fin de observar cual pH remueve más cantidad de As, cada recirculación del agua por el equipo T-NEC se tomaron 5 muestras cada 30 minutos, se filtra y se obtienen los resultados mediante el método de espectroscopia de absorción atómica, la degradación de arsénico vs el tiempo el mismo que es expresado en ppm, mediante la variación del pH se puede denotar que el pH óptimo para obtener mejor remoción de arsénico es 4, a diferencia de los pH 2 y 8 su degradación es más lenta, esto se debe a que faltaría hacer una sexta o séptima muestra, por ende no cumple con los límites permisibles según la norma ecuatoriana.

4.4. Porcentaje de remoción

Para evaluar el porcentaje de remoción de arsénico obtuvo el promedio de cada muestra de las tres repeticiones a los distintos niveles de pH 2, 4 y 8 (Tabla 9); cabe recalcar que para la remoción de este metaloide depende a gran medida del pH, diversos estudios han demostrado que existe mayor eficacia en la remoción de arsénico a un pH aproximado de 4 a 5, a pH superiores e inferiores el porcentaje de remoción es bajo (Alarcon, Maria ; Llorens 2012). En el presente estudio (Tabla 7) se observa los promedios de las concentraciones de arsénico después del proceso de remoción a cada nivel de pH, donde se destaca el pH 4, del cual se obtiene el porcentaje de remoción es de 91,90 % resultando mayor que los pH 2 y 8, a estos niveles se obtiene un porcentaje de abatimiento de 82,86 % y 80,95 %, demostrando una estabilidad en la remoción, para la obtención de estos datos se utilizó la ecuación 1.

Tabla 3-4: Porcentaje de remoción de arsénico obtenidos mediante el equipo T-NEC a distintos niveles de pH con respecto al tiempo.

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Concentración As (ppm)</i>		
	<i>pH 2</i>	<i>pH 4</i>	<i>pH 8</i>
0	0,7	0,7	0,7
30	0,63	0,20	0,58
60	0,46	0,15	0,44
90	0,28	0,09	0,29
120	0,20	0,07	0,21
150	0,12	0,06	0,13
% Remoción	82,86	91,90	80,95

Realizado por: Fernández C. 2021

El porcentaje de remoción de arsénico es presentado en la (Fig. 7), se demuestra que la recta del pH 4 se obtiene un porcentaje de remoción de 91,90 %, en comparación del pH 2 y pH 8, estos porcentajes resultaron ser menores a 85 %, siendo el pH 4 el óptimo para trabajar con el equipo T-NEC y depurar las aguas residuales de arsénico.

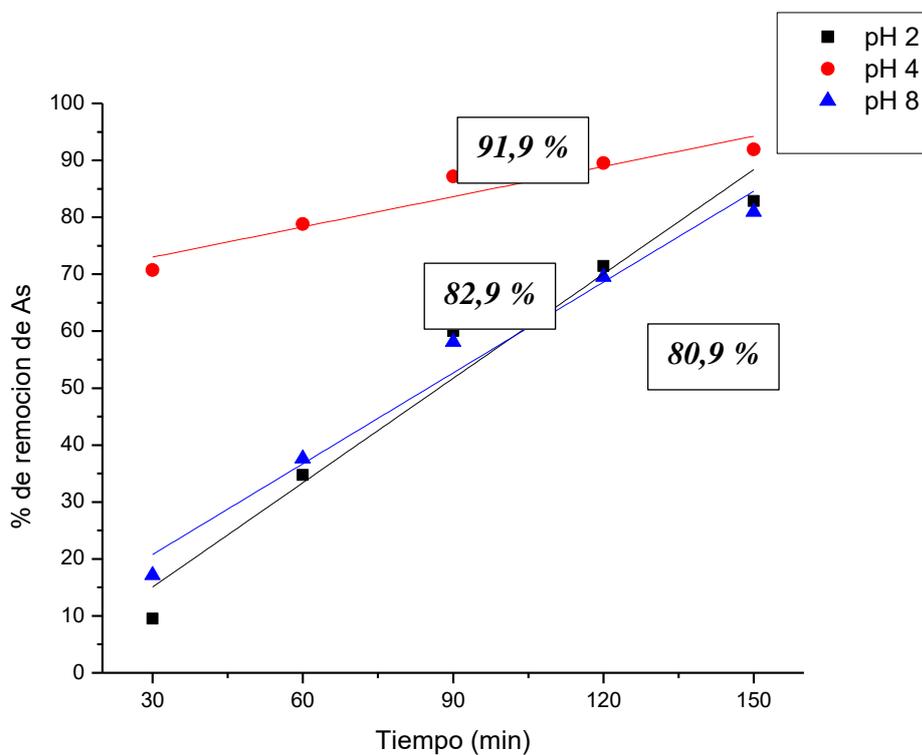


Gráfico 2-4 Efecto del % remoción de arsénico con respecto al tiempo a distintos niveles de pH 2, 4 y 8

Realizado por: Fernández C. 2021

4.4.1. Efecto del tiempo de contacto

El efecto del tiempo con respecto a la concentración a distintos niveles de pH (Fig. 8), se evaluó mediante la ejecución de 3 repeticiones a pH 2, 4, 8, con 5 muestras cada 30 minutos y una concentración inicial de 0,7 ppm, los pH 2 y 8 presentan similar cinética observando que a los primeros 30 minutos su disminución de la concentración es de 0,7 ppm a 0,63 ppm y 0,58 ppm, a los 150 minutos la degradación de la concentración llega a 0,12 ppm en los dos pH, a diferencia del pH 4 que a los primeros 30 minutos la remoción de arsénico es de 0,7 ppm a 0,2 ppm, a los 150 minutos la remoción de arsénico, llega a 0,06 ppm logrando estar en los límites permisibles.

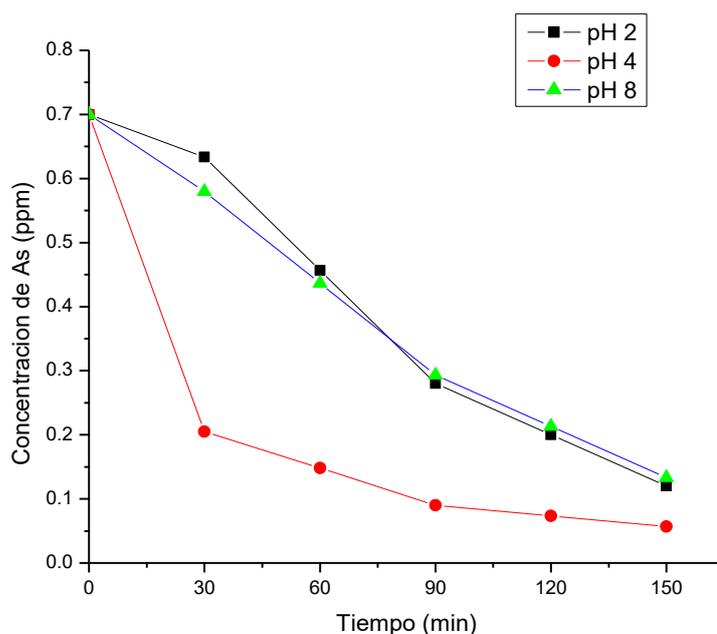


Gráfico 2-4: Efecto del tiempo de remoción con respecto a la concentración de arsénico a distintos niveles de pH.

Realizado por: Fernández C. 2021

4.4.2. Cinética de remoción

Se determinó la cinética en función del pH, para lo cual se determinó la concentración de arsénico, cada 30 minutos durante 2 horas y 30 minutos, variando el pH de 2, 4 y 8, con el ajuste de la cinética se obtuvo que el coeficiente de regresión para el pH 2 es de 0,918, para pH 8 de 0,920. Por último, se obtuvo una mejor cinética al pH 4 teniendo un coeficiente de regresión de 0,9871; siendo el más lineal de los 3 niveles de pH (Fig. 9).

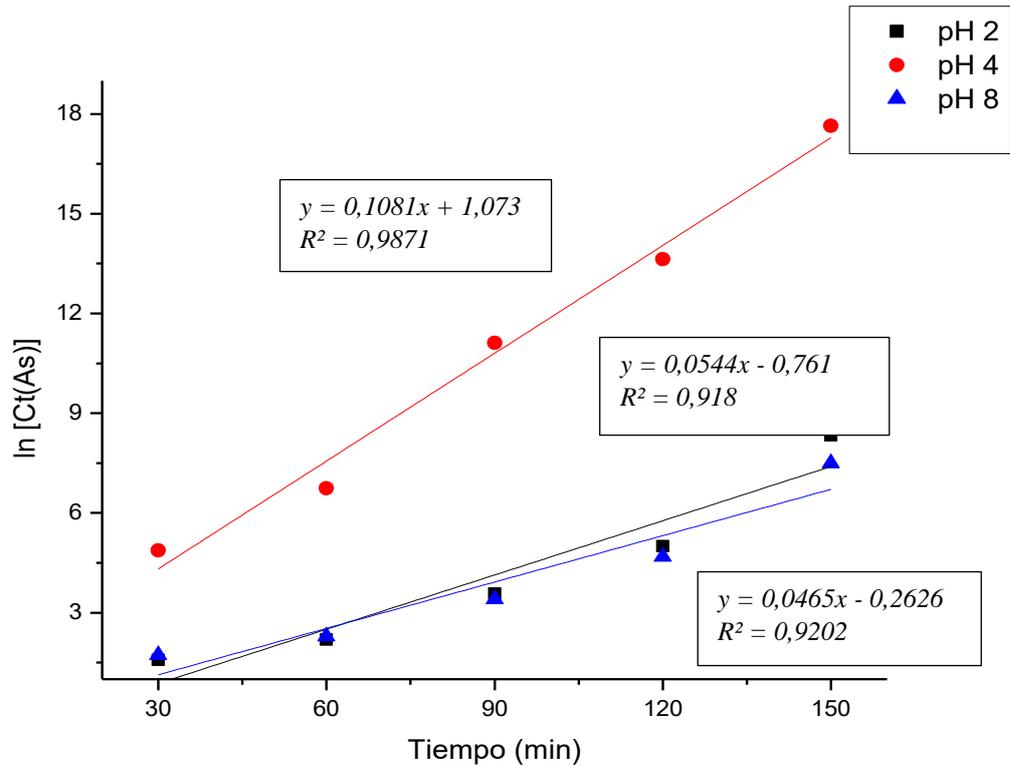


Gráfico 3-4: Cinética de remoción de arsénico con respecto al tiempo, en aguas residuales metalúrgicas

Realizado por: Fernández C. 2021

4.5. Pruebas estadísticas mediante STATGRAPHICS Centurión XVI Versión 16.1.11

La Tabla 8 indica los resultados de las pruebas estadísticas elaboradas por statgraphics, que se realizó a las concentraciones de arsénico durante la remoción en distintos tiempos hasta llegar al equilibrio, las muestras fueron de agua residual metalúrgica, a distintos niveles de pH 2, 4 y 8.

Tabla 4-4 Pruebas estadísticas realizadas a las muestras de aguas residuales previamente removidas de arsénico a varios niveles de pH, en diferentes tiempos.

Tiempo	pH	Recuento	Promedio	Desviación Estándar
30	2	3	0,633	0,031
	4	3	0,197	0,021
	8	3	0,580	0,070
60	2	3	0,457	0,019
	4	3	0,148	0,023

	8	3	0,437	0,094
	2	3	0,280	0,017
90	4	3	0,090	0,026
	8	3	0,293	0,121
	2	3	0,200	0,013
120	4	3	0,073	0,033
	8	3	0,213	0,108
	2	3	0,120	0,026
150	4	3	0,057	0,040
	8	3	0,133	0,095

Realizado por: Fernández C. 2021

Mediante el programa estadístico se obtuvo un resumen de resultados para las repeticiones de las muestras de agua residual hidrometalúrgica a distintos niveles de pH, se realizó una tabla para cada tiempo de muestro, el recuento suma el número de datos para ese valor del tiempo a distintos niveles de pH, el promedio que básicamente es la suma de esos valores entre el número de datos para cada valor de tiempo, nos muestra también lo que es el recuento, promedio y la desviación estándar.

La desviación estándar indica la dispersión de los datos, esta es mayor cuando la desviación estándar es mayor, se puede observar que en la (Tabla 8), el pH 8 tiene una mayor desviación estándar esto indica que sus datos están muy dispersos o no siguen una tendencia, de ahí el pH 4 solo indica menor desviación estándar al minuto 30, pero en su dispersión es no existe gran significancia., también se realizó el grafico de cajas y bigotes (Fig. 10), se observa la agrupación de datos para cada valor de pH. Vemos que las concentraciones de arsénico en el nivel de pH 4 son menores a los demás valores de pH 2 y 8.

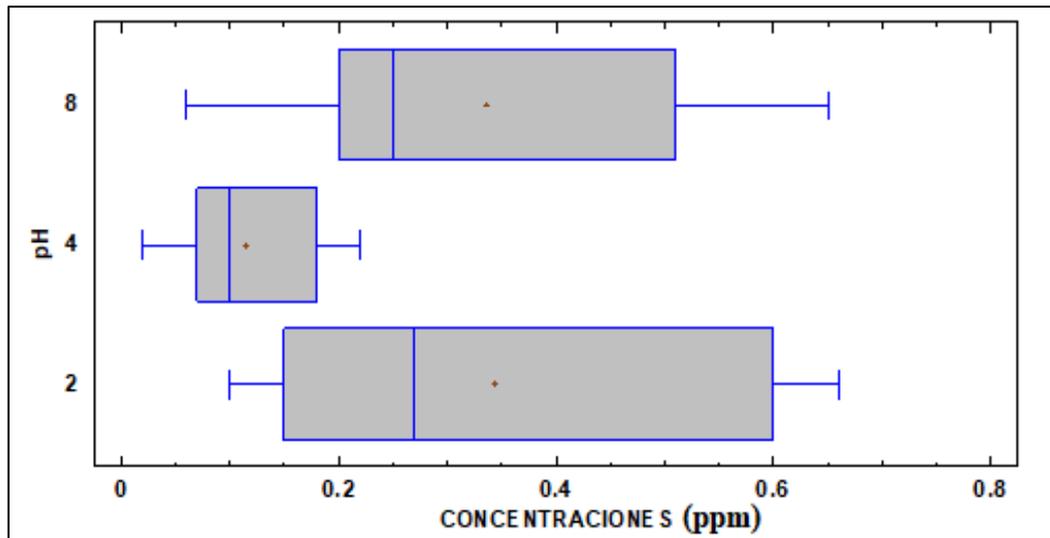


Gráfico 4-4 Grafico de caja y bigotes de la concentración final de arsénico después del proceso de remoción electroquímica de las muestras de aguas residuales de la planta de beneficio FranRomec

Realizado por: Fernández C. 2021

4.6. Discusión

Liu et al., (2019) realizó la investigación sobre la adsorción electroquímica de arsénico en aguas residuales mineras, con un sistema de electrodos simétricos, el electrodo es de birnessita este se utilizó como ánodo y cátodo, papel filtro como contraelectrodo, por dos métodos: a circuito abierto y sin inversión de voltaje de celda; la celda electroquímica trabajó bajo condiciones como 1,2 V durante 24 horas, la concentración inicial de arsénico fue de 4,70 ppm a 0,10 ppm la concentración final, las concentraciones de arsénico se disminuyeron en las primeras 8 horas, la remoción de arsénico a un circuito abierto es de 73,50 % y sin inversión de voltaje de celda 90,10 % de remoción de arsénico.

Rosa et al., (2017) su investigación consistió en la eliminación electroquímica mejorada de arsénico y metales pesados de desechos de mina, se trabajó con electrodos de grafito estos se utilizaron como ánodo y cátodo, la variable intensidad de corriente fue de 800 mA a 12 horas de extracción, para la remediación de arsénico se evaluaron varias variables y obtener el porcentaje máximo de remoción, primero se evaluó la influencia de la corriente eléctrica variando de 0 a 800 mA, dando una remoción de 33,65 %; luego la influencia de la proporción líquido a sólido dando una remoción de 60 %; finalmente se evaluó la influencia del tiempo de extracción el mismo que alcanza un porcentaje de remoción más alto siendo 71,61 %, durante 12 horas.

La presente investigación tiene como tema Remoción electroquímica de arsénico en aguas residuales de procesos de plantas metalúrgicas en el cantón Camilo Ponce Enríquez, en este trabajo se utilizó el equipo T-NEC, es una celda electroquímica que está equipada con un electrodo de hierro, se realizaron 3 repeticiones variando el pH de medio a 2, 4 y 8; la toma de muestra se la realizo cada 30 minutos durante 2.5 horas; las muestras de aguas residuales metalúrgicas tuvo una concentración inicial de 0,7; a pH 4 se obtuvo mejor porcentaje de remoción obteniendo un 91,90 % llegando a una concentración final de 0,06 ppm, este valor llega a los límites permisibles según la norma ecuatoriana, esta técnica en comparación de los estudios anteriores resulto tener mejor porcentaje de remoción en menor tiempo de contacto.

CAPÍTULO V

5. PROPUESTA

5.1. Cálculos Ingenieriles empleados a la planta de beneficio Franco Romero & Castro (FranRomec)

Para el siguiente apartado se empleó cálculos ingenieriles como balances de materia y energía a la planta de beneficio, con el fin de obtener la cantidad aproximada de agua que se obtiene por semana de trabajo, para ello se realizó un diagrama de proceso con entradas y salidas de material + agua, (Fig. 11).

TMD= Tonelada de material diario

TAD= Tonelada de agua diario

TRD= Tonelada de residuo diario

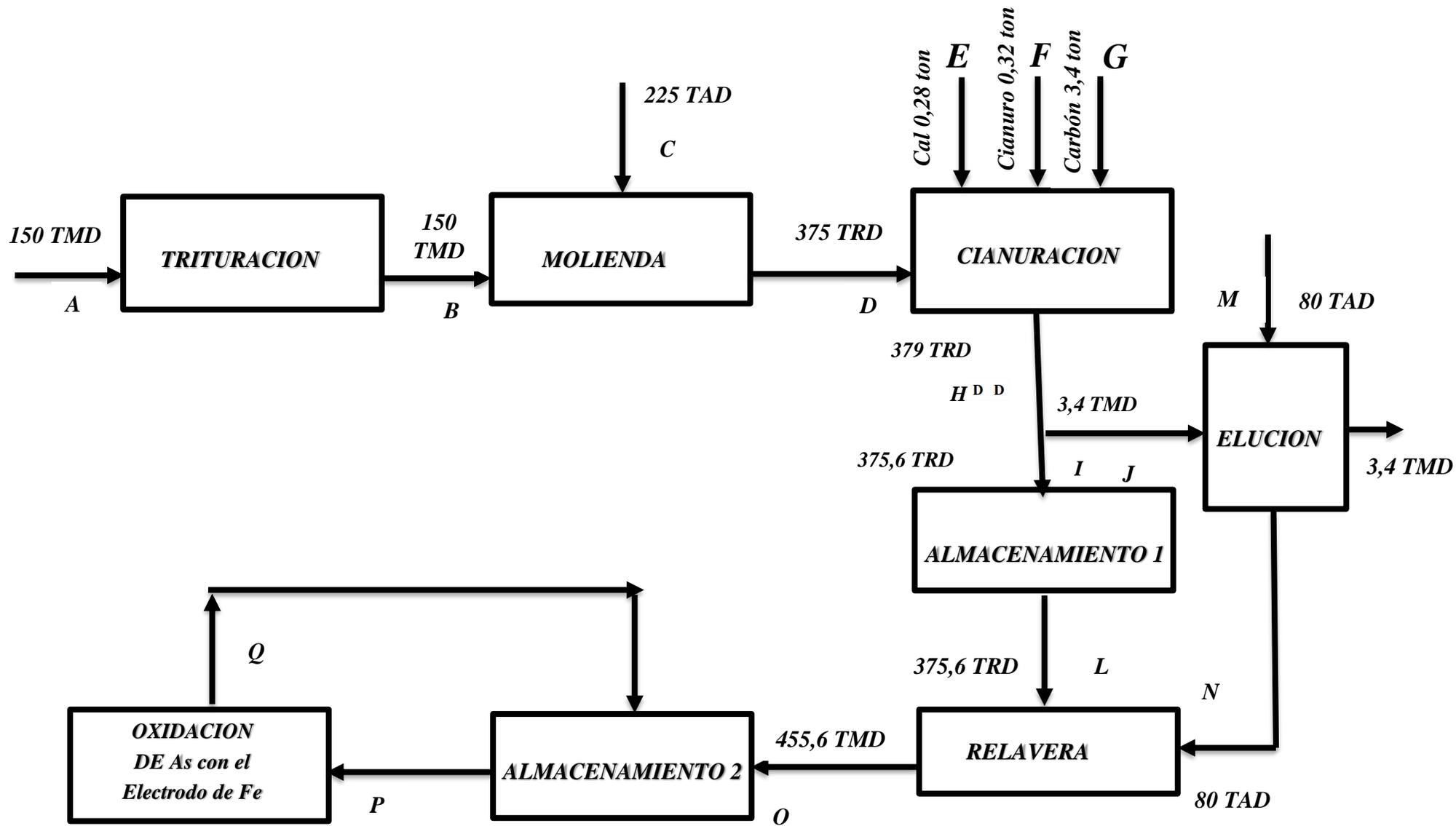


Figura 1-5 Diagrama de proceso de la Planta de Beneficio Franco Romero & Ca.

Realizado por: Fernández C. 2021

5.1.1. Balance de materia de la planta de beneficio Franco Romero & Castro

- Por lo general ingresan 150 toneladas de material diarios, cabe recalcar que el material está comprendido un 40 % de sólido y 60 % de agua. El material triturado entra al molino junto con agua para obtener la pulpa con la granulometría correspondiente:

$$B + C = D$$
$$150 + 225 = 375$$
$$375 \text{ TRD}$$

- El material ya obtenido de los molinos pasa a los tanques de cianuración donde se le añade cal, cianuro de potasio y carbón activado, esta sección cuenta con 4 tanques de cianuración.

$$D + E + F + G = H$$
$$375 + 0,28 + 0,32 + 3,4 = 379$$
$$379 \text{ TMD}$$

- Completado el proceso de cianuración, la parte sólida que comprende a 3,4 ton de carbón activado pasa al proceso de elusión, mientras que la parte líquida pasa a los tanques de almacenamiento, el proceso de elusión está comprendido por 4 tanques, del carbón activado; para mejor trabajo tomaremos la salida que corresponde al oro como despreciable, terminado el proceso se añade agua para lavar los tanques lo que corresponde a 80 ton.

$$J + M = N + K$$
$$3,4 + 80 = N + 3,4$$
$$N = 80$$
$$80 \text{ TDA}$$

- La pulpa obtenida del proceso de cianuración pasa por el tanque de almacenamiento, finalmente los residuos se depositan en la relavera junto con el agua utilizada en el proceso de elución:

$$L + N = O$$
$$375,6 + 80 = O$$
$$375,6 + 80 = 455,6 \text{ ton}$$

- La relavera almacena una cantidad aproximada de 455,6 ton la misma que está constituida por 40 % de sólidos y 60 % de líquidos, se necesita pasar toda la cantidad

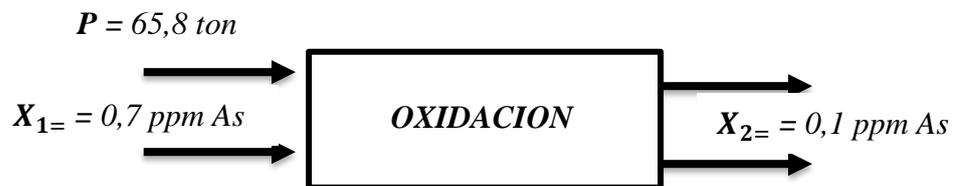
de agua al tanque de almacenamiento y el sólido se queda en la relavera, para ello se sacara los siguientes resultados y culminar con el proceso de oxidación.

a. Toneladas de agua		b. Toneladas de material	
455,6 ton	100%	455,6 ton	100%
x	60%	x	40%
x= 273,36-ton		x= 182,4 ton	

- Para culminar con el proceso los 455,6 ton de agua residual se la fracciono por 7 días con un total de 65,8 ton/día aproximadamente, después de obtener la cantidad exacta de agua se la traslada al tanque de almacenamiento y posterior al tanque de oxidación mediante recirculación con la ayuda del equipo NEC – 10 000, con el fin de remover la cantidad de arsénico presente en el medio.

5.1.2. Balance de materia del proceso de oxidación

- Para el ensayo se utilizará 65,8 ton/día de agua residual, el producto de relave minero contiene una concentración de arsénico de 0,7 ppm. Esta muestra alimentara un equipo de oxidación que trabajara con una diferencia de potencial eléctrico de 120 v a 5 A de corriente eléctrica. Basado en información previa el agua residual está constituida por 40 % de sólidos y 60 % de líquidos. Si se desea obtener finalmente un efluente con una concentración de arsénico de 0,05 ppm, se trabaja según el siguiente esquema:



- La cantidad de lodo obtenido será:
Convertir toneladas a litros

$$65.8 \text{ ton metricas} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton metrica}} = 65800 \text{ kg}$$

Con la utilización de la densidad del agua:

$$d = \frac{m}{v} \rightarrow v = \frac{65800 \text{ kg}}{1 \text{ kg/L}} = 65800 \text{ L}$$

Cantidad de lodo y agua obtenida:

a. Litros de agua		b. Kilogramos de lodo	
65800 L	100%	65800 kg	100%
x	60%	x	40%
x= 39480 L de agua		x= 26320 kg de lodo	

- La cantidad de lodo pasa a la relavera municipal y la cantidad de agua pasa por el equipo para realizar la remoción de arsénico.

$$\Delta X = X_F - X_W = 0,7 \text{ ppm} - 0,05 \text{ ppm} = 0,65 \text{ ppm}$$

- Conociendo la cinética (velocidad) de remoción promedio de arsénico (3800 ppm cada 24 horas) producida por el equipo, esto da el tiempo teórico aproximado de abatimiento del contaminante por 100 litros de muestra.

$$0,65 \text{ ppm} \cdot \frac{24 \text{ h}}{3800 \text{ ppm}} = 0,0041 \text{ h}$$

$$39480 \text{ L} \cdot \frac{0,0041 \text{ h}}{100 \text{ L}} = 1,62 \text{ h}$$

5.1.3. Balance de energía para estimar el aumento de temperatura

- Conociendo las condiciones de voltaje (120 V) y de amperaje (5 A), en que trabaja la celda electroquímica, se podrá conocer la potencia eléctrica (P) empleada en la remoción, utilizando la ley de Watt:

$$P = I \times V$$

$$P = (5 \text{ A}) \times (120 \text{ V})$$

$$P = 600 \text{ W} = 600 \text{ Joules/seg}$$

- Esta potencia eléctrica, se traduce como un trabajo eléctrico. Considerando al equipo como un sistema adiabático, en donde el trabajo eléctrico se convierte totalmente en calor (Q) de remoción, mientras dure, el tiempo del ensayo será:

$$Q = 1,62 \text{ h} \times \frac{3600 \text{ seg}}{1 \text{ h}} \times \frac{600 \text{ joules}}{1 \text{ seg}} = 3\,499\,200 \text{ Joules}$$

- Que corresponde a la cantidad de energía recibida por los 39480 L de alimentación, siendo en su mayor composición agua, que conforme a los resultados la masa de este volumen sería aproximadamente 26320 kg. Finalmente, la variación de temperatura estará dada por:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot C_p} \times \frac{3\,499\,200 \text{ joules}}{(26320 \text{ kg}) (4186 \frac{\text{joules}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}})} = 0,32 \text{ }^\circ\text{K} = 0,32 \text{ }^\circ\text{C}$$

Este cambio de temperatura para fines prácticos es despreciable y no constituye un riesgo para el ensayo.

Para el presente estudio se realizó una serie de investigaciones para poder lograr el objetivo planteado, se pretende emplear un equipo para depurar arsénico de las aguas residuales mineras, el T-NEC es un equipo de tecnología alemana, en su interior se encuentra un electrodo de hierro, se escogió este elemento como electrodo debido a que el hierro estabiliza la oxisal Arseniato férrico y en el punto de vista económico es más barato como metal, a inicios del 2021 el precio de la libra de hierro cuesta unos \$0.08 la libra. La compañía NECON ha creado de manera industrial el NEC 10 000 este equipo es mucho más grande del que se utilizó en la investigación, este tipo de equipo puede depurar 25 m³/h de agua residual, y es utilizado en industrias, agricultura entre otros, tiene un valor de \$ 60 000 y cuenta en su interior con 10 electrodos en paralelo, cada uno tiene un peso de 1,40 kg.

Para estimar el desgaste de los electrodos se debe tomar en cuenta la cantidad de agua diaria que se requiere depurar, según la investigación la planta de beneficio genera aproximadamente 39 480 L/día de agua residual, en promedio se necesita 1 gramo de electrodo para depurar 1000 litros de agua con arsénico, el equipo puede llegar a depurar 14 000 000 L de agua, por ende estos electrodos se desgastarían y se requiere reemplazarlos, por lo mismo se ha estimado un tiempo de vida de 1 año, el cambio de electrodos y mantenimiento del equipo tiene un valor aproximadamente \$2000.

Para estimar el consumo de energía eléctrica del equipo durante todo el proceso se puede calcular a partir de la ecuación:(El-Taweel et al. 2015)

$$kWh = \frac{E I t}{(C_0 - C_t)V}$$

E= Voltaje de la celda (Voltios)

I= Corriente (A)

t= Tiempo de electrocoagulación (h)

C₀ = Concentración inicial (mg/L)

C_f = Concentración final (mg/L)

V= Volumen del agua a tratar (L)

$$kWh = \frac{(120 V) * (5 A) * (1.62 h)}{(0.7 - 0.06) \text{ mg/L} * (39480 L)} = 0.04 \text{ kWh/g}$$

Para determinar el consumo de hierro diario se consideró que 1 g de electrodo de este metal, se necesita para depurar 1000 L de agua con As a una concentración inicial de 0,7ppm, en este caso se depuraría 39 480 L/día de agua, al día se consumiría 39,48 g de hierro del electrodo, y en total de energía que consumiría el equipo es de 1,57 kWh.



Figura 1-5: Equipo NEC 10 000

Realizado por: Fernández C. 2021

Especificaciones del equipo

- Velocidad de flujo: máx. 20 m³/h
- Filtro de cartucho: 16 unds./5 μ
- Filtro de carbono: 2 unds.
- Peso neto: 572 kg
- Medidas (Largo x Ancho x Alto mm) : 2220 x 1190 x 1840
- 230 V; < 5 kW incl. la bomba integrada estándar; elección de 50 o 60 Hz. (bomba)
- Entrada / salida: acopladores de manguera tipo/tamaño "Storz-B"

El proceso de remoción de arsénico con el equipo T-NEC tuvo un porcentaje de remoción de 91,40 %; logrando depurar arsénico hasta 0,06 ppm que es lo más cercano a los límites permisibles según la norma ecuatoriana, en la Tabla 9 se puede apreciar los demás procesos convencionales y si resultan ser mejores que el planteado.

Tabla 1-5: Procesos convencionales para la remoción de arsénico de aguas.

<i>Proceso</i>	<i>pH</i>	<i>Tiempo de remoción</i>	<i>% Remoción</i>	<i>Co y Cf de arsénico</i>	<i>Referencias</i>
<i>Precipitación química</i>	2	2 horas	99% As(III) 84% As(V)	1 ppm 0.07 ppm	(Ostermeyer et al. 2021)
<i>Fitorremediación</i>	6.7 – 7.2	21 días	31.0 a 73.3%	10 ppm 4.9 ppm	(Rai 2021)
<i>Electrocoagulación</i>	8.2	60 min	90%	1 ppm 0.1 ppm	(Oza, Anantha Singh, y Sasikumar Jampa 2021)
<i>Presente investigación</i>	4	1,62 horas	91.40 %	0.7 ppm 0.06 ppm	

Realizado por: Fernández C. 2021

CONCLUSIONES

- Para esta investigación se utilizó el equipo T-NEC la cual contiene una celda electroquímica y está integrado un electrodo de hierro, el mismo que ayuda a depurar aguas contaminadas mediante procesos de óxido-reducción, transforma el arsénico del medio a un estado no tan toxico para el medio ambiente, el consumo máximo de energía que se puede suministrar al equipo es de 28 V, las variables de operación a tener en cuenta son pH y tiempo de remoción.
- Para verificar la efectividad del equipo se realizó un ensayo en agua sintética a una concentración de 2 ppm de arsénico con pH de 2, 4 y 8; en los resultados se observa una mayor remoción de arsénico es a pH 4 cuya concentración final es 0 ppm, después de probar su efectividad se realizó el ensayo en muestras de agua residual minera provenientes de la planta de beneficio FranRomec, estas tuvieron una concentración inicial de arsénico de 0,7 ppm, se las trabajo en series de 3 repeticiones a los 3 niveles de pH, de cada repetición se obtuvo una muestra cada 30 minutos hasta tener 5 muestras para luego ser analizadas mediante la técnica de espectroscopia de absorción atómica. Se puede observar en la sección de resultados que a pH 4 se obtuvo una mejor degradación de arsénico, el cual llego a un valor de 0,06 ppm, este valor es aceptable según lo descrito en la norma ecuatoriana. Los valores de pH de 2 y 8 no alcanzaron el rango máximo permisible en aguas residuales ya que su degradación fue más lenta o simplemente se necesitaría más tiempo de remoción.
- Con los valores de concentración de arsénico finales descritos anteriormente podemos decir que este proceso efectivamente logra un porcentaje de remoción mayor a 85 %, según los resultados demostrados a un pH 4 se obtiene un porcentaje de remoción de 91,9 %.
- Según los datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio queda demostrado que se puede implementar el equipo a escala industrial en la planta de beneficio, estos cálculos arrojaron que, para una cantidad de agua de 39480 L con una concentración de arsénico de 0,7 ppm, es posible implementar el NEC 10000, este equipo es un prototipo a escala industrial del T-NEC, del mismo se puede obtener un producto final con una concentración de As de 0,05 ppm el tiempo en el cual el agua debe recircular por el equipo es alrededor de 1,62 horas.

RECOMENDACIONES

- Se puede sugerir a futuras investigaciones la utilización del equipo NEC 10000, este equipo es un prototipo del T-NEC, pero nivel industrial, trabaja con 10 electrodos de hierro, siendo 10 veces más eficaz que el T-NEC.
- Se sugiere trabajar con pH normal del agua y comprobar si efectivamente con el equipo NEC 10000, tiene un porcentaje de remoción mayor a 85% y llega a los límites permisibles según la norma ecuatoriana.
- Se sugiere seguir con investigaciones utilizando otro tipo de elemento como electrodo y evaluar la eficacia en el porcentaje de remoción mediante el método propuesto.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, Arslan, y Prosun Bhattacharya. 2019. «Arsenic in Drinking Water: Is 10 µg/L a Safe Limit?» Current Pollution Reports 5(1):19-21. doi: 10.1007/s40726-019-0102-7.*
- Alarcon, Maria ; Llorens, Esther; Poch Manel. 2012. Remocion de arsenico en agua de consumo humano en latinoamericana. Primera. editado por M. L. Carrasco. Chihuahua.*
- Albis Arrieta, Alberto Ricardo, Alexandra Judith López Rangel, y María Cecilia Romero Castilla. 2017. «Removal of methylene blue from aqueous solutions using cassava peel (Manihot esculenta) modified with phosphoric acid // Remoción de azul de metileno de soluciones acuosas utilizando cáscara de yuca (Manihot esculenta) modificada con ácido fosfórico». Prospectiva 15(2):60-73. doi: 10.15665/rp.v15i2.777.*
- Alka, Sadiya, Shafinaz Shahir, Norahim Ibrahim, Tsun Thai Chai, Zaratulnur Mohd Bahari, y Fazilah Abd Manan. 2020. «The role of plant growth promoting bacteria on arsenic removal: A review of existing perspectives». Environmental Technology and Innovation 17:100602. doi: 10.1016/j.eti.2020.100602.*
- Alvarado Vélez, Julio A., y Nasser Rebaï. 2018. «Minería y vulnerabilidad de los territorios rurales en los Andes ecuatorianos: evidencias desde la provincia del Azuay». Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 27(2). doi: 10.15446/rcdg.v27n2.66062.*
- Andueza, Felix. 2020. «Aislamiento e identificación de bacterias nativas biodegradadoras de cianuro y arsénico presente en relaves mineros de oro.» Universidad Central del Ecuador.*
- Anón. 2020. «Camilo Ponce Enríquez, Google Maps». 1. Recuperado (<https://www.google.com.ec/maps/place/Camilo+Ponce+Enríquez/@-3.0605351,-79.7561122,6261m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x90331ff0c501c>).*
- Atariguana, Diana. 2020. «“La minería ilegal y el impacto ambiental en el cantón Camilo Ponce Enríquez provincia del Azuay periodo 2007-2018». Uniersidad de Guayaquil.*
- Batanero, Carmen; Diaz, Carmen. 2008. Analisis de datos con Statgraphics. Vol. 53. editado por S. L. La Gioconda. Granada.*
- Camacho, Andrea ; Peña, Steven. 2021. «Facultad de ciencias químicas y de la salud carrera de ciencias médicas». Universidad Tecnica de Machala.*
- Carrera, Perez, y Fernández Cirelli. 2004. «Niveles de arsénico y flúor en agua de bebida animal en establecimientos de producción lechera (Pcia. de Córdoba, Argentina)». 6(1):51-59.*

- Chata Quenta, Ayde. 2015. «Presencia de metales pesados (Hg, As, Pb y Cd) en agua y leche en la cuenca del río Coata 2015».
- Chou, Selene. 2013. «Arsenic Toxicity». Encyclopedia of Metalloproteins 143-143. doi: 10.1007/978-1-4614-1533-6_100120.
- Duque, Anabell. 2016. «Evaluación de la degradación de arsénico con cepas bacterianas aisladas de relaves mineros, en el Cantón Ponce Enríquez». Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- El-Taweel, Yehia A., Ehssan M. Nassef, Iman Elkheriany, y Doaa Sayed. 2015. «Removal of Cr(VI) ions from waste water by electrocoagulation using iron electrode». Egyptian Journal of Petroleum 24(2):183-92. doi: 10.1016/j.ejpe.2015.05.011.
- Emmanuel, Bamidele, Elizabeth Makhatha, y Willie Nheta. 2019. «A review of lanthanum nanoparticles impregnated compound arsenic fixation behaviour in copper aqueous solution». Energy Procedia 157:966-71. doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.263.
- Gallegos, Wilma, María Vega, y Paco Noriega. 2012. «Espectroscopía de absorción atómica con llama y su aplicación para la determinación de plomo y control de productos cosméticos». La Granja 15(1):19. doi: 10.17163/lgr.n15.2012.02.
- Guerra, Martha, y David Zaldumbide. 2010. «La agonía del Puyango: agua, minería y contaminación». Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales (7):35-36. doi: 10.17141/letrasverdes.7.2010.885.
- Gutiérrez-Vargas, Gildardo, Alberto Ruiz, Víctor H. López-Morelos, Jin Yeon Kim, Jorge González-Sánchez, y Ariosto Medina-Flores. 2021. «Evaluation of 475 °C embrittlement in UNS S32750 super duplex stainless steel using four-point electric conductivity measurements». Nuclear Engineering and Technology (xxxx). doi: 10.1016/j.net.2021.03.018.
- He, Yingran, Yu Pan Tang, Dangchen Ma, y Tai Shung Chung. 2017. «UiO-66 incorporated thin-film nanocomposite membranes for efficient selenium and arsenic removal». Journal of Membrane Science 541(July):262-70. doi: 10.1016/j.memsci.2017.06.061.
- Hermosillo-Muñoz, Milton Carlos, María Cecilia Valles-Aragón, María de Lourdes Ballinas-Casarrubias, Beatriz Adriana Rocha-Gutiérrez, y Jesús Alejandro Prieto-Amparan. 2019. «Traceability of arsenic in agricultural irrigation water from center-south of Chihuahua State, Mexico». Revista Internacional de Contaminacion Ambiental 35(Special Issue 3):81-91. doi: 10.20937/RICA.2019.35.esp03.10.
- Huang, Hsin Hsiung. 2016. «The Eh-pH diagram and its advances». Metals 6(1). doi:

10.3390/met6010023.

- Jasrotia, Shivakshi, Arun Kansal, y Aradhana Mehra. 2017. «Performance of aquatic plant species for phytoremediation of arsenic-contaminated water». *Applied Water Science* 7(2):889-96. doi: 10.1007/s13201-015-0300-4.
- Leão, Gabriela Alves, Juraci Alves de Oliveira, Rafaella Teles Arantes Felipe, y Fernanda Santos Farnese. 2017. «Phytoremediation of arsenic-contaminated water: The role of antioxidant metabolism of *Azolla caroliniana* willd. (salviniales)». *Acta Botanica Brasílica* 31(2):161-68. doi: 10.1590/0102-33062016abb0407.
- Liu, Lihu, Wenfeng Tan, Steven L. Suib, Guohong Qiu, Lirong Zheng, y Shiming Su. 2019. «Enhanced adsorption removal of arsenic from mining wastewater using birnessite under electrochemical redox reactions». *Chemical Engineering Journal* 375(April):122051. doi: 10.1016/j.cej.2019.122051.
- Liu, Zhong Gang, y Xing Jiu Huang. 2014. «Voltammetric determination of inorganic arsenic». *Trends in Analytical Chemistry* 60:25-35. doi: 10.1016/j.trac.2014.04.014.
- Lobo, C., ; E Colman Lerner, ; N Bertola, y ; N Zaritzky. 2017. «Cinética de la remoción de Arsénico en aguas de consumo utilizando partículas de quitosano con iones férrico». III Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Ambiental.
- Londoño Franco, Luis Fernando, Paula Tatiana Londoño Muñoz, y Fabián Gerardo Muñoz García. 2016. «Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal». *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 14(2):145. doi: 10.18684/bsaa(14)145-153.
- López, Erika, y Carlos Galán. 2013. «Cuantificación de arsénico(III) con beta-ciclodextrina por voltamperometría de redisolución anódica». *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*.
- López, M., M. T. Alarcón, J. R. Irigoyen, L. A. Torres, y Liliana Reynoso. 2019. «Simultaneous removal of fluoride and arsenic from well water by electrocoagulation». *Science of the Total Environment* 678:181-87. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.400.
- Medina, María., Pamela Robles, Mónica Mendoza, y Celeste Torres. 2018. «Ingesta de arsénico: El impacto en la alimentación y la salud humana». *Rev Peru Med Exp Salud Publica* 35(1):93-102. doi: 10.17843/rpmesp.2018.351.3604.93.
- Mero, Paúl Carrión, Gricelda Herrera Franco, Josué Briones, Pablo Caldevilla, María José Domínguez-Cuesta, y Edgar Berrezueta. 2018. «Geotourism and local development based on geological and mining sites utilization, Zaruma-Portovelo, Ecuador». *Geosciences*

(Switzerland) 8(6). doi: 10.3390/geosciences8060205.

Ministerio del Ambiente. 2015. «*Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria. Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes : Recurso Agua, Libro 6, Anexo 1 “Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes : Recurso Agua”*». 1-40.

Moussout, Hamou, Hammou Ahlafi, Mustapha Aazza, y Hamid Maghat. 2018. «*Critical of linear and nonlinear equations of pseudo-first order and pseudo-second order kinetic models*». *Karbala International Journal of Modern Science* 4(2):244-54. doi: 10.1016/j.kijoms.2018.04.001.

NECON. 2012. «*NECON*». P. 3 en *NECON chemical-free water purification system*.

NECON. s. f. «*NEC-10000*».

Nicomel, Nina Ricci, Karen Leus, Karel Folens, Pascal Van Der Voort, y Gijs Du Laing. 2015. «*Technologies for arsenic removal from water: Current status and future perspectives*». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13(1):1-24. doi: 10.3390/ijerph13010062.

Niemeier, R., y B. Dames. 1992. *NIOSH Recommendations for Occupational Safety and Health - DIANE Publishing Company - Google Books*.

Ostermeyer, Pieter, Luiza Bonin, Karel Folens, Florian Verbruggen, Cristina García-Timmermans, Kim Verbeken, Korneel Rabaey, y Tom Hennebel. 2021. «*Effect of speciation and composition on the kinetics and precipitation of arsenic sulfide from industrial metallurgical wastewater*». *Journal of Hazardous Materials* 409:124418. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124418.

Oza, Hemangi, T. S. Anantha Singh, y Surendra Sasikumar Jampa. 2021. «*Removal of arsenic from aqueous solution using combined ultrasonic and electrocoagulation process*». *Materials Today: Proceedings* 47(xxxx):728-32. doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.569.

Palazón, Irene; Gonzalez, Montserrat; Arroyo, Manuel. 2015. «*Revista del laboratorio clínico Amanitinas*». *Revista del Laboratorio Clínico* 8(1):92-96.

Pérez-López, Esteban, y Raquel Esquivel-Arias. 2018. «*Adecuación de metodologías para análisis de sodio y potasio por espectroscopía de absorción atómica, en sales de rehidratación oral*». *Revista Tecnología en Marcha* 31(2):40. doi: 10.18845/tm.v31i2.3623.

Quishpe, Ángela, y Alicia Guevara. 2020. «*Remoción de arsénico de efluentes líquidos de plantas de beneficio de oro y cuerpos hídricos, de la zona minera de Ponce Enríquez, por*

rizofiltración con pasto azul (Dactylis Glomerata)».

- Rai, Prabhat Kumar. 2021. «Heavy metals and arsenic phytoremediation potential of invasive alien wetland plants *Phragmites karka* and *Arundo donax*: Water-Energy-Food (W-E-F) Nexus linked sustainability implications». *Bioresource Technology Reports* 15(May):100741. doi: 10.1016/j.biteb.2021.100741.
- Ramón, Candelario, Juan Barajas, Germán Pérez, Miguel Hernández, y Laura Díaz. 2019. «Adsorption of copper (II) and cadmium (II) in aqueous suspensions of biogenic nanostructured CaCO_3 ». *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 58(1):2-13. doi: 10.1016/j.bsecv.2018.05.003.
- Romero Hugo, Vera Thalia, Redrovan Felipe, Jumbo Jennifer, Pesantez Fredis. 2019. «Aplicación De Voltamperometría De Redisolución Anódica Para La Determinación De Antimonio». *Revista de la Sociedad Química del Perú* 85(3):293-304. doi: 10.37761/rsqp.v85i3.247.
- Rosa, M. A., J. A. Egido, y M. C. Márquez. 2017. «Enhanced electrochemical removal of arsenic and heavy metals from mine tailings». *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 78:409-15. doi: 10.1016/j.jtice.2017.06.046.
- Roy, Madhumita, Ashok K. Giri, Sourav Dutta, y Pritam Mukherjee. 2015. «Integrated phytobial remediation for sustainable management of arsenic in soil and water». *Environment International* 75:180-98. doi: 10.1016/j.envint.2014.11.010.
- Song, Peipei, Zhaohui Yang, Guangming Zeng, Xia Yang, Haiyin Xu, Like Wang, Rui Xu, Weiping Xiong, y Kito Ahmad. 2017. «Electrocoagulation treatment of arsenic in wastewaters: A comprehensive review». *Chemical Engineering Journal* 317:707-25. doi: 10.1016/j.cej.2017.02.086.
- de Souza, Tamara Daiane, Alisson Carraro Borges, Amanda Fernandes Braga, Renato Welmer Veloso, y Antonio Teixeira de Matos. 2019. «Phytoremediation of arsenic-contaminated water by *Lemna Valdiviana*: An optimization study». *Chemosphere* 234:402-8. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.06.004.
- Super, Charles M. 1985. «Software reviews». *Journal of Pediatric Psychology* 10(2):271-73. doi: 10.1093/jpepsy/10.2.271.
- Syam Babu, D., y P. V. Nidheesh. 2020. «A review on electrochemical treatment of arsenic from aqueous medium». *Chemical Engineering Communications* 0(0):1-22. doi: 10.1080/00986445.2020.1715956.
- Teixeira, Mônica Cristina, Alcylane Caldeira Santos, Carla Silva Fernandes, y Jack Chakmeng

- Ng. 2020. «Arsenic contamination assessment in Brazil – Past, present and future concerns: A historical and critical review». *Science of the Total Environment* 730. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138217.
- Titah, Harmin Sulistiyaning, Mohd Izuan Effendi Bin Halmi, Siti Rozaimah Sheikh Abdullah, Hassimi Abu Hasan, Mushrifah Idris, y Nurina Anuar. 2018. «Statistical optimization of the phytoremediation of arsenic by *Ludwigia octovalvis*- in a pilot reed bed using response surface methodology (RSM) versus an artificial neural network (ANN)». *International Journal of Phytoremediation* 20(7):721-29. doi: 10.1080/15226514.2017.1413337.
- Tsibranska, I., y E. Hristova. 2011. «Comparison of different kinetic models for adsorption of heavy metals onto activated carbon from apricot stones». *Bulgarian Chemical Communications* 43(3):370-77.
- TULSMA Libro VI Anexo 1. 2011. «Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes : Recurso Agua». TULSMA Texto unificado de legislación secundaria del Ministerio del Ambiente 8-9.
- Unda, Javier. 2015. Instructivo autorizaciones plantas beneficio, fundicion de relaveras.
- Wang, Yongliang, Cuicui Lv, Li Xiao, Guoyan Fu, Ya Liu, Shufeng Ye, y Yunfa Chen. 2019. «Arsenic removal from alkaline leaching solution using Fe (III) precipitation». *Environmental Technology (United Kingdom)* 40(13):1714-20. doi: 10.1080/09593330.2018.1429495.

ANEXOS

Anexo A: Equipamiento del T-NEC



Anexo B: Resultados de los análisis de las muestras de agua sintética.

	LABORATORIO DE ENSAYOS FISICOS-QUIMICOS Y MICROBIOLÓGICOS INFORME DE ENSAYOS N° WE-0969-005-21 ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA	
---	---	---

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA
MACHALA
JORGE ALVAREZ
0997954613

Guayaquil, 02 de julio del 2021

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Origen de Muestra:	AGUA RESIDUAL	Muestreado por:	CLIENTE
Punto de Muestreo:	M. SIN	Muestreador:	CLIENTE
Coordenadas Geográficas:	N/A	Fecha y Hora de Muestreo:	30/06/21 12:00:00
Tipo de Muestreo:	Simple	Condiciones Ambientales del Muestreo:	N/A
Código de la Muestra:	0969-002-21	Fecha y Hora de Recepción de Muestras:	30/06/21 15:30:00
Norma Técnica de Muestreo:	N/A	Condiciones Ambientales del Análisis:	21.9 °C ; 61.8 %HR
Plan/Procedimiento de Muestreo:	N/A / N/A		

RESULTADOS

METALES

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U K=2	PROCEDIMIENTO	MÉTODO	ANALIZADO	LÍMITE PERMISIBLE	EVALUACIÓN
ARSENICO ³	2.0535	mg/L	0.0561	PEE.EL.071	SM 3113 B	2021-07-01 L. AVECILLAS	—	—

1. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
2. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
3. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
4. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
5. Parámetros acreditados cuyo resultado está fuera del alcance de acreditación del SAE
6. Parámetros cuyo resultado corresponde al análisis realizado por el laboratorio acreditado subcontratado
7. Las opiniones e interpretaciones se encuentran fuera del alcance del SAE y A2LA
8. Ensayo realizado en las instalaciones del cliente

---	No Aplica	U	Incertidumbre	PEE.EL	Procedimiento Especifico de Ensayo de Elicrom			
< LD	Menor al Límite de Detección	N/D	No detectado	SM	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 23rd Ed.			

DESVIACIONES DEL PROCEDIMIENTO

No se presentó ninguna desviación del procedimiento durante el muestreo y el análisis.

OBSERVACIONES

Muestra suministrada por el cliente. Los resultados se aplican a la muestra como se la recibió.

DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD

No Aplica



LABORATORIO DE ENSAYOS FISICOS-QUIMICOS Y MICROBIOLÓGICOS
INFORME DE ENSAYOS
N° WE-0969-005-21
ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS
FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA



IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA
MACHALA
JORGE ALVAREZ
0997954613

Guayaquil, 02 de julio del 2021

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Origen de Muestra:	AGUA RESIDUAL	Muestreado por:	CLIENTE
Punto de Muestreo:	M. SIN PH2 M5	Muestreador:	CLIENTE
Coordenadas Geográficas:	N/A	Fecha y Hora de Muestreo:	30/06/21 12:00:00
Tipo de Muestreo:	Simple	Condiciones Ambientales del Muestreo:	N/A
Código de la Muestra:	0969-005-21	Fecha y Hora de Recepción de Muestras:	30/06/21 15:30:00
Norma Técnica de Muestreo:	N/A	Condiciones Ambientales del Análisis:	21.9 °C ; 61.8 %HR
Plan/Procedimiento de Muestreo:	N/A / N/A		

RESULTADOS

METALES

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U K=2	PROCEDIMIENTO	MÉTODO	ANALIZADO	LÍMITE PERMISIBLE	EVALUACIÓN
ARSENICO ³⁺	0.0055	mg/L	0.0561	PEE.EL.071	SM 3113 B	2021-07-01 L. AVECILLAS	--	--

1. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
2. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
3. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
4. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
5. Parámetros acreditados cuyo resultado está fuera del alcance de acreditación del SAE
6. Parámetros cuyo resultado corresponde al análisis realizado por el laboratorio acreditado subcontratado
7. Las opiniones e interpretaciones se encuentran fuera del alcance del SAE y A2LA
8. Ensayo realizado en las instalaciones del cliente

--	No Aplica	U	Incertidumbre	PEE.EL	Procedimiento Especifico de Ensayo de Elicrom			
< LD	Menor al Límite de Detección	N/D	No detectado	SM	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 23rd Ed.			

DESVIACIONES DEL PROCEDIMIENTO

No se presentó ninguna desviación del procedimiento durante el muestreo y el análisis.

OBSERVACIONES

Muestra suministrada por el cliente. Los resultados se aplican a la muestra como se la recibió.

DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD

No Aplica

	LABORATORIO DE ENSAYOS FISICOS-QUIMICOS Y MICROBIOLÓGICOS INFORME DE ENSAYOS N° WE-0969-008-21 ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA	
---	---	---

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA
MACHALA
JORGE ALVAREZ
0997954613

Guayaquil, 02 de julio del 2021

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Origen de Muestra:	AGUA RESIDUAL	Muestreado por:	CLIENTE
Punto de Muestreo:	M. SIN PH4 M5	Muestreador:	CLIENTE
Coordenadas Geográficas:	N/A	Fecha y Hora de Muestreo:	30/06/21 12:00:00
Tipo de Muestreo:	Simple	Condiciones Ambientales del Muestreo:	N/A
Código de la Muestra:	0969-008-21	Fecha y Hora de Recepción de Muestras:	30/06/21 15:30:00
Norma Técnica de Muestreo:	N/A	Condiciones Ambientales del Análisis:	21.9 °C ; 61.8 %HR
Plan/Procedimiento de Muestreo:	N/A / N/A		

RESULTADOS

METALES

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U K=2	PROCEDIMIENTO	MÉTODO	ANALIZADO	LÍMITE PERMISIBLE	EVALUACIÓN
ARSÉNICO ²³	0.0000	mg/L	---	PEE.EL.071	SM 3113 B	2021-07-01 L. AVECILLAS	---	---

1. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
2. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
3. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
4. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
5. Parámetros acreditados cuyo resultado está fuera del alcance de acreditación del SAE
6. Parámetros cuyo resultado corresponde al análisis realizado por el laboratorio acreditado subcontratado
7. Las opiniones e interpretaciones se encuentran fuera del alcance del SAE y A2LA
8. Ensayo realizado en las instalaciones del cliente

---	No Aplica	U	Incertidumbre	PEE.EL	Procedimiento Especifico de Ensayo de Elicrom
< LD	Menor al Límite de Detección	N/D	No detectado	SM	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 23rd Ed.

DESVIACIONES DEL PROCEDIMIENTO

No se presentó ninguna desviación del procedimiento durante el muestreo y el análisis.

OBSERVACIONES

Muestra suministrada por el cliente. Los resultados se aplican a la muestra como se la recibió.

DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD

No Aplica



LABORATORIO DE ENSAYOS FISICOS-QUIMICOS Y MICROBIOLÓGICOS
INFORME DE ENSAYOS
N° WE-0969-011-21
ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS
FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA



IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA
MACHALA
JORGE ALVAREZ
0997954613

Guayaquil, 02 de julio del 2021

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Origen de Muestra:	AGUA RESIDUAL	Muestreado por:	CLIENTE
Punto de Muestreo:	M. SIN PH8 M5	Muestreador:	CLIENTE
Coordenadas Geográficas:	N/A	Fecha y Hora de Muestreo:	30/06/21 12:00:00
Tipo de Muestreo:	Simple	Condiciones Ambientales del Muestreo:	N/A
Código de la Muestra:	0969-011-21	Fecha y Hora de Recepción de Muestras:	30/06/21 15:30:00
Norma Técnica de Muestreo:	N/A	Condiciones Ambientales del Análisis:	21.9 °C ; 61.8 %HR
Plan/Procedimiento de Muestreo:	N/A / N/A		

RESULTADOS

METALES

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U K=2	PROCEDIMIENTO	MÉTODO	ANALIZADO	LÍMITE PERMISIBLE	EVALUACIÓN
ARSENICO ³⁺	0.0000	mg/L	--	PEE.EL.071	SM 3113 B	2021-07-01 L. AVECILLAS	--	--

1. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
2. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
3. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
4. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
5. Parámetros acreditados cuyo resultado está fuera del alcance de acreditación del SAE
6. Parámetros cuyo resultado corresponde al análisis realizado por el laboratorio acreditado subcontratado
7. Las opiniones e interpretaciones se encuentran fuera del alcance del SAE y A2LA
8. Ensayo realizado en las instalaciones del cliente

---	No Aplica	U	Incertidumbre	PEE.EL	Procedimiento Especifico de Ensayo de Elicrom
< LD	Menor al Límite de Detección	N/D	No detectado	SM	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 23rd Ed.

DESVIACIONES DEL PROCEDIMIENTO

No se presentó ninguna desviación del procedimiento durante el muestreo y el análisis.

OBSERVACIONES

Muestra suministrada por el cliente. Los resultados se aplican a la muestra como se la recibió.

DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD

No Aplica

Anexo C: Resultados de los análisis de las muestras de agua residual minera.

	LABORATORIO DE ENSAYOS FÍSICOS-QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS INFORME DE ENSAYOS N° WE-0934-001-21 ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA	
---	---	---

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA
 MACHALA
 JORGE ALVAREZ
 0981940444

Guayaquil, 24 de junio del 2021

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Origen de Muestra:	AGUA RESIDUAL	Muestreado por:	CLIENTE
Punto de Muestreo:	M0	Muestreador:	CLIENTE
Coordenadas Geográficas:	N/A	Fecha y Hora de Muestreo:	21/06/21 12:00:00
Tipo de Muestreo:	Simple	Condiciones Ambientales del Muestreo:	N/A
Código de la Muestra:	0934-001-21	Fecha y Hora de Recepción de Muestras:	23/06/21 09:30:00
Norma Técnica de Muestreo:	N/A	Condiciones Ambientales del Análisis:	23.8 °C ; 62.7 %HR
Plan/Procedimiento de Muestreo:	N/A / N/A		

RESULTADOS

METALES

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U K=2	PROCEDIMIENTO	MÉTODO	ANALIZADO	LÍMITE PERMISIBLE	EVALUACIÓN
ARSENICO ³⁺	0.7274	mg/L	0.0478	PEE.EL.071	SM 3113 B	2021-06-23 L. AVECILLAS	---	---

1. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
2. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
3. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
4. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
5. Parámetros acreditados cuyo resultado está fuera del alcance de acreditación del SAE
6. Parámetros cuyo resultado corresponde al análisis realizado por el laboratorio acreditado subcontratado
7. Las opiniones e interpretaciones se encuentran fuera del alcance del SAE y A2LA
8. Ensayo realizado en las instalaciones del cliente



Autenticación de certificado

Autorizado y firmado electrónicamente por:

Debesa Siqueira Velasco

Gerente de Laboratorio de Análisis - Autorización EC110919DV



Sustento legal de firma electrónica

Los resultados de este informe solo son aplicables a las muestras analizadas. Este informe no podrá reproducirse excepto en su totalidad sin la aprobación escrita de ELICROM.
 FO.PEE.020-02 Rev. 12 Dirección: Cda Guayaquil Mz 21 Calle 1era Solar 10 Frente al Mall del Sol. Pbx:042282007;
 N° WE-0934-001-21 Cel:0982932691,0982931606; dvega@elicrom.com; GUAYAQUIL - ECUADOR



LABORATORIO DE ENSAYOS FISICOS-QUIMICOS Y MICROBIOLÓGICOS
INFORME DE ENSAYOS
N° WE-0969-019-21
ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS
FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA



IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA
MACHALA
JORGE ALVAREZ
0997954613

Guayaquil, 02 de julio del 2021

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Origen de Muestra:	AGUA RESIDUAL	Muestreado por:	CLIENTE
Punto de Muestreo:	PH2 M5	Muestreador:	CLIENTE
Coordenadas Geográficas:	N/A	Fecha y Hora de Muestreo:	30/06/21 12:00:00
Tipo de Muestreo:	Simple	Condiciones Ambientales del Muestreo:	N/A
Código de la Muestra:	0969-013-21	Fecha y Hora de Recepción de Muestras:	30/06/21 15:30:00
Norma Técnica de Muestreo:	N/A	Condiciones Ambientales del Análisis:	21.9 °C ; 61.8 %HR
Plan/Procedimiento de Muestreo:	N/A / N/A		

RESULTADOS

METALES

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U K=2	PROCEDIMIENTO	MÉTODO	ANALIZADO	LÍMITE PERMISIBLE	EVALUACIÓN
ARSÉNICO ³⁺	0.1101	mg/L	0.0155	PEE.EL.071	SM 3113 B	2021-07-01 L.AVECILLAS	--	--

1. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
2. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
3. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
4. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
5. Parámetros acreditados cuyo resultado está fuera del alcance de acreditación del SAE
6. Parámetros cuyo resultado corresponde al análisis realizado por el laboratorio acreditado subcontratado
7. Las opiniones e interpretaciones se encuentran fuera del alcance del SAE y A2LA
8. Ensayo realizado en las instalaciones del cliente

--	No Aplica	U	Incertidumbre	PEE.EL	Procedimiento Especifico de Ensayo de Elicrom			
< LD	Menor al Limite de Detección	N/D	No detectado	SM	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 23rd Ed.			

DESVIACIONES DEL PROCEDIMIENTO

No se presentó ninguna desviación del procedimiento durante el muestreo y el análisis.

OBSERVACIONES

Muestra suministrada por el cliente. Los resultados se aplican a la muestra como se la recibió.

DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD

No Aplica

	LABORATORIO DE ENSAYOS FISICOS-QUIMICOS Y MICROBIOLÓGICOS INFORME DE ENSAYOS N° WE-0969-014-21 ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA	
---	---	---

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA
MACHALA
JORGE ALVAREZ
0997954613

Guayaquil, 02 de julio del 2021

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Origen de Muestra:	AGUA RESIDUAL	Muestreado por:	CLIENTE
Punto de Muestreo:	R1 PH4 M5	Muestreador:	CLIENTE
Coordenadas Geográficas:	N/A	Fecha y Hora de Muestreo:	30/06/21 12:00:00
Tipo de Muestreo:	Simple	Condiciones Ambientales del Muestreo:	N/A
Código de la Muestra:	0969-014-21	Fecha y Hora de Recepción de Muestras:	30/06/21 15:30:00
Norma Técnica de Muestreo:	N/A	Condiciones Ambientales del Análisis:	21.9 °C ; 61.8 %HR
Plan/Procedimiento de Muestreo:	N/A / N/A		

RESULTADOS

METALES

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U K=2	PROCEDIMIENTO	MÉTODO	ANALIZADO	LÍMITE PERMISIBLE	EVALUACIÓN
ARSÉNICO ³⁺	0.0155	mg/L	—	PEE.EL.071	SM 3113 B	2021-07-01 L. AVECILLAS	—	—

1. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
2. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
3. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
4. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
5. Parámetros acreditados cuyo resultado está fuera del alcance de acreditación del SAE
6. Parámetros cuyo resultado corresponde al análisis realizado por el laboratorio acreditado subcontratado
7. Las opiniones e interpretaciones se encuentran fuera del alcance del SAE y A2LA
8. Ensayo realizado en las instalaciones del cliente

—	No Aplica	U	Incertidumbre	PEE.EL	Procedimiento Especifico de Ensayo de Elicrom			
< LD	Menor al Límite de Detección	N/D	No detectado	SM	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 23rd Ed.			

DESVIACIONES DEL PROCEDIMIENTO

No se presentó ninguna desviación del procedimiento durante el muestreo y el análisis.

OBSERVACIONES

Muestra suministrada por el cliente. Los resultados se aplican a la muestra como se la recibió.

DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD

No Aplica



LABORATORIO DE ENSAYOS FISICOS-QUIMICOS Y MICROBIOLÓGICOS
INFORME DE ENSAYOS
N° WE-0969-019-21
ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS
FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA



IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

FERNANDEZ VELEZ CRISTINA VANESSA
MACHALA
JORGE ALVAREZ
0997954613

Guayaquil, 02 de julio del 2021

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Origen de Muestra:	AGUA RESIDUAL	Muestreado por:	CLIENTE
Punto de Muestreo:	PH8 M5	Muestreador:	CLIENTE
Coordenadas Geográficas:	N/A	Fecha y Hora de Muestreo:	30/06/21 12:00:00
Tipo de Muestreo:	Simple	Condiciones Ambientales del Muestreo:	N/A
Código de la Muestra:	0969-019-21	Fecha y Hora de Recepción de Muestras:	30/06/21 15:30:00
Norma Técnica de Muestreo:	N/A	Condiciones Ambientales del Análisis:	21.9 °C ; 61.8 %HR
Plan/Procedimiento de Muestreo:	N/A / N/A		

RESULTADOS

METALES

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U K=2	PROCEDIMIENTO	MÉTODO	ANALIZADO	LÍMITE PERMISIBLE	EVALUACIÓN
ARSENICO ³⁺	0.2362	mg/L	0.0155	PEE.EL.071	SM 3113 B	2021-07-01 L. AVECILLAS	---	---

1. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
2. Parámetros que se encuentran incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
3. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el SAE
4. Parámetros que no están incluidos en el alcance de acreditación ISO 17025 por el A2LA
5. Parámetros acreditados cuyo resultado está fuera del alcance de acreditación del SAE
6. Parámetros cuyo resultado corresponde al análisis realizado por el laboratorio acreditado subcontratado
7. Las opiniones e interpretaciones se encuentran fuera del alcance del SAE y A2LA
8. Ensayo realizado en las instalaciones del cliente

---	No Aplica	U	Incertidumbre	PEE.EL	Procedimiento Específico de Ensayo de Elicrom			
< LD	Menor al Límite de Detección	N/D	No detectado	SM	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 23rd Ed.			

DESVIACIONES DEL PROCEDIMIENTO

No se presentó ninguna desviación del procedimiento durante el muestreo y el análisis.

OBSERVACIONES

Muestra suministrada por el cliente. Los resultados se aplican a la muestra como se la recibió.

DECLARACIÓN DE CONFORMIDAD

No Aplica

Anexo E: Presupuesto

RECURSO	CANTIDAD	UNIDAD	V. UNITARIO	V. TOTAL
<i>Transporte al campo de estudio</i>	<i>25,0</i>	<i>1</i>	<i>2,00</i>	<i>50,00</i>
<i>Reactivos</i>	<i>4,00</i>	<i>1</i>	<i>100,00</i>	<i>400,00</i>
<i>Análisis de la Característica de la Muestra</i>	<i>4,00</i>	<i>1</i>	<i>50,00</i>	<i>200,00</i>
<i>Celda electrolítica</i>	<i>1,00</i>	<i>1</i>	<i>600,00</i>	<i>600,00</i>
<i>Subtotal</i>				<i>USD 1250,00</i>
<i>Imprevistos 10%</i>				<i>USD 95,00</i>
<i>Total</i>				<i>USD 1345,00</i>