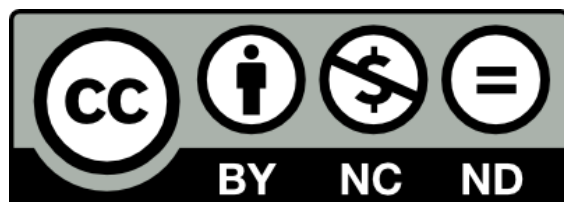


IMPLEMENTACIÓN DE UN ELECTROCOAGULADOR A ESCALA DE LABORATORIO
QUE PERMITA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA



IVÁN DARIO MANCHEGO DONCEL
GINA PAOLA ZABALA GUTIÉRREZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2019

IMPLEMENTACIÓN DE UN ELECTROCOAGULADOR A ESCALA DE LABORATORIO
QUE PERMITA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA

IVÁN DARIO MANCHEGO DONCEL
GINA PAOLA ZABALA GUTIÉRREZ

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesor
JAIR ESTEBAN BURGOS CONTENTO
Ingeniero Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO
2019

Autoridades académicas

P. José Gabriel MESA ANGULO, O. P.

Rector General

P. Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decano Facultad de Ingeniería Ambiental

Dedicatoria

Este logro que he culminado se lo quiero dedicar a Dios merecedor de las buenas acciones que podemos realizar para el bienestar social y natural.

A mis tres hermanas y mi papá por su apoyo y darme la oportunidad de realizar mis estudios superiores.

A mi universidad por el conocimiento adquirido y formación profesional.

por último, a mí por todo el esfuerzo que implicó el sacar adelante mi carrera profesional.

Iván Dario Manchego Doncel

Este logro está dedicado a Dios, gracias a él estoy cumpliendo la meta de terminar mi carrera y he dado lo mejor de mí para hacer las cosas bien.

A mis padres porque nunca dudaron de mí, han estado siempre a mi lado con una dedicación infinita quisieron para mí lo mejor de la vida, me apoyan en todas mis metas a cumplir, mi más grande logro es hacerlos sentir orgullosos de la hija que formaron.

A mi hijo, mi vida entera esto es por ti y para ti siempre, deseo infinitamente te sientas orgulloso de esa mamá que lo único que quiere es darte las bases para que seas la mejor persona de la vida.

A Winston Cartagena, por tu apoyo y tus palabras que fueron tan importantes en este camino, agradezco infinitamente tu motivación y ayuda, a pesar de lo altibajos en este tiempo tomaste la decisión de quedarte y ayudarme en lo que podías, gracias inmensas amor.

Por último, pero no menos importante a todas las personas que de alguna u otra forma me apoyaron y me animaron para salir adelante y cumplir mis sueños.

Gina Paola Zabala Gutiérrez

Agradecimientos

Por la culminación de este trabajo de grado agradecemos a Dios por ser fuente de inspiración y guía en nuestro crecimiento personal y profesional.

A nuestra Universidad Santo Tomás como institución promotora y formadora de personas del saber y la ciencia que inspiran la búsqueda de nuevos desarrollos y métodos para mejorar la calidad de vida del ser humano y el ambiente.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Ambiental sede Villavicencio por su acompañamiento y dedicación para formarnos como profesionales íntegros, en especial a nuestro profesor y director de tesis el Ingeniero Jair Esteban Burgos Contento por su incondicional orientación y buena disposición en el desarrollo de esta investigación, igualmente por creer en nosotros y en el proyecto desde el inicio.

A nuestras familias por formarnos como personas íntegras con principios y valores que permitieron dar lo mejor de nosotros en cada logro y esfuerzo que requirió nuestra formación profesional, por su amor, apoyo incondicional y constancia para cumplir esta meta.

Por último, pero no menos importante a todas las personas que de algún modo hicieron parte de nuestro proceso de formación académica y personal, dándonos apoyo y fortaleza para cumplir nuestro objetivo.

Iván Dario Manchego Doncel & Gina Paola Zabala Gutiérrez.

Contenido

	Pág.
Glosario.....	12
Resumen.....	14
Abstract	15
Introducción	16
2. Planteamiento del problema.....	18
3. Objetivos.....	21
3.1 Objetivo General	21
3.1 Objetivos Específicos.....	21
4. Justificación	22
5. Alcance	25
6. Marco de referencia	26
6.1 Marco conceptual.....	26
6.2 Marco Teórico.....	27
6.3 Marco legal	37
7. Metodología.....	38
7.1 Fase 1. Diseño experimental	39
7.1.1 Montaje Experimental.....	39
7.1.2 Preparación de la solución	41
7.1.2 Diseño experimental Electrocoagulador	42
7.1.3 Evaluación del diseño experimental	44
7.2 Fase 2. Configuración y ejecución del prototipo	46
7.2.1 Montaje del Prototipo	46
7.2.2 Ejecución del Prototipo.....	47
7.3 Fase 3. Eficiencia del Electrocoagulador	49
8. Resultados.....	51
8.1 Diseño experimental del prototipo para tratamiento de agua previamente contaminada con arsénico.	51
8.1.1 Preparación de soluciones.....	51

8.1.2	Determinación de Voltaje, mediante ecuación Faraday	52
8.2	Prototipo a escala laboratorio.....	57
8.2.1	Ejecución del prototipo	57
8.3	Evaluación de la eficiencia del electro-coagulador para la remoción de arsénico con diferentes concentraciones	64
	Conclusiones	67
	Recomendaciones	69
	Referencias.....	70
	Anexos	76

Lista de Tablas

pág.

Tabla 1. Normatividad aplicable en el tratamiento de aguas residuales	37
Tabla 2. Diseño metodológico de las fases del proyecto.	38
Tabla 3. Medidas del reactor del electrocoagulador.	41
Tabla 4. Características Celda Electrocoagulación.	42
Tabla 5. Evaluación de la formación de flóculos de acuerdo con el voltaje	45
Tabla 6. Resultados Fase 2.	48
Tabla 7. Disoluciones en serie	50
Tabla 8. Resultados de la resistencia de los electrodos según el material.....	53
Tabla 9. Resultados de la Fase 1, diseño experimental.....	54
Tabla 10. Concentración inicial y final de As.....	57
Tabla 11. Conductividad inicial – final.....	58
Tabla 12. Análisis de la temperatura inicial – final según el tiempo.	59
Tabla 13. Sólidos disueltos totales inicial– final.....	60
Tabla 14. pH inicial – final según el tiempo.	61
Tabla 15. Comparación de la muestra frente a la normatividad de aguas.....	64

Lista de ilustraciones

	Pág.
Ilustración 1. Proceso de electrocoagulación por (Song et al., 2017).	29
Ilustración 2. Conexiones Celda Electroquímica por (Mollah et al., 2004).	33
Ilustración 3. Fuente regulable, Electroodos, Celda EC (experimental)	43
Ilustración 4. Montaje Experimental (Manchego & Zabala, 2019).	43
Ilustración 5. Diseño de la celda de electrocoagulación. Basada en el modelo de (Ruiz, 2017). Adaptada por (Manchego & Zabala, 2019)	47
Ilustración 6. Montaje Reactor (Manchego & Zabala, 2019).	48
Ilustración 7. Formación Arsenito de Sodio (Manchego & Zabala, 2019).	52

Lista de gráficas

Pág.

Gráfica 1. Tiempo de formación de flóculos con respecto al voltaje. Adaptado por Manchego & Zabala, 2019.....	55
Gráfica 2. Porcentaje de variación de los parámetros evaluados. Adaptada por Manchego & Zabala, 2019.....	63
Gráfica 3. Diagrama de caja Resultado muestra 1 = 10 minutos	65
Gráfica 4. Comparación de la muestra frente a la normatividad de aguas. Programa IBM SPSS – 25. Adaptada por Manchego & Zabala, 2019.	65
Gráfica 5. Disoluciones en serie. Manchego & Zabala, 2019.....	66

Lista de anexos

Pág.

Anexo A. Resultados concentración de Arsénico.....	76
Anexo B. Resultados de concentración disoluciones en serie	80

Glosario

Agua: Es un compuesto químico formado por dos partes de hidrógeno y una parte de oxígeno, en volumen. Puede tener en solución o en suspensión a otros materiales sólidos, líquidos o gaseosos. Su fórmula es H_2O (Garcés & Arango, 2007).

Aguas residuales domésticas: Son las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas. (Nidheesh & Singh, 2017)

Aguas residuales industriales: Son todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas, ni aguas de correntía pluvial. (Beltrán, 2015)

Aguas residuales urbanas: Son las aguas residuales domésticas o la mezcla de estas con aguas residuales industriales y/o aguas de esorrentía pluvial. (Ruiz, 2017)

Celda de electrocoagulación: También conocida como cuba electrolítica, fundamenta su diseño en la distribución volumétrica compuesta por la zona superior o zona de flotación para depositar los lodos de flotación o los lodos de menor densidad. Así mismo, la zona media o zona de reacción en la que están sumergidos los electrodos y donde ocurre el proceso de electrocoagulación propiamente dicho y la zona inferior o zona de sedimentación en donde sedimentan los lodos de precipitación o lodos más densos. (Garcés & Arango, 2007)(Garcés & Ruiz, 2007)

Conductividad eléctrica: Es la medida de la habilidad de una solución para conducir una corriente eléctrica que varía tanto con el número como con el tipo de iones presentes en la solución. (Morales & Rojas, 2018)

Densidad de corriente: Aplicada al sistema de electrocoagulación es fundamental ya que determina la cantidad de iones que son liberados al medio por los electrodos. Sin embargo, para la

selección de la densidad de corriente es necesario tener en cuenta otros parámetros como el pH y la temperatura (Arboleda & Herrera, 2015).

Electrocoagulación: Proceso electroquímico que separa simultáneamente metales pesados, sólidos en suspensión, compuestos orgánicos emulsionados y otros muchos contaminantes del agua utilizando la electricidad en lugar de reactivos químicos.

Floculación: Transformación que sufren las suspensiones coloidales por asociación de las partículas constituyentes. La floculación precede a la coagulación; consiste en la agrupación bastante laxa de las partículas de una suspensión coloidal sin que exista coalescencia de estas partículas entre sí. Dichas partículas conservan su individualidad, pero ya no pueden desplazarse separadamente. La floculación es apreciable a menudo a simple vista: el sistema se hace turbio. Es útil para mejorar la eficacia en procesos de filtración agrupando partículas en suspensión formando flóculos (Castro, 2006).

Floculante: Agente o sustancia que provoca la floculación. Pueden utilizarse sales de hierro o aluminio o más comúnmente productos sintéticos denominados polielectrolitos que al contrario que los primeros no alteran el pH del medio. Su función es neutralizar las cargas negativas que dotan a ciertas partículas de un carácter coloidal manteniéndolas en suspensión. Debido al efecto del floculante estas partículas se unen formando flóculos de mayor tamaño que son fácilmente eliminables mediante procesos de filtración (Castro, 2006)

Material de los electrodos. La selección del material de los electrodos es un factor determinante en la eficiencia de remoción de los agentes contaminantes, ya que dependiendo del material del que estén constituidos, serán producidas las reacciones de oxidación y reducción.

Temperatura. El efecto de la temperatura está asociado con el aumento de la eficiencia debido a que un incremento en dicha propiedad representa una mayor destrucción de la película de óxido formada en la superficie del electrodo a partir de la cual los iones son liberados al medio (Garcés & Arango, 2007).

Resumen

La presente investigación, fue desarrollada en el Laboratorio de Toxicología de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, su finalidad principal fue la construcción e implementación de un prototipo para el proceso de electrocoagulación y el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico. La metodología se fundamentó en un diseño experimental, donde se realizó la construcción de un prototipo que tomó como base un reactor tipo Batch cuya capacidad máxima fue de 3,375 litros. La configuración seleccionada para el proceso electroquímico empleó electrodos de hierro y aluminio y la distancia usada en la prueba entre electrodos, fue de 15mm.

En la etapa experimental, se realizó la construcción del montaje inicial, se preparó la solución patrón, por último, mediante el uso de la Ley de Faraday se determinó un voltaje que teóricamente era necesario para la remoción de concentración de Arsénico. Una vez realizados los ensayos de laboratorio se seleccionó 10 voltios como referencia para realizar las pruebas posteriores, debido al bajo consumo de energía y a las características que presentaron los flóculos formados.

Por medio de un ensayo con la muestra patrón se observó la variación en los parámetros de concentración, conductividad, temperatura, pH, y SDT, en diferentes intervalos de tiempo aplicado (10, 20, 30 y 40 minutos). Se logró una mejor eficiencia en la muestra de 10 minutos, esto debido a que el agua tuvo contacto con los hidróxidos formados mediante coagulación *in-situ*, permitiendo la adsorción eficiente del Arsénico por medio de burbujas de hidrógeno que apoyaron la flotación de los flóculos, facilitando su remoción. Finalmente, se realizó un último ensayo que consistió en la prueba de disoluciones en serie. Gracias a esto, se logró conocer las condiciones ideales de la celda de electrocoagulación para eliminar el contaminante, el resultado, determinó mejor eficiencia en el porcentaje de remoción en concentraciones entre 250mg/L a 500mg/L de arsénico. Esto hizo posible obtener una eliminación del arsénico superior al 90%, indicador que cumple con todos los parámetros establecidos en la normatividad ambiental vigente en Colombia referente a agua potable y residual.

Palabras clave: electrocoagulación, arsénico, prototipo laboratorio, electroquímica, flóculos, remoción, eficiencia.

Abstract

The present investigation was developed in the Toxicology Laboratory of the Faculty of Environmental Engineering at the Santo Tomás University Villavicencio. The main goal was the construction and implementation of a prototype for the electrocoagulation process and the treatment of water contaminated with arsenic.

The methodology used was based on an experimental design, where the construction of a prototype was carried out based on a Lot-type reactor whose maximum capacity was 3.375 liters. The configuration selected for the electrochemical process used iron and aluminum electrodes and the distance used in the test between electrodes was 15 mm. In the experimental stage, the construction of the initial assembly was carried out and, the standard solution was prepared, finally, the use of the Faraday Law and a voltage was determined that was theoretically necessary for the removal of arsenic concentration. After laboratory tests have been carried out, 10 volts are selected as a reference for subsequent tests, due to the low energy consumption and the characteristics that affect the floc formed.

Variation in the parameters of concentration, conductivity, temperature, pH, and TDS is modified, at different intervals of time applied (10, 20, 30 and 40 minutes). Was observed by means of a standard sample test, a better efficiency was achieved in the sample of 10-minute, this because the water had contact with the hydroxides formed by in-clotting situ, allowing the efficient adsorption of the Arsenic by means of hydrogen bubbles that supported the floatation of the flocs, facilitating their removal.

Finally, a final test was carried out, which consisted in the testing series solutions. Due to this, it was possible to know the ideal conditions of the electrocoagulation cell to eliminate the pollutant. This resulted in a better efficiency in the percentage of removal for concentrations between 250mg / L to 500mg / L of arsenic. This made it possible to obtain an arsenic elimination of more than 90%, an indicator that complies with all the parameters established in the environmental regulations in force in Colombia regarding drinking and wastewater

Keywords: electrocoagulation, arsenic, laboratory prototype, electrochemistry, flocs, removal, efficiency.

Introducción

En la actualidad se han desarrollado múltiples estudios que tiene como objetivo buscar alternativas para disminuir los niveles de contaminación que afectan el recurso hídrico debido a procesos antropológicos, promoviendo el argumento que este, es fuente de vida y que cada día se agota más, (Y. C. Reyes, Vergara, Torres, Díaz, & González, 2016). De esta manera, tras la identificación de necesidades en el contexto nacional, regional y local, se adelantó una investigación focalizada en la implementación de un electrocoagulador a escala de laboratorio, el cual, tras la realización de diferentes pruebas se determinó su configuración electrónica ideal, que permitió disminuir la concentración de arsénico del recurso hídrico.

Es crucial mencionar que la propuesta surgió ante la problemática generada por la contaminación producida por la industrialización, procesos agrícolas, combustión de carbón y actividades de extracción minera extensiva, ya que en dichos procesos se utiliza arsénico como materia prima o insumo necesario para su desarrollo. Estas actividades generan de manera directa o indirecta contaminación en las fuentes hídricas, situación que requiere la implementación de propuestas más efectivas para el tratamiento de aguas residuales (Alonso, 2014).

Una de las tecnologías utilizadas para el tratamiento de aguas contaminadas, hace referencia a la electrocoagulación, la cual permite sustituir el uso de químicos coagulantes, por energía eléctrica, generando menor impacto negativo en el recurso hídrico, adicionalmente esta técnica presenta mejores porcentajes de remoción de arsénico que el proceso de coagulación convencional (Beltrán, 2015).

Considerando la actual situación del recurso hídrico y con base en las investigaciones alusivas al tratamiento de agua contaminada con arsénico, se ejecutó un estudio que permitió la remoción de este contaminante mediante la implementación de un proceso de electrocoagulación.

La metodología de la investigación se planteó en tres fases, la primera de ellas se fundamentó en la construcción y montaje de un diseño experimental, la preparación de la solución patrón y finalmente una evaluación del diseño. En la segunda fase se realizó la configuración y puesta en

marcha del prototipo, llevando a cabo el montaje del reactor, para determinar los tiempos adecuados. En la tercera fase se determinó la eficiencia del electrocoagulador, mediante un análisis de las concentraciones inicial y final, donde se definió el porcentaje de remoción del arsénico, así mismo se realizó una caracterización del agua que permitió corroborar y evidenciar la eficiencia del proceso.

2. Planteamiento del problema

El desarrollo económico de los países está determinado en gran medida por la industrialización y la tecnificación de los procesos productivos, que generan residuos sólidos y vertimientos implicando una posible afectación del medio ambiente, estos tienen como efecto que el recurso hídrico sea el más afectado. Según Alonso (2014) la contaminación tiene su origen en sustancias químicas usadas en la ejecución de algunos procesos industriales; estos desechos también tienen efecto sedimentario, lo que disminuye notablemente el caudal de los efluentes y ríos afectando la captación que se realiza para actividades industriales, procesos agrícolas, de combustión a carbón y actividades de extracción minera (Alonso, 2014). Como consecuencia de esto surge la necesidad de realizar un manejo adecuado e implementar medidas de mitigación con respecto a la contaminación del recurso.

La situación actual de Colombia frente a los vertimientos realizados en el recurso hídrico está altamente ligada a los procesos industriales; el país cuenta con un área de gran potencial en actividades de agricultura y minería, estas en su mayoría son responsables de grandes afectaciones al recurso debido al uso de sustancias químicas, que tienen un alto componente de metales pesados, convirtiéndose en un peligro para la salud (Balasubramanian, Kojima, Basha, & Srinivasakannan, 2009), (Garcés & Arango, 2007) (Alonso, 2014).

Las actividades generadas por la industrialización, minería, el uso de pesticidas, herbicidas, desecantes, preservantes de madera y aditivos para el alimento del ganado, contienen sustancias contaminantes como el arsénico, este compuesto se encuentra de forma inorgánica como (As^{3+}) y (As^{5+}), siendo el (As^{3+}) diez veces más tóxico que el segundo, por lo que se genera un impacto negativo en el recurso hídrico (Beltrán, 2015).

A nivel nacional el departamento que presenta los más altos niveles de contaminación es Cundinamarca, en la cuenca del río Bogotá, en esta cuenca se observan vertimientos de aguas residuales que contienen altas concentraciones de arsénico, generando problemas de salud a las comunidades que habitan en las riberas del río, el agua de esta cuenca es utilizada para actividades de riego en cultivos como la lechuga, repollo y brócoli, promoviendo que los metales pesados se

desplacen al suelo, contaminando los cultivos y aumentando los casos de contaminación (Y. Reyes, Vergara, Torres, Díaz, & González, 2016).

Por otro lado, los ríos Vetás y Quebrada la Baja en el departamento de Santander, también tienen elevados niveles de concentración de arsénico (419,4 y 227,3 Mg As/Kg respectivamente) estos afluentes abastecen el río Suratá, generando unos problemas de índole ambiental para la población, esto afecta también la cadena trófica de la cuenca (Alonso, 2014). Finalmente en el departamento del Meta también se han detectado concentraciones de arsénico, estas son relativamente bajas en comparación con las registradas en el departamento de Santander, dichas concentraciones a pesar de ser bajas ($20\mu\text{g/L}$), están por encima de los parámetros permisibles por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la normatividad colombiana (Morales & Rojas, 2018).

El arsénico es un contaminante cuyo consumo por largos periodos de tiempo, puede causar perjuicios a la salud esto sin importar que sea consumido en bajas concentraciones, una de las patologías más relevantes es la conocida como arsenicosis, la cual tiene efectos crónicos en el organismo, por esta razón es necesario buscar nuevas alternativas que disminuyan la concentración de este componente tóxico en las aguas residuales que son vertidas a cuerpos de agua usados para consumo humano (Hakizimana et al., 2017).

Con el propósito de prevenir que este elemento siga causando afectaciones a la salud pública, Castro (2006) señala que se han desarrollado alrededor de 14 tecnologías que ayudan a remover el Arsénico del agua, estas presentan una eficiencia en la eliminación que oscila entre el 60%-70 %. El método más usado es la coagulación, que a pesar de ser efectiva, al momento de su implementación presenta algunas limitantes que pueden generar mayores afectaciones al recurso hídrico; una de ellas es el uso de coagulantes químicos que al no dosificarse correctamente puede producir una mayor contaminación del agua; adicionalmente este tipo de tratamiento requiere adecuar lugares específicos generando un alto costo de energía y demandando procesos adicionales (Castro, 2006), (Ojeda, Hing, & Gonzalez, 2012).

Las necesidades del medio obligan a la investigación de nuevas herramientas para remover los niveles altos de concentración de arsénico presente en el recurso hídrico, encontrando en la electrocoagulación el tratamiento con mayor porcentaje de remoción. Debido a esto se hace necesario caracterizar las variables que requiere el proceso tales como la densidad de corriente, materiales de los electrodos, voltajes y tiempos que generan la más alta eficiencia del método electroquímico (Prieto, Callejas, Reyes, & Marmolejo, 2012).

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Implementar un prototipo que genere un proceso de electrocoagulación para el tratamiento de agua contaminada con arsénico.

3.1 Objetivos Específicos

Realizar un diseño experimental del prototipo para tratamiento de agua previamente contaminada con arsénico.

Construir un prototipo a escala laboratorio con la configuración de la celda electroquímica resultante del diseño preliminar.

Evaluar la eficiencia del electro-coagulador para la remoción de arsénico con diferentes concentraciones.

4. Justificación

Actualmente los avances tecnológicos han permitido crear múltiples y novedosas alternativas para el tratamiento de aguas residuales y/o potables, las cuales facilitan los procesos y disminuyen el uso de químicos. Una de las más eficientes, es la electroquímica, técnica que utiliza la electricidad para recuperar metales pesados que causan un impacto fuerte en el medioambiente debido a sus propiedades tóxicas y de acumulación (Alonso, 2014).

La mayor cantidad de estos metales pesados presentes en los cauces de las fuentes hídricas son generados por la industria y sus procesos productivos; aunque algunos metales se encuentran naturalmente en la corteza terrestre su excesivo uso y posterior vertimiento en efluentes y ríos generan un alto riesgo para la salud humana (Pérez, 2013).

Si bien el arsénico no es el único contaminante presente en el agua, es de los más preocupantes debido a que hace parte de los contaminantes criterios según la OMS, generando impactos negativos a la salud humana (Restrepo, Arango, & Gardes, 2006); ahora bien, las enfermedades relacionadas con esta sustancia han aumentado exponencialmente debido a la exposición de las personas, por este motivo el agua contaminada con arsénico se considera un problema de salud pública debido a que los eventos ocasionados por esta sustancia han aumentado su frecuencia y toxicidad, relacionándolo con enfermedades cancerígenas (Galetovic & Fernicola, 2003), por tal motivo el tratamiento del agua contaminada con arsénico es de gran importancia, debido a que minimiza los riesgos de la comunidad mediante la mejora en la calidad del agua usada para las actividades cotidianas de las personas.

Los procesos de coagulación realizados por medio de corriente eléctrica han demostrado ser más efectivos y menos contaminantes evitando el uso de químicos. La electricidad cumple una función bastante eficaz al eliminar los contaminantes por medio de la aplicación de corriente directa (DC, por sus siglas en inglés), utilizando electrodos fabricados con materiales altamente conductores como son: hierro, grafito, cobre, zinc y aluminio; esta técnica tiene un alto porcentaje de efectividad tratando agua contaminada con distintos tipos de metales pesados (Monsalve & Cardona, 2014).

La implementación del proceso de electrocoagulación es efectiva ya que remueve un alto porcentaje de los metales pesados sin realizar técnicas adicionales, debido a que relaciona la coagulación, floculación y sedimentación en una sola etapa, este tipo de tratamiento no necesita equipos de alta tecnología y por su naturaleza simple se adapta a pequeña y gran escala, igualmente se puede utilizar bajo cualquier condición fisicoquímica en la que se encuentre el efluente a tratar, permitiendo el desarrollo *in-situ*, debido a su portabilidad (Hansen, Nuñez, Raboy, Schippacasse, & Grandon, 2007).

De igual manera, este dispositivo puede funcionar con baterías, por esta razón no es necesario tener en cuenta los costos de transporte del agua contaminada a la planta de tratamiento, disminuyendo considerablemente los gastos del proceso, las industrias a gran escala escogen este tipo de tecnología debido a que la inversión es mínima y los resultados de efectividad en cuanto al tratamiento son altos, incentivando así el uso de estas tecnologías en pequeñas industrias que por costos no están en capacidad de tratar sus vertimientos, así mismo es una tecnología ecológica ya que reduce considerablemente el uso de sustancias químicas que posteriormente puedan afectar el medio ambiente (Pérez, 2013).

Debido a sus características innovadoras la electrocoagulación se proyecta como una alternativa altamente efectiva en el tratamiento de aguas residuales, teniendo en cuenta los beneficios económicos generados en la operación y mantenimiento (Pérez, 2013). Por tal motivo se hace necesario aumentar los conocimientos sobre el funcionamiento de esta tecnología a nivel industria las investigaciones sobre la electrocoagulación van en aumento, generando avances considerables en la ejecución e implementación de este tipo de tratamientos; sin embargo, no se han encontrado estudios sobre los efectos que la electrocoagulación tiene sobre el arsénico en Colombia, evidenciando la falta información con respecto a las condiciones óptimas para la realización de un buen proceso de descontaminación del agua que contiene este tipo de metaloide.

A nivel mundial se han realizado múltiples estudios referenciando este tema, muy pocos son los que se han presentado a nivel local y nacional relacionados con arsénico, se busca con este estudio visibilizar la importancia de promover la experimentación y el análisis de efectuar una configuración electrónica apropiada para tratar aguas contaminadas con estos compuestos nocivos

para el ser humano y el medio ambiente (Mercado, Reyes, & Morante, 2006). La presente investigación aspira ser un aporte adicional a los estudio anteriores y al proceso de electrocoagulación específicamente al tratamiento de arsénico en agua, debido a que existen estudios exiguos donde las distintas variables como tiempo de residencia, densidad de corriente, voltaje, pH, entre otras, afectan el comportamiento y acondicionamiento del sistema, de manera que encontrar una estándar para este proceso es complejo.

La investigación realizó ensayos utilizando el proceso de electrocoagulación, esta prueba aportó datos sobre la remoción de arsénico mediante la configuración electrónica de diferentes variables tales como: tiempo y voltaje en este caso particular y con base en los resultados, se obtuvo una composición voltaje-tiempo más eficiente y con menor consumo de energía, que las planteadas en otros estudios estas variables, hicieron este proceso más eficiente, esto con el fin de determinar la conducta del contaminante, estandarizar el proceso y la forma más apropiada de tratarlo.

5. Alcance

El proyecto implementó un prototipo a nivel laboratorio que garantizó el proceso de coagulación en agua contaminada con arsénico, por medio de un electro-coagulador; el cual tiene como principio reemplazar el componente coagulante de sustancias químicas.

De acuerdo al objeto del proyecto se realizaron pruebas en el Laboratorio de Toxicología en la Universidad Santo Tomás de Villavicencio, sede Aguas Claras, para conocer las condiciones adecuadas en tiempo, composición de los electrodos y variaciones de voltaje, lo que permitió determinar la configuración electroquímica que garantizó un mayor rendimiento del proceso; es de resaltar que el agua utilizada fue de tipo experimental, donde a partir de soluciones de arsénico preparadas en laboratorio se simulaban las condiciones del recurso hídrico contaminado por este metaloide, las disoluciones en serie que se usaron en la fase 3 están basadas en un estudio realizado en el río Ocoa del departamento del Meta.

El proyecto tuvo una ejecución de seis meses, los cuales se dividieron en tres fases iniciando en el mes de febrero, estas fases permitieron definir parámetros importantes, para obtener un proceso de electrocoagulación eficiente.

Finalmente, el proyecto de investigación y el prototipo serán cedidos al Semillero de Investigación Electroquímica Ambiental, de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, para que sean utilizados como herramientas en el estudio y análisis de las concentraciones de contaminación por As en las aguas residuales del departamento del Meta; además la investigación servirá como punto de partida para una el desarrollo de una segunda etapa de análisis que permita la remoción de arsénico en efluentes industriales de manera eficiente.

6. Marco de referencia

6.1 Marco conceptual

La *Electroquímica* es un método que facilita la realización de procesos redox por medio de la aplicación de electricidad. Estos procesos permiten producir la generación de aglomerados que pueden sedimentarse o flotar dependiendo de la densidad producida (Restrepo et al., 2006). Una ventaja del método electroquímico es el uso de la *Oxido-Reducción electrolítica*, la cual permite la separación de los elementos del contaminante mediante aplicación de corriente eléctrica, donde se genera cohesión de electrones con carga positiva por medio del cátodo produciendo reducción, y la repulsión de electrodos con carga negativa por medio del ánodo produciendo oxidación (Lizarazo & Orjuela, 2013).

A partir del principio electroquímico, surgen alternativas para el tratamiento de aguas como la *Electrocoagulación*, que es un método que combina la electricidad con las reacciones químicas que presentan las sustancias con el fin de desestabilizar partículas principalmente metales pesados en cuerpos de agua con concentraciones superiores a las toleradas por el ser humano, donde son necesarios conductores eléctricos que dependen del material, distancia y voltaje aplicado (Monsalve & Cardona, 2014) (Sarria, Parra, Rincón, Torres, & Pulgarín, 2005).

Para llevar a cabo el proceso anterior, se requiere de un *Electrocoagulador*, el cual es un equipo que cumple la función de un reactor ya sea de tipo continuo o batch en el cual se desarrolla el proceso (Beltrán, 2015). Así mismo, este permite el desarrollo de reacciones pertinentes para la desestabilización de sustancias nocivas que resultará con la decantación o flotación de las partículas aglomeradas, esto dependerá de la densidad de estas (Nidheesh & Singh, 2017).

En un electrocoagulador se pueden encontrar dos tipos diferentes de electrodos, uno donde se generan las reacciones de oxidación, en la cual ocurre una pérdida de electrones llamada *Ánodo*, y el electrodo que recibe esos electrones, en el cual ocurre la reducción llamado *Cátodo*. De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, en la mayoría de los electrocoaguladores se utiliza como ánodo el aluminio, debido a sus ventajas de conductividad y facilidad de adquisición,

mientras que el cátodo más utilizado es de hierro, debido a la capacidad de adsorción en especies de arsénico (Garcés & Arango, 2007).

Dentro del proceso de electrocoagulación también se hace necesario la adición de un *Electrolito soporte* como solución auxiliar que contiene iones que no participan en la reacción del electrodo pero que permite conducir la electricidad a la molécula de interés. En el presente estudio se usa hidróxido de sodio como componente adicional para permitir la solubilidad y conductividad de la solución (Mercado et al., 2006).

El proceso de electrocoagulación utilizó *Arsénico* como contaminante de estudio para conocer los porcentajes de remoción, ya que este metaloide con estado de oxidación +5, se encuentra de forma natural en la atmósfera, rocas y biosfera, donde es emitido por procesos de erosión y se dispersa por medio del aire o agua. Al llegar a diversas superficies los organismos generan cambios en su distribución y composición, permitiendo la variación de forma orgánica a inorgánica, su presencia en el agua se hace a través de Arsenito, el cual presenta características contaminantes en el recurso hídrico produciendo efectos negativos a la salud humana (Alarcón, Leal, Martín, Miranda, & Benavides, 2014). Otra característica que presenta este elemento hace referencia a las condiciones en disolución. Para un intervalo de pH de 4 a 10, las especies de arsénico (V) se encuentran cargadas negativamente, mientras que las de especies (III) se encuentran en forma neutral, razón por la que resulta remover fácilmente las de especies (V) ya que son más absorbentes. Al aplicar la electrocoagulación se pretende cargar negativamente el trióxido de As para configurarlo a pentóxido de arsénico, el cual es de mayor aglomeración con coagulante *in situ* (Song et al., 2017).

6.2 Marco Teórico

El auge actual del sector productivo conduce al aumento de la industria a nivel nacional, generando beneficios económicos para el país, esto a su vez afecta los recursos naturales; uno de los más afectados es el recurso hídrico, gran parte de las industrias son generadoras de aguas residuales que contienen sustancias contaminantes, nocivas para la salud; por tal razón se han

implementado tecnologías para el tratamiento de estas aguas, disminuyendo el riesgo sobre el medio ambiente (Alonso, 2014).

Uno de los tratamientos convencionales más eficaces es la coagulación, que consiste en agregar sustancias químicas al agua con el fin de modificar el comportamiento de las partículas suspendidas; antes del proceso las partículas se repelen una a otras, al aplicar la coagulación sucede lo contrario, las partículas son atraídas por el químico que se agrega, generando su aglomeración, estas partículas son posteriormente eliminadas; mejorando notablemente la calidad del agua. Los avances tecnológicos permiten la innovación en procesos de coagulación implementando herramientas que eliminen el uso de los químicos por medio de la formación de coagulantes in-situ, usando energía eléctrica, como en el caso de la electrocoagulación (Mercado et al., 2006).

La electrocoagulación (EC), como tecnología limpia tuvo sus inicios en el año 1904 en Estados Unidos y fue utilizada como herramienta para el tratamiento de aguas negras, esta consiste en un proceso que combina electricidad y métodos químicos, para separar los metales pesados, compuestos orgánicos disueltos y sólidos en suspensión, ver Ilustración 1. La eliminación o sustitución de elementos químicos por electricidad es uno de los grandes beneficios que actualmente ofrece la electrocoagulación, un beneficio adicional es que reduce la cantidad de lodos generados en la remoción, estos presentan la característica de ser más compactos permitiendo su fácil disposición, también se puede observar que los flóculos formados tienden a ser mayores que los generados por coagulación química donde finalmente el agua resultante está en condiciones más óptimas de ser reutilizada en otras actividades (Castro, 2006).

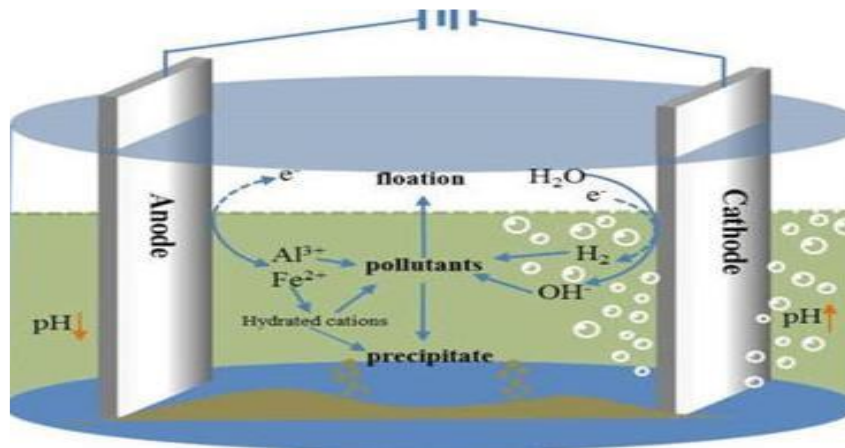


Ilustración 1. Proceso de electrocoagulación por (Song et al., 2017).

Como se describe anteriormente el objetivo principal de la electrocoagulación (EC) es producir coagulantes in situ por medio reacciones químicas generadas en el contacto de los electrodos (frecuentemente de materiales como hierro y aluminio), con el agua contaminada presente en la celda de EC, la efectividad de este proceso puede verse afectado por variables como pH y conductividad, las cuales intervienen en las reacciones químicas generadas en el sistema, determinando la formación del coagulante (Song et al., 2017).

Según Mollah y Yousuf (2001) en el proceso de electrocoagulación se desarrollan tres fases continuas; en la fase inicial debido a la oxidación electrolítica presente en el ánodo de sacrificio se produce el coagulante, seguido a esto se presenta una desestabilización de las partículas del contaminante, fragmentación de aglomerados dando como resultado a la fase final, que consiste en la formación de flóculos (Mollah & Yousuf, 2001).

El material de los electrodos, hierro y aluminio, están directamente relacionados con la formación de coagulantes, estos metales debido a sus características proporcionan los iones necesarios para generar las reacciones electrolíticas que permiten la remoción del contaminante (Arango, 2014).

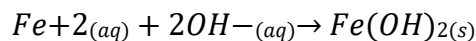
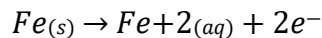
En el caso del hierro, los óxidos de este se han utilizado considerablemente como coagulantes para la eliminación de especies de arsénico, debido a la gran afinidad de adsorción que tiene por el arsénico, permitiendo la aglomeración de grandes superficies (Dixint & Hering, 2003).

En cuanto a los óxidos de hierro estos se han usado en diferentes formas para procesos de eliminación de As, ya sea en suspensiones, camas empaquetadas de óxido de hierro, (Song et al., 2017), coagulación química convencional (Meng, 2000) o electrocoagulación con electrodos de hierro (Kumar, Shaudhari, Khilar, & Mahajan, 2004).

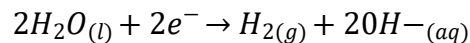
En razón a lo expuesto, el hierro comúnmente usado como ánodo produce iones metálicos, los cuales según la Ley de Faraday generan óxido ferroso debido a la oxidación del electrodo de hierro a Fe (II) disuelto. Otra condición presente en la solución es la formación de óxido férrico, donde el hierro es liberado como Fe (II) a la solución, y este entra en contacto con oxígeno disuelto permitiendo su oxidación a Fe (III) (Reacciones de hidróxido ferroso e hidróxido férrico). En el cátodo se genera hidróxidos a partir de la reducción del agua (Arango, 2014).

Hidróxido Ferroso Fe (OH)₂ (s)

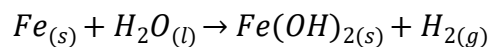
Ánodo



Cátodo



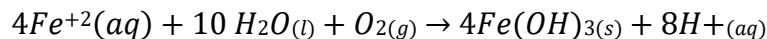
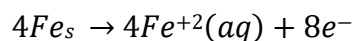
Reacción



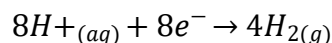
Fuente: (Mollah et al., 2004)

Hidróxido Férrico Fe (OH)₃ (s)

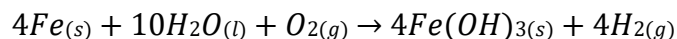
Ánodo



Cátodo



Reacción



Fuente: (Mollah et al., 2004).

La producción de hidróxidos de hierro genera que los flóculos, principalmente los de carga negativa se acumulen, adicionalmente a este proceso se proporciona una fuerza de atracción que permite que otras partículas del contaminante sean atraídas y atrapadas por el aglomerado, permitiendo la remoción del contaminante en el agua (Mollah et al., 2004).

Cuando los iones del Al^{+3} presentes en el cátodo, entran en contacto con los hidróxidos, se genera la producción de especies monómeras y polímeros, los cuales reaccionan formando hidróxido de aluminio $Al(OH)_3$, este compuesto tiene propiedades de atracción de partículas que benefician la adsorción de compuestos contaminantes (Mollah et al., 2004).

Se logró identificar algunas de las variables más importantes para la implementación del proceso, donde se encuentran: el material de los electrodos y su selección entre catión y anión, la distancia de los electrodos, la densidad de corriente y el voltaje; todas directamente relacionadas con la efectividad del proceso (Arango, 2014), (Feria, Escobar, & Marínez, 2014), (Alonso, 2014).

Para el material de los electrodos se debe tener en cuenta la selección de cátodo y ánodo, para el caso del cátodo se generan unas reacciones anódicas que permiten que el material de este (Hierro y/o Aluminio) genere hidrólisis y formación de polímeros a medida de que el producto del cátodo y ánodo reaccionen, es decir que la reacción del electrodo que se oxida y el que se reduce produce coagulantes *in-situ*, los cuales son hidróxidos que desestabilizan las partículas generando flóculos que pueden flotar o decantarse, la flotación en el proceso de EC no se produce por diferencia de densidades, sino porque en las reacciones químicas del proceso se genera hidrógeno, el cual permite que las partículas del contaminante se encuentren en suspensión (Arango, 2014).

En cuanto a la separación entre los electrodos se recomienda calcular de acuerdo con el tamaño del reactor debido a que este es un parámetro que afecta el proceso, ya que a mayores distancias se genera un consumo de energía alto debido a que los voltajes y el tiempo de reacción requeridos en el proceso aumentan considerablemente (Arango, 2012).

Por otro lado, si la distancia de los electrodos es la adecuada según las condiciones del reactor se genera una estabilización en la formación de burbujas de hidrógeno que facilitan la flotación de los *flocs*. No obstante, cuando la distancia es menor a la requerida por el reactor se afecta la eficiencia de remoción debido a que la resistencia del electrolito aumenta induciendo a la inestabilidad del proceso (Restrepo et al., 2006).

Otro factor importante para la remoción de arsénico es la densidad de corriente debido a que esta se encuentra directamente relacionada con la tasa de generación de coagulantes, burbujas de gas y el tamaño de los flóculos; además de esto si la densidad de corriente se encuentra en condiciones ideales permite que aumente el número de iones metálicos disueltos en la solución, fortaleciendo la generación de cationes de hidróxidos que son los encargados de reducir el contaminante, esto genera que las burbujas de hidrógeno formadas se multipliquen y se hagan más pequeñas ayudando a mejorar la eficiencia del proceso. En cuanto al voltaje debe estar cercano a los 20 V, debido a que a mayor rango de voltaje se genera una sobrecarga en el sistema (Restrepo et al., 2006).

Adicionalmente los modos de conexión de electrodos influyen en la efectividad del reactor debido a la distribución de energía en este, los más comunes son las conexiones de serie monopolar (MP-S), paralela o monopolar (MP-P) y serie bipolar como se puede observar en la Ilustración 2 (Mollah et al., 2004).

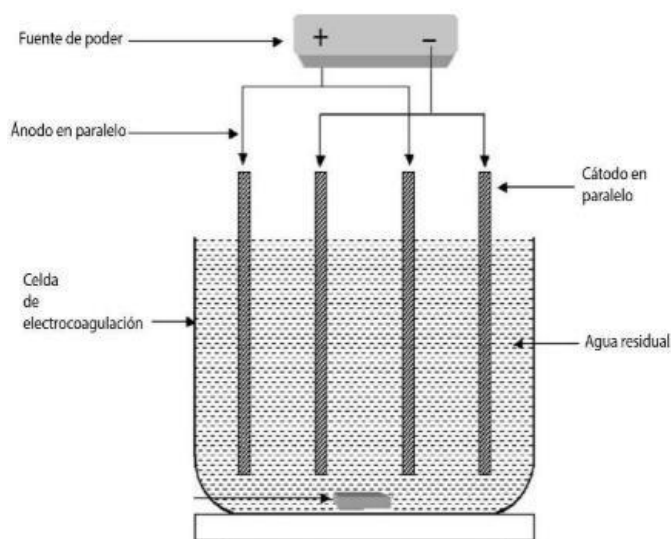


Ilustración 2. Conexiones Celda Electroquímica por (Mollah et al., 2004).

La conexión paralela monopolar, tiene grandes ventajas debido a su relación directa con la densidad de corriente, permitiendo un menor consumo de energía y presentando rendimientos más altos debido a la formación de coloides de mayor tamaño (Mollah et al., 2004).

Para la variable de pH, aunque no se han realizado estudios que demuestran la relación de ésta con la remoción de arsénico, el pH en las soluciones a tratar varía dependiendo el tipo de electrodos a implementar, el uso de electrodos de hierro ha presentado eficiencias de remoción de arsénico con pH de 6.5, en cambio con electrodos de aluminio el pH se encuentra en un rango cercano a 7. La combinación de electrodos de hierro y aluminio determina rangos de pH de 5 - 7, los cuales generan el mayor grado de efectividad en el reactor (Tsouris, DePaoli, Shor, Hu, & Ying, 2001).

Ahora bien, desde la posición de Beltrán (2015) el proceso de electrocoagulación expone varios factores que inciden sobre las garantías que puede ofrecer su implementación, el beneficio más evidente se observa en la reducción de costos de construcción, operación y mantenimiento que por su arquitectura son relativamente bajos con respecto a otros métodos no convencionales donde se implementan practicas sostenibles. Además, el material requerido es de fácil adquisición ya que son metales disponibles en el mercado con bajos costos, las placas removibles permiten un

mantenimiento adecuado al reactor lo cual ofrece una durabilidad considerable alargando su tiempo de remplazo (Beltrán, 2015).

Estudios realizados a nivel nacional, admitieron el uso de algunas variables para la implementación de un sistema de electrocoagulación estas son:

1. El material de los electrodos.
2. La capacidad del reactor.
3. La distancia entre electrodos.

Así como los parámetros eléctricos de voltaje y amperaje necesarios para el desarrollo de este proceso.

Esta tecnología ha sido estudiada para ser aplicada por la industria láctea, conocida por generar aguas residuales con altas concentraciones de DBO, DQO, grasas, aceites y materia orgánica, generando porcentajes de remoción cercanos al 90% en procesos realizados a escala de laboratorio.

Para metales pesados los estudios han sido pocos o casi nulos, debido a la complejidad del manejo de este tipo de sustancias, los procesos experimentales a escala de laboratorio realizados para estos compuestos, mostraron una remoción máxima de estos metales al 80% donde se evaluó la intensidad de corriente para generar una relación directamente proporcional que a mayor intensidad se genere mayor remoción del contaminante, no obstante esta variable aumenta considerablemente el consumo de energía (Ruiz, 2017).

La escasa literatura refleja que la aplicación de la electrocoagulación ha servido para el tratamiento de aguas contaminadas por metales y metaloides, uno de estos es el Arsénico, el cual es un metaloide que produce múltiples afectaciones sobre la salud pública por los efectos nocivos que tiene sobre los seres humanos especialmente en su estado de oxidación (III) siendo este el más tóxico (Hansen et al., 2007).

De esta manera Alonso (2014) expresa que la presencia de Arsénico en la atmosfera, rocas y biosfera con relación a los estados de oxidación que este puede presentar son algunas de las causas que generan que este elemento se determine como un contaminante. El arsénico es utilizado en diversos sectores industriales en muchos países, Colombia no es ajeno a su uso, ya que se encuentra presente en la manufactura de productos, situación incrementa la preocupación debido a los vertimientos que se generan (Alonso, 2014).

El arsénico está presente en el ambiente en diferentes formas, pero la más preocupante es el trióxido de arsénico As_2O_3 debido a su alta toxicidad, esta sustancia tiene la característica de ser un óxido anfótero, por lo que es un compuesto débilmente ácido, lo cual facilita que se disuelva en sustancias altamente alcalinas como el hidróxido de sodio formando soluciones de arsenito de sodio NaAsO_2 , sustancia usada en industrias relacionadas al uso de pesticidas, conservación de la madera y el cuero, la cual genera gran afectación al ambiente debido a su característica de acumulación, adicionalmente los problemas de salud relacionados a esta sustancia abarcan desde irritaciones en la piel hasta cáncer de piel y mutaciones (Restrepo et al., 2006).

La enfermedad más común relacionada a casos de exposición al arsénico es arsenicosis, siendo la principal causa de la aparición de dicho problema de salud está altamente ligado a una deficiente o escasa potabilización del agua para consumo humano, por esta razón la determinó en 10 mg/L el nivel máximo permisible de arsénico en agua para consumo humano (Organización Mundial de la Salud, 2018). En respuesta a lo anteriormente expuesto, se plantea la aplicación del presente estudio, el cual se enfoca en el diseño y construcción de un Electrocoagulador a escala laboratorio teniendo en cuenta la configuración eléctrica que permita remoción de arsénico en diferentes concentraciones, buscando una efectividad cercana al 100%, buscando que las concentraciones finales se encuentren en un nivel inferior a los límites permisibles por la normatividad colombiana para vertimientos y si es posible para tratamientos de agua para consumo humano (Song et al., 2017).

Ley de Faraday

La cantidad de electricidad que pasa por una solución electrolítica se relaciona directamente con el peso de la sustancia formada por una reacción química en los electrodos, es decir que la formación coagulante que permite la remoción del contaminante se encuentra directamente relacionada con el voltaje proporcionado al proceso.

La carga eléctrica transportada por $6,02 \times 10^{23}$ electrones se denomina Faraday y es equivalente a 96500 Culombios (Reyes & Mercado, 2003).

$$1,0622 \times 10^{-19} \text{ (culombios / electrón)} \times 6,02 \times 10^{23} \text{ (electrón / mol)}$$

$$= 96500 \text{ (culombios / mol)}$$

$$1 \text{ mol de } e^- = 1 \text{ F} = 96500 \text{ Culombios}$$

La velocidad de flujo de electricidad está expresada en amperios, el flujo de un Culombio en un segundo representa un amperio

$$\text{Culombio} = \text{Amperio} \times \text{Segundo}$$

$$Q = I \times t$$

Donde

Q: Número de Culombios

I: Corriente

t: Tiempo

Primera Ley “La cantidad de una sustancia liberada o depositada en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa por un electrolito” (Reyes & Mercado, 2003).

$$m = eQ$$

(masa = equivalente electroquímico x la cantidad de electricidad (coulombs))

6.3 Marco legal

En la Tabla 1, se observa la normatividad que da soporte.

Tabla 1. Normatividad aplicable en el tratamiento de aguas residuales.

Norma	Expedido por	Descripción	Pertinencia en el proyecto
Decreto Ley 2811 de 1974	Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible	Plantea la incorporación de la protección de los recursos naturales como el recurso hídrico	Permite sensibilizar a las personas sobre la importancia de cuidar y conservar las riquezas naturales, utilizándola racionalmente
Ley 99 de 1993	Congreso de Colombia	Se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.	Se enmarcan las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la protección del medio ambiente entre ello el recurso hídrico y de asegurar el desarrollo sostenible.
Decreto 1594 de 1984	Ministerio de Agricultura	El decreto reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos	Se presenta los principales procesos convencionales en el tratamiento de agua residual y los contaminantes de interés sanitario, entre ellos el arsénico.
Resolución 1096 del 2000	Ministerio de Desarrollo Económico	Se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS.	Permite conocer las pertinencias del sector de suministro, construcción y recepción del agua
Resolución 2115 de 2007	Ministerio de la Protección Social Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Presenta las características fisicoquímicas para la calidad del agua de consumo humano	El documento proporciona la concentración máxima permisible de contaminantes como el arsénico, siendo 0,01 mg/L.
Resolución 631 de 2015	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Establece los parámetros y valores máximos permisibles en los cuerpos de agua receptores de vertimientos puntuales.	Se adoptan valores máximos permisibles de concentración de arsénico en vertimientos provenientes de diferentes sectores productivos

Nota: Normatividad Colombiana referente a concentraciones de arsénico en el recurso hídrico y variables estudiadas. Adaptado “Decreto Ley 2811 de 1974”, “Decreto 1594 de 1984”, “Ley 99 de 1993”, “Resolución 1096 de 2000”, “Resolución 2115 de 2007” y “Resolución 631 de 2015”. Por Manchego & Zabala, 2019.

7. Metodología

El proyecto utilizó un diseño de investigación experimental, teniendo en cuenta que para el desarrollo de las muestras los autores realizaron manipulación intensional de las variables, con el fin de hallar la eficiencia del electrocoagulador para la remoción de arsénico en agua contaminada, ver Tabla 2 (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

Tabla 2. Diseño metodológico de las fases del proyecto.

Fase	Procesos	Resultados
Fase 1. Diseño experimental	<pre> graph TD A[Montaje experimental] --> B[Preparación de la solución] B --> C[Medición de las variables] </pre>	Evaluar el diseño experimental para obtener la configuración electroquímica de la celda.
Fase 2. Configuración y ejecución del prototipo	<pre> graph LR A[Montaje del prototipo] --> B[Ejecución del prototipo] </pre>	Identificar las condiciones del agua finalizado el tratamiento.
Fase 3. Eficiencia del electrocoagulador	<pre> graph LR A[Análisis normatividad nacional de los parámetros permisibles del agua potable y residual.] --> B[Resultados de la eficiencia del proceso del electrocoagulador] </pre>	Conocer la eficiencia del proceso de electrocoagulación y la relación con la normatividad ambiental en Colombia.

Nota: Diagrama metodológico. Adaptado de Manchego & Zabala, 2019.

Hipótesis

Ho. La configuración electrónica de la celda de electrocoagulación no permitió la remoción de arsénico en aguas.

H1. La configuración electrónica de la celda de electrocoagulación permitió la remoción de arsénico en aguas.

En los siguientes párrafos, se hace una presentación de los materiales y métodos requeridos por cada una de las fases propuestas, con el fin de evaluar la eficiencia de un Electrocoagulador para la remoción de arsénico en agua, este experimento se realizó en los laboratorios de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio Facultad de Ingeniería Ambiental.

7.1 Fase 1. Diseño experimental

7.1.1 Montaje Experimental

En primer lugar, se optó por evaluar la eficiencia del prototipo mediante la ejecución de un diseño experimental, que permitió determinar la importancia de las variables definidas, considerando que estas, generaban las condiciones ideales para la remoción del contaminante en estudio.

El prototipo de reactor seleccionado está construido con base en un diseño tipo Batch, debido a que la prueba se realizó usando concentraciones bajas de arsénico, además la solución no muestra otro tipo de compuestos contaminantes, y el volumen del agua contaminada es de 1 Litro. Las características de su construcción se muestran en la Tabla 3. Se observa el montaje y los materiales utilizados para este diseño, el cual se compone de las siguientes partes:

Reactor: Se utilizó un reactor construido en policarbonato, con forma cuadrada, la dimensión en cada uno de sus lados es de 15 centímetros, su capacidad en volumen, tiene un total de 3,375 litros, posee dos barras en policarbonato con ranuras transversales de 1,5 cm para sujetar los electrodos, estos cuentan con 1 cm de espacio entre las paredes y a tope con el fondo del reactor, este tipo de reactor se diseñó pensando en tres áreas de vital importancia, las cuales son:

- Zona superior donde se genera la flotación de los aglomerados formados.
- Zona media donde se producen la reacción y el proceso de coagulación in situ por los electrodos dispuestos en paralelo.
- Zona inferior donde se genera la sedimentación.

Fuente de Poder: Se utilizó una fuente de poder modelo PS 3030 que suministra una corriente continua y regulable, con rango de voltaje de 0 a 30 y corriente de 0 a 3 A, se determinó usar este equipo debido a que garantiza el suministro continuo y regulable de las variables a analizar, generada a partir de la Ley de Faraday, por otra parte, el costo de adquisición era acorde con el presupuesto establecido.

Electrodos: Los electrodos usados son de materiales de aluminio para el ánodo y para el cátodo de hierro, dado a que son usados en mayor medida por estudios realizados referentes al tema de tratamiento de agua contaminada por arsénico, adicionalmente son materiales de fácil adquisición y de coste bajos, las dimensiones son de 12 cm de alto y 15 ancho con un espesor de 0,2 cm, la distancia entre el ánodo y cátodo es de 15 mm, esta se determina de acuerdo a la relación inversamente proporcional que indica que a menor distancia mayor efectividad, los electrodos se encuentra ubicados en posición monopolar ubicados en paralelo (Mandal, Badal & Suzuki, Kazuo, 2002), (Lee & Gagnon, 2014).

pH metro: Este permitió determinar la concentración de los iones de hidrógeno para conocer la acidez o alcalinidad de la solución.

Multiparámetro: Se usó un medidor de precisión digital de marca WTW modelo 3620 IDS set G, este permite la medición de pH, conductividad, sólidos totales disueltos (STD) y de forma confiable, las características de calibración y estabilidad del equipo generan menor porcentaje de error en los resultados.

Agitador magnético: Se usó un agitador de marca HeiDolph, modelo estándar con una velocidad ajustable máxima de 1400 rpm, y una temperatura máxima de 30°C, para efectos del proyecto se empleó con una velocidad constante de 500 rpm y temperatura ambiente de 25°C.

Tabla 3. Medidas del reactor del electrocoagulador.

Medidas	Valor cm	Imagen
LARGO	15	
ANCHO	15	
ALTO	15	

Nota: Características del electrocoagulador. Adaptado de Manchego & Zabala, 2019.

7.1.2 Preparación de la solución

Se trabajó una solución de NaAsO_2 (Arsenito de sodio), formada a partir de As_2O_3 (Trióxido de arsénico) y NaOH (Hidróxido de sodio), el proceso de formación se realizó según el procedimiento planteado en el manual de IBEROARSEN, sobre temas específicos para la preparación de soluciones con Arsénico (Litter, Armienta, & Farías, 2009). La concentración de la solución patrón para realizar la fase experimental se determina mediante la ecuación (Beltrán, 2015):

$$\text{ppm} = \frac{\text{Masa Solute (g)}}{\text{Volumen Solución (ml)}} \times 1000$$

$$\text{ppm} = \frac{0.05 \text{ g Contaminante}}{1000 \text{ ml Agua}} \times 1000 = 50 \text{ ppm}$$

La dosificación de la solución se realiza de forma manual, mediante una balanza digital, el contaminante que se usó para realizar el proceso de fase experimental, y análisis de efectividad del reactor a nivel laboratorio fue el trióxido de Arsénico (As_2O_3).

De acuerdo con esto, la solución de arsenito de sodio se preparó de la siguiente manera:

a) Se usó un vaso de precipitado de 1000 ml, donde se añadió 0,05 g de Trióxido de Arsénico previamente pesado en una balanza analítica.

b) La sal de trióxido de arsénico, se comporta como un óxido anfótero, debido a esto fue necesario usar una solución alcalina para garantizar la dilución.

c) Se agregó 0,04 g de hidróxido de sodio como solución alcalina a la mezcla de agua destilada y 0,05 g de trióxido de arsénico, lo que permitió formar una solución de arsenito de sodio.

d) El hidróxido de sodio además de mejorar la disolución, intervino como electrolito soporte mejorando la conductividad de la mezcla (Daniel & Guevara, 2018).

e) La mezcla se ubicó en el agitador a una velocidad de 500 rpm y a una temperatura constantes de 25°C, durante 5 minutos, para mejorar la dilución de los compuestos.

7.1.2 Diseño experimental Electrocoagulador

El montaje experimental, contó con un reactor de flujo discontinuo tipo Batch, las características del diseño de la celda se exponen en la Tabla 4, adicionalmente la Ilustración 3 muestra el montaje con sus respectivas partes.

Tabla 4. Características Celda Electrocoagulación.

Celda Electroquímica	Altura	15 cm
	Ancho	15 cm
	Volumen	3.75 cm ²
	Separación de Electroodos	2 cm
Electrodos	Altura	12 cm
	Ancho	14 cm
	Espesor	0.2 cm
Fuente De Poder (DC)	Rango Voltaje	0-30 Voltios
	Rango Amperaje	0-300 mA

Nota: Características del reactor, electrodos y fuente de poder. Adaptado por Manchego & Zabala, 2019.

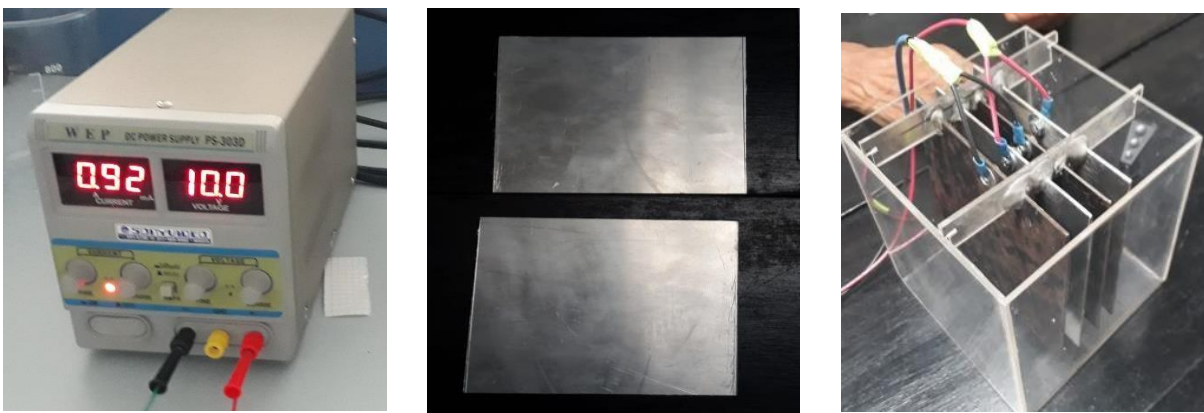


Ilustración 3. Fuente regulable, Electroodos, Celda EC (experimental) (Manchego & Zabala, 2019).

Para la fase experimental se realizaron pruebas en la celda de electrocoagulación, está contaba con cuatro electrodos ubicados en el medio del reactor, los cuales tenían posición monopolar que iniciaba con ánodo de material aluminio y finaliza con cátodo de hierro.

Previo a la ejecución del reactor se realizó limpieza a los electrodos con lija y lavado al reactor con agua destilada para evitar interferencias en el proceso.

El fin de la fase experimental era conocer el voltaje con mayor grado de efectividad para el proceso de remoción de contaminantes, para el caso particular se utilizó arsénico como compuesto de estudio. Como se puede apreciar en la Ilustración 4 se determinó la variable mediante el análisis del tiempo que requirió cada voltaje para la formación de flóculos, adicionalmente se analizó la calidad de esos teniendo en cuenta el menor tiempo y consumo de energía.



Ilustración 4. Montaje Experimental (Manchego & Zabala, 2019).

7.1.3 Evaluación del diseño experimental

La finalidad de esta fase fue realizar el tratamiento de remoción en agua contaminada con arsénico, a partir del análisis de las variables que afectan el proceso de electrocoagulación, por tal motivo se evaluó la concentración de arsénico teniendo en cuenta el tiempo de residencia, la distancia y material de electrodos, pH inicial y conductividad, esto se realizó con el fin de establecer las condiciones de operación óptimas en el tratamiento de remoción que permite el mayor porcentaje de eficiencia.

El diseño experimental utilizó una solución patrón de NaAsO_2 (Arsenito de sodio) con una concentración de arsénico inicial conocida de 0.05 g/L, dicha solución contenía hidróxido de sodio que permitió aumentar la conductividad y mejorar el proceso.

El voltaje que posiblemente permitirá la remoción de arsénico en el agua se determinó teniendo en cuenta la primera Ley de Faraday, la cual es referente en los procesos de electrolisis, esta determina que la cantidad de masa depositada en un electrodo es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que pasa por un electrolito, es decir que:

$$1 \text{ mol de } e^- = 1 \text{ Faraday} = 96500 \text{ Coulombs}$$

De acuerdo a los Coulombs totales de la concentración que se está evaluando, se logró determinar la velocidad del flujo de electricidad expresada en amperios mediante la siguiente ecuación (Reyes & Mercado, 2003).

$$Q = I * t$$

Donde:

Q : Numero de Coulombs (C)

I : Corriente (Amperios)

T : Segundos (s) (Reyes & Mercado, 2003).

Conociendo el valor de la corriente, y la resistividad del material de electrodos se determinó el voltaje que genera la reducción del contaminante de arsénico según la siguiente ecuación:

$$V = I \times R.$$

Donde:

V: Voltaje (V)

I: Corriente (Amperios)

R: Resistencia (Ohms) (Reyes & Mercado, 2003).

La ecuación se divide en dos partes, inicialmente se determinó la corriente que era necesaria para la remoción de arsénico, en este paso fue necesario conocer la concentración, peso molecular y el número de electrones presentes durante una reacción química, en este caso el trióxido de arsénico (As_2O_3) tiene 3 electrones.

Seguido a esto, se evaluó la resistencia de los electrodos de acuerdo con el material y el área de cada uno. Para realizar los cálculos se tomó como referencia el tiempo en el que posiblemente se consume el contaminante de acuerdo con estudios previamente analizados.

Una vez determinado voltaje mediante la Ley de Faraday, se seleccionaron tres voltajes diferentes que se encuentran en el rango obtenido a través de la revisión bibliográfica donde el mínimo voltaje es de 10V y el máximo de 20V, estos se evaluaron teniendo en cuenta la capacidad de formar flóculos, y las características visuales de los aglomerados sólidos o compactos como se evidencia en la Tabla 5.

Tabla 5. Evaluación de la formación de flóculos de acuerdo con el voltaje.

Muestra	Voltaje	Tiempo de formación de flocs (min)
Muestra 1	7	12
Muestra 2	10	4
Muestra 3	13	3
Muestra 4	16	3

Nota: Análisis de muestras posterior al tratamiento con diferentes voltajes. Adaptado de Manchego & Zabala, 2019.

Adicional al análisis de formación de flóculos en los voltajes determinados, se evaluó el consumo de energía ya que este se encuentra altamente ligado a los gastos económicos en la ejecución de un proyecto y si no se muestran resultados favorables relacionadas a la disminución de costos la decisión correcta sería no ejecutar el proyecto. Debido a esto se calculó el consumo de energía mediante el tiempo de formación de flóculos, voltaje y corriente mediante la siguiente ecuación:

$$Ce = \frac{i * U * t}{60 s}$$

Donde:

i : Corriente (Amperios)

U : Voltaje (V)

t : Tiempo (s)

Finalmente, todos los ensayos de la fase experimental fueron realizados en una celda de electrocoagulación (Ver Ilustración 5) con configuración monopolar y electrodos ubicados en paralelo.

7.2 Fase 2. Configuración y ejecución del prototipo

Continuando con la ejecución de los objetivos propuestos en la tesis, teniendo en cuenta los resultados que se obtuvieron en los ensayos realizados al diseño experimental, se realizaron los ajustes requeridos para el montaje del reactor.

7.2.1 Montaje del Prototipo

Se realizó el ensamblaje final del reactor de acuerdo con las modificaciones resultantes del montaje experimental el cual tuvo las siguientes características (Ver Tabla 6):

Se utilizó el mismo reactor del montaje experimental con una capacidad de almacenar un volumen máximo de 3,375 L, el número de electrodos necesario para el correcto funcionamiento del Electrocoagulador mediante la siguiente ecuación (Ver Ilustración 6):

$$\text{Número de electrodos} = \frac{(\text{Base}) - 2 * (\text{Distancia Electrodos})}{(\text{Altura de electrodos} + \text{Espesor de electrodos})}$$

$$\text{Número de electrodos} = \frac{(150\text{mm}) - 2 * (20\text{mm})}{(12\text{mm} + 2\text{mm})} = 7.85 \approx 8$$

(Garcés & Arango, 2007).

El prototipo fue construido con dimensiones de 150 milímetros por cada lado, su capacidad en volumen fue de 3,375 litros, utilizando un material acrílico con un espesor de 3 milímetros, adicionalmente contó con dos soportes para los electrodos, este tenía dispuesta una llave de desagüe en la parte posterior para la disposición del agua tratada, como se puede observar en la Ilustración 5.

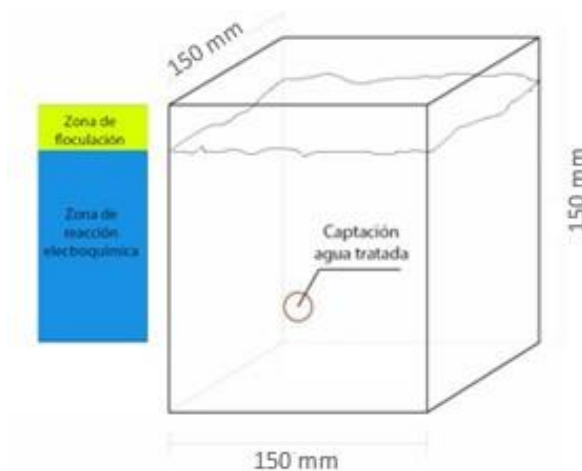


Ilustración 5. Diseño de la celda de electrocoagulación. Basada en el modelo de (Ruiz, 2017). Adaptada por (Manchego & Zabala, 2019)

En esta etapa del procedimiento se utilizó la fuente de poder del diseño experimental, que suministró una corriente continua y regulable, con rango de voltaje de 0 a 30 V y corriente de 0 a 3 A.

7.2.2 Ejecución del Prototipo

La Fase 2 se dividió en dos partes para su ejecución, lo que permitió conocer las condiciones ideales para la remoción del contaminante.

Inicialmente teniendo el valor del voltaje resultante en la Fase 1, se realizó la evaluación del voltaje con respecto a los tiempos determinados de acuerdo a las revisiones bibliográficas que presenta un rango entre 10 y 60 minutos para concentraciones de contaminantes que no sobrepasan el ciclo de 20 a 60 ppm (Nidheesh & Singh, 2017), (Mandal, Badal & Suzuki, Kazuo, 2002) (Singh, Singh, Parihar, Singh, & Prasad, 2015). en la tabla 4 se evidencia el proceso realizado.

Tabla 6. Resultados Fase 2.

Configuración eléctrica	Tiempo en minutos
Voltaje	10
	20
	30
	40

Nota: Muestreo de concentraciones en diferentes tiempos. Adaptado por Manchego & Zabala, 2019.



Ilustración 6. Montaje Reactor (Manchego & Zabala, 2019).

En la segunda parte de la fase se realizó una caracterización físico - química de cada una de las soluciones al inicio y el final de cada tratamiento, determinando la conductividad eléctrica, el pH, sólidos totales disueltos, con el fin de conocer el comportamiento que tiene el funcionamiento del reactor frente a las condiciones mencionadas del agua contaminada, lo que permitió identificar si el proceso ayuda a mejorar la calidad del agua además de reducir la concentración del contaminante. Para realizar esta etapa se utilizó un multiparámetro que sirvió como equipo medidor de la conductividad eléctrica, y los sólidos totales suspendidos, además de un pH metro y un vaso de precipitado de 500 ml.

7.3 Fase 3. Eficiencia del Electrocoagulador

Para el caso estudiado se utilizó la ecuación de la eficiencia de la remoción (%) mediante la ecuación:

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{\text{concentración inicial} - \text{concentración final}}{\text{concentración inicial}} * 100$$

Fuente: (Guzmán, Granada, & Calderon, 2014)

La ecuación requiere de la concentración inicial, la cual se preparó como solución patrón sobre la concentración final que determinó mediante un análisis realizado en un laboratorio externo certificado por el IDEAM (ver anexo A) (Consultoria y Asesoría Conocer Ltda., 2019), debido a que los equipos con los que se pretendía tomar las concentraciones no presentan los químicos necesarios para su calibración y ajuste de la muestra, de esta manera se optó por enviar las muestras a un laboratorio externo, esto permitió una mayor confiabilidad del resultado de las muestras.

Adicionalmente, se realizó una caracterización del agua, identificando factores como la conductividad, pH, sólidos totales disueltos inicial y final, los cuales fueron utilizados para analizar la normatividad de los límites máximos permisibles de agua potable y residual en Colombia, en el cual se tomó como base una recolección bibliográfica en la que se seleccionó la normatividad aplicada al caso de estudio.

Para el análisis de la información se recurrió al método estadístico descriptivo (frecuencia, promedio, media, desviación, mínimo y máximo) mediante el programa IBM SPSS en el cual se tabuló la información de los resultados y los datos de la normatividad colombiana.

Por último, se realizó el análisis de tres disoluciones en serie (Tabla 7 – Anexo B) para conocer el rango de concentración de arsénico que fue capaz de remover la celda electroquímica. De igual manera, se muestran las concentraciones, que fueron objeto de estudio por medio de los tratamientos de electrocoagulación, estos tenían una configuración eléctrica establecida en anteriores ensayos, donde se determinó el tiempo y voltaje con mejor eficiencia.

Tabla 7. Disoluciones en serie.

Voltaje V	Tiempo	Disoluciones en Serie mg/L
X	X	0,05000
		0,02500
		0,01250
		0,00625

Nota: Variación de la concentración con la configuración electroquímica seleccionada. Adaptada por Manchego & Zabala, 2019.

Con relación al valor agregado que ofrece el desarrollo de esta investigación como una primera fase experimental en la que se evaluaron cuatro variables que permitan mediante el proceso de electrocoagulación realizar la remoción del contaminante, favoreciendo el desarrollo de las actividades en las microempresas o espacios residenciales. Es importante mencionar, que bajo el análisis del proceso realizado el manejo de los costos primero en función del consumo de energía eléctrica y segundo en la implementación de este, conllevan a una segunda etapa del proyecto en la que se espera evaluar otras variables directas para el desarrollo mismo. De igual manera el estudio pretende conocer la aplicación de la electrocoagulación teniendo en cuenta los rangos de concentración ya sea mayor o igual y/o menor o igual a un promedio establecido para cada empresa.

8. Resultados

Para dar respuesta a los objetivos planteados se procede a describir el trabajo realizado en el laboratorio.

8.1 Diseño experimental del prototipo para tratamiento de agua previamente contaminada con arsénico.

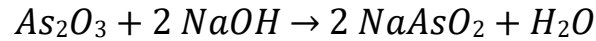
8.1.1 Preparación de soluciones

El trióxido de arsénico es un compuesto orgánico que se encuentra en el grupo de los óxidos anfóteros, es decir que puede diluirse en soluciones ácidas y alcalinas, es relativamente soluble en agua e insoluble en solventes orgánicos (Walton & Reyes, 2005). Se efectuaron tres ensayos que buscaban la disolución de esta sustancia:

- Primer ensayo: No se logró una disolución efectiva ya que solo se usó agua destilada.
- Segundo ensayo: Para la formación de la solución se utilizó ácido clorhídrico en concentraciones de 1,5 M y 6 M, la mezcla se ubicó en el agitador magnético a una temperatura de 25°C, en este caso la solución produjo aglomerados del trióxido de arsénico lo que impidió una efectiva dilución.
- Tercer ensayo: Se experimentó con una sustancia alcalina, el elemento seleccionado fue hidróxido de sodio, la dosificación de este compuesto se realizó de forma manual agregando 0,001g de Hidróxido de sodio a la mezcla de arsénico y agua destilada, esta mezcla logró finalmente diluir el arsénico en agua.

Para la solución de 50 ppm trióxido de arsénico se requirió 40 ppm de hidróxido de sodio, este compuesto permitió también ajustar el pH de manera más eficaz, promoviendo la formación de hidróxidos, se manejó un rango de pH de 6,7 a 9, ya que estos valores son los de mayor eficiencia en la remoción de arsénico adicionalmente esta es una sustancia que mejora la conductividad de la solución (Walton & Reyes, 2005).

La mezcla de hidróxido de sodio con trióxido de arsénico produce la formación de Arsenito de Sodio (NaAsO_2), la forma más común de encontrar As; su importancia radica en el uso que se le da a esta sustancia en procesos industriales como curtiembres, alimentos, e insumos de madera, a continuación, se presenta la reacción química presente en la solución Ilustración 7:



Fuente: (Walton & Reyes, 2005)

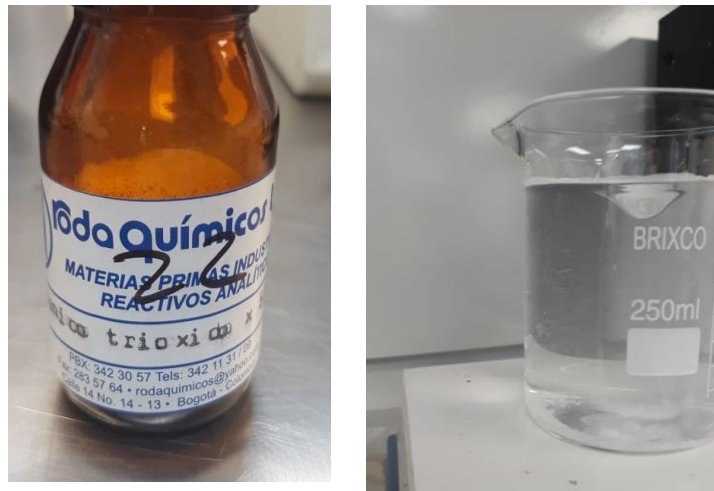


Ilustración 7. Formación Arsenito de Sodio (Manchego & Zabala, 2019).

8.1.2 Determinación de Voltaje, mediante ecuación Faraday

La fórmula que permitió hallar el valor de la variable de voltaje que elimina la concentración del arsénico, se realizó mediante la ecuación de la Ley Faraday:

$$\begin{aligned}
 & \frac{0,05 \text{ g/l}}{74,92 \text{ mol } \frac{\text{g}}{\text{l}} \text{ As}} \\
 & (6,673 * 10^{-4}) * (3e^- \text{ As}) \\
 & (2,002 * 10^{-3} \text{ mol } e^- \text{ As}) \left(\frac{96500 \text{ coulumb}}{1 \text{ mol } e^-} \right) \\
 & 193,2 \text{ Coulumb Total} \\
 & A (\text{corriente}) = \frac{193,2 \text{ CT}}{1800 \text{ Sg}} \\
 & A = 0,107 \text{ Amperios}
 \end{aligned}$$

El resultado de la ecuación arrojó que la corriente es de 0,107 Amperios, como paso a seguir se procedió a determinar la resistencia de los electrodos.

Resistencia de electrodos

- $\text{Área Electrodo Aluminio} = 14 \text{ cm} * 15 \text{ cm} = 210 \text{ cm}^2$
 $\text{Área Al} = 0,459 \text{ ft} * 0,49 \text{ ft} = 0,2260 \text{ ft}^2$
- $\text{Área Electrodo Hierro} = 14 \text{ cm} * 15 \text{ cm} = 210 \text{ cm}^2$
 $\text{Área Fe} = 0,459 \text{ ft} * 0,49 \text{ ft} = 0,2260 \text{ ft}^2$ (ver Tabla 8)

Tabla 8. Resultados de la resistencia de los electrodos según el material.

RESISTENCIA ALUMINIO	RESISTENCIA HIERRO
$R = \frac{17 \text{ } \Omega/\text{ft} * 0,2260 \text{ ft}^2}{0,49 \text{ ft}} = 7,84 \text{ } \Omega$	$R = \frac{58 \text{ } \Omega/\text{ft} * 0,2260 \text{ ft}^2}{0,49 \text{ ft}} = 26,75 \text{ } \Omega$
$\sum \text{Resistencia 4 Electrodos} = (7,87 \text{ } \Omega + 26,75 \text{ } \Omega + 7,87 \text{ } \Omega + 26,75 \text{ } \Omega) = 69,18 \text{ } \Omega$	

Nota: Resistencia electrodo de hierro y aluminio. Adaptado por Manchego & Zabala, 2019.

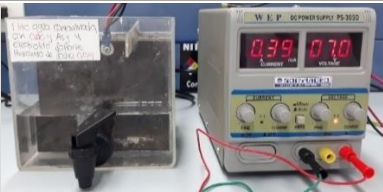
Obtenidos los resultados de corriente y resistencia de electrodos, se logró concluir que el voltaje necesario para eliminar el nivel de contaminación producido por el arsénico en agua correspondió a 7 voltios.

$$\text{Voltaje} = 0,107 \text{ Amperios} * (69,18 \text{ } \Omega)$$

$$\text{Voltaje} = 6,9 \text{ Voltios} \simeq 7 \text{ Voltios}$$

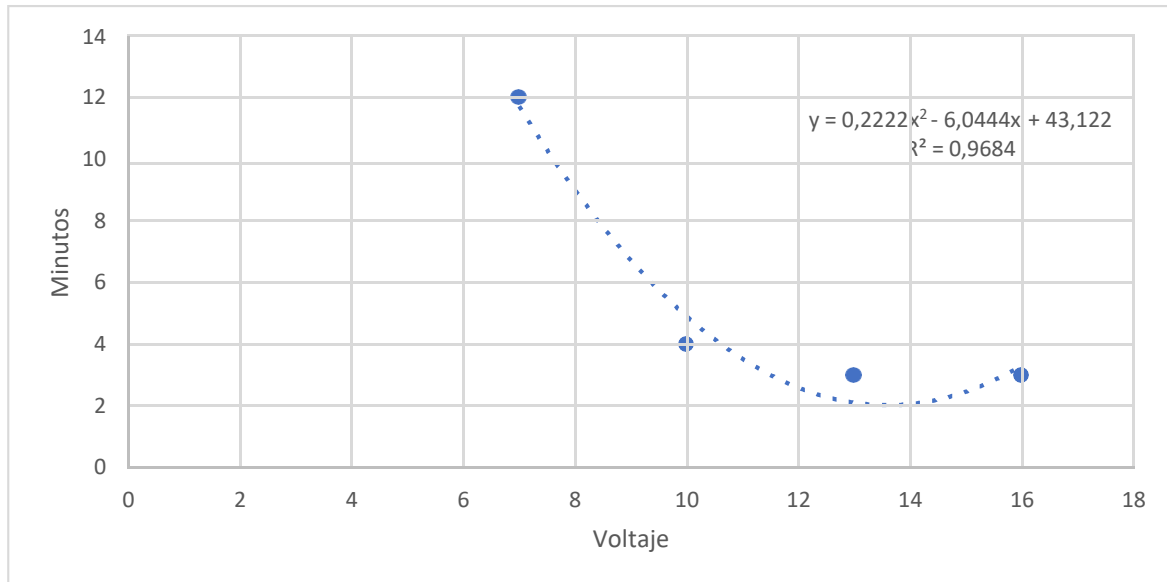
El voltaje que se determinó de acuerdo con la ecuación se utilizó como línea base para la ejecución del tratamiento de las muestras donde se modificó esta variable 4 veces, con el fin de garantizar que los flóculos tuvieran la capacidad de formar aglomerados capaces de ser retenidos en una fase posterior, en la Tabla 9 se puede observar el análisis visual, evaluando las características físicas de tamaño y volumen.

Tabla 9. Resultados de la Fase 1, diseño experimental.

Muestra	Voltaje	Tiempo de formación de flocs en minutos	Característica del flocs	Evidencia de la muestra
Muestra 1	7	12	Presentó una formación de aglomerados espumosa y delgada, poco compactada sobre la superficie del reactor y las placas, con una coloración blanca	
Muestra 2	10	4	Los aglomerados formados presentaron una consistencia compacta y de espuma gruesa y espesa sobre la superficie y en las placas, con coloración blanca	
Muestra 3	13	3	La formación de los flóculos fue rápida, hubo gran presencia de burbujas de hidrógeno que promovieron la estabilización de espuma sobre la superficie en condiciones compacta y gruesa, además de una tonalidad blanca	
Muestra 4	16	3	Nuevamente la muestra dio como resultado aglomerados consistentes de composición espumosa, compacta y gruesa con una fluidez de liberación de burbujas de hidrógeno ligera, de coloración blanca	

Nota: Resultado del proceso de electrocoagulación variando el voltaje. Adaptado por Manchego & Zabala, 2019.

En la evaluación física de los flocs, se aplicaron cuatro diferentes voltajes, la configuración escogida fue 10 voltios, arrojando como resultado, la formación de un tipo de flóculos más grandes y compactos, que al tener poca agua ligada facilita la remoción, también se presenta una alta atracción electrostática entre los flocs formados por hidróxidos y el contaminante, este contacto electroquímico aumenta la concentración de iones de hierro y flocs de hidróxido, permitiendo que los iones de arsénico puedan ser absorbidos debido al aumento de hidróxidos de hierro (Kumar et al., 2009).



Gráfica 1. Tiempo de formación de flóculos con respecto al voltaje. Adaptado por Manchego & Zabala, 2019.

En la Gráfica 1, se presenta la relación entre el tiempo y el voltaje de las cuatro muestras tomadas para evaluar la formación de flóculos. Para la primera muestra de 7 V el tiempo fue de 12 minutos; en la segunda se observa una disminución significativa del tiempo puntuando sobre 4 minutos. A partir de ahí, la regresión muestra como el tiempo presenta variaciones muy uniformes, es decir a partir de esta muestra se estimarían cambios no representativos en función de la variable tiempo. Adicional a ello, la segunda muestra refleja unos flóculos con características que permiten la aglomeración favoreciendo la remoción del contaminante mediante la filtración del agua tratada.

Hecha la evaluación visual de los flocs, se realizó el proceso de electrocoagulación con base en la ecuación de consumo de energía, lo que permitió conocer el voltaje con menor consumo de energía requerido para realizar el proceso de formación de flocs, este es un parámetro económico muy significativo debido a que de esto depende la viabilidad a gran escala del proyecto:

Ecuación consumo energía

$$Ce = \frac{i * U * t}{60 s}$$

i = Intensidad de corriente (Amperios)

U = Voltaje (Voltios)

t = Tiempo Electrocoagulación (s)

Consumo Energía 7 voltios

$$Ce = \frac{0,39 \text{ Amperios} * 7 \text{ voltios} * 720 \text{ s}}{60 \text{ s}}$$

$$Ce = 30,24 \text{ kW}$$

Consumo Energía 10 voltios

$$Ce = \frac{0,36 \text{ Amperios} * 10 \text{ voltios} * 240 \text{ s}}{60 \text{ s}}$$

$$Ce = 14,4 \text{ kW}$$

Menor consumo de Energía

Consumo Energía 13 voltios

$$Ce = \frac{0,52 \text{ Amperios} * 13 \text{ voltios} * 180 \text{ s}}{60 \text{ s}}$$

$$Ce = 20,28 \text{ kW}$$

Consumo Energía 16 voltios

$$Ce = \frac{0,50 \text{ Amperios} * 16 \text{ voltios} * 180 \text{ s}}{60 \text{ s}}$$

$$Ce = 24 \text{ kW}$$

Sobre el consumo de energía se puede observar que el voltaje aplicado, la intensidad de corriente y el tiempo, son directamente proporcionales al consumo de energía, es decir al incrementar cualquiera de estas variables, aumenta significativamente el consumo. La variable tiempo es la que mayor relevancia presenta por el alto consumo de energía, en cuanto a la interacción de intensidad de corriente y voltaje, se genera una disminución en el consumo de energía, es decir que las variables analizadas permitieron concluir que el resultado de la relación corriente-voltaje arroja los menores consumos de energía.

A partir de ahí, la variable de voltaje 10 V y la interacción con la intensidad de corriente 0,36 Amperios, y el menor tiempo de formación de flocs, es la que más bajos consumos de energía presenta en el proceso, esto permite justificar el análisis visual de los flocs que determinaron 10 V como el voltaje de mayor efectividad.

8.2 Prototipo a escala laboratorio

Para dar respuesta al segundo objetivo planteado, se procede a desarrollar la Fase 2, presentada en la metodología en la que se realizara el montaje del prototipo.

8.2.1 Ejecución del prototipo

Siguiendo con los objetivos planteados se realizaron pruebas de la variable tiempo, teniendo en cuenta el resultado del voltaje en la primera fase. En esta fase se determinó un valor de 10 voltios como el de mayor efectividad. Inicialmente se realizó la caracterización del efluente a tratar, con el fin de comparar los valores después de realizar el proceso de electrocoagulación con las variaciones respectivas en función a la variable tiempo.

En la Tabla 10 se describen la concentración inicial y final en las cuatro muestras, permitiendo elaborar de manera gráfica la información.

Tabla 10. Concentración inicial y final de As.

	M. (10 min)	M. (20 min)	M. (30 min)	M. (40 min)
Concentración Inicial	50	50	50	50
Concentración Final	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Porcentaje de Remoción	>99%	>99%	>99%	>99%

Nota: Análisis de las concentraciones en cada muestra variando el tiempo. Adaptada por Manchego & Zabala, 2019.

La concentración inicial de la solución acuosa para cada una de las muestras usando 50 ppm de As por litro de agua. Los valores de concentración finales son menores al límite de detección de la técnica utilizada por el laboratorio (American Public Health Association, 1992). La medición mínima es de 0,01 ppm.

El porcentaje de eficiencia de arsénico en las cuatro muestras se encuentra por encima del 99%, demostrando que a partir de los 10 minutos la celda de electrocoagulación fue capaz de remover el contaminante, de igual manera las siguientes muestras presentaron comportamientos similares en su eficiencia.

La dinámica en la cinética de remoción de arsénico se asemeja a los resultados planteados por Castruita, et al. (2011) donde se presentan porcentajes de remoción de 98% a partir de los 10 minutos, reflejando un comportamiento similar en las muestras realizadas posteriormente (Castruita, García, Camporredondo, Sifuentes, & Garza, 2011).

Estudios indican porcentajes menores de remoción, estos se encuentran en porcentajes entre el 97% y 98% en tiempos mayores a 20 o 25 minutos, esto debido a la variación en los parámetros de materiales de los electrodos y la distancia entre ellos, el material más usado es el acero inoxidable debido a sus propiedades de resistencia y durabilidad, aunque su eficacia disminuye ya que estos no presentan las condiciones que requieren los electrodos para la adsorción de especies de arsénico (Morales & Rojas, 2018)

Para la variable de conductividad se evidencia disminución en cada muestra cómo se puede observar en la Tabla 11.

Tabla 11. Conductividad inicial – final

	M. (10 min)	M. (20 min)	M. (30 min)	M. (40 min)
Conductividad Inicial	222	229	231	256
Conductividad Final	148,3	192,4	187	238

Nota: análisis de conductividad inicial y final. Adaptada por Manchego & Zabala, 2019.

El proceso de electrocoagulación es dependiente de diferentes variables, especialmente de la conductividad, este parámetro es uno de los factores determinantes en las reacciones que ocurren en el sistema y que fijan la formación del coagulante.

Se observa que la conductividad presenta una disminución considerable en la muestra de 10 minutos con variaciones decrecientes de 33,20%, a partir de la segunda muestra el comportamiento

es inverso teniendo en cuenta que a mayores valores de conductividad se observan menor reducción en la variable.

Esto invalida la posición de Ruiz, que plantea aumentos considerables en la remoción del contaminante al aumentar la conductividad, ya que para este estudio el valor más bajo de conductividad presentó los mejores porcentajes de remoción en los parámetros de SDT y concentración de arsénico con porcentajes de 32,73% y 99% respectivamente (Garcés & Ruiz, 2007).

Según Moya (2012) el exceso de electrolitos soportes alcalinos como es el caso del hidróxido de sodio influyen en el incremento de la conductiva en la solución. Desde el punto de vista de Yin Lee la conductividad no influye sobre el tratamiento de la electrocoagulación, pero si sobre el consumo de energía, de manera que a mayor conductividad mayor consumo de energía.

Con el fin de dar sustento teórico a los resultados obtenidos y teniendo en cuenta la revisión bibliográfica se puede mencionar que la presencia de diversos factores incide en la fluctuación de los iones metálicos, debido a que el tiempo de retención influye proporcionalmente en su aumento. Lo anterior, bajo el concepto de la Ley de Faraday en la que se establece que el tiempo de contacto electroquímico fomenta la cantidad de coagulantes generados y la oxidación del ánodo, formando iones metálicos que a mayores tiempos aumentan considerablemente en el proceso, lo que disminuye los porcentajes de remoción de los parámetros de concentración de arsénico y SDT generando un incremento en la conductividad (Mercado et al., 2006).

La variable de temperatura presenta valores ascendentes de acuerdo con el tiempo de retención del proceso como se observa en la Tabla 12.

Tabla 12. Análisis de la temperatura inicial – final según el tiempo.

	M. (10 min)	M. (20 min)	M. (30 min)	M. (40 min)
Temperatura Inicial (°C)	22,9	24,4	24,3	24,1
Temperatura final (°C)	24	27	28,5	30,4

Adaptada por Manchego & Zabala, 2019.

La temperatura presenta una variación poco marcada entre las diferentes muestras realizadas, pero mantiene una tendencia al incremento en las temperaturas finales, inicia con una diferencia de 1,1 °C y finaliza con una diferencia de 6,3 °C. Estas variaciones en la temperatura están influenciadas por la destrucción de la película de óxido de aluminio en la superficie del electrodo.

Se encontró que en temperaturas cercanas a 60°C se obtienen mejores resultados de remoción; no obstante, las muestras analizadas en el laboratorio presentan valores mayores al 99% con temperaturas que fluctúan entre los 25°C.

Los resultados presentados en la variable de temperatura son soportados por otros autores, argumentando que a mayores temperaturas en las reacciones del proceso se fomenta la dispersión de partículas suspendidas que afectan su eficiencia (Gilpas et al., 2008).

El porcentaje de remoción de los sólidos disueltos totales (SDT) varía según el tiempo de retención Tabla 13.

Tabla 13. Sólidos disueltos totales inicial– final.

	M. (10 min)	M. (20 min)	M. (30 min)	M. (40 min)
SDT Inicial	220	227	233	257
SDT Final	148	194	188	235
Porcentaje de remoción	32,72%	14,53%	19,31%	8,56%

Nota: Análisis de los sólidos disueltos totales en cada muestra variando el tiempo. Adaptada por Manchego & Zabala, 2019.

Los SDT corresponden a sustancias de origen orgánico e inorgánico que son solubles en agua y que no pueden eliminarse a través de métodos de filtración, la variación de este parámetro se encuentra directamente relacionada con los valores de conductividad, debido a la dinámica que presentan los iones disueltos (Palacios, 2015).

Los sólidos disueltos evidencian una relación inversa en cuanto a los porcentajes de remoción y los tiempos de retención. En las cuatro muestras se observa este comportamiento, iniciando con diferencia de sólidos disueltos de 72 mg/l sobre 22 mg/l en la última muestra. Esta tendencia en la

reducción de este parámetro está relacionada con la capacidad del reactor de consumir la cantidad del contaminante mediante la formación del coagulante *in-situ*, por tanto, si se supera el consumo en un determinado tiempo, el sistema sobrecargara la solución con iones excedentes liberados por los electrodos, generando un aumento en la concentración final cuando se aplican mayores tiempos.

Los porcentajes de remoción de SDT, con respecto a la conductividad permiten afirmar que una disminución de estos genera una variación proporcional en el valor de la conductividad (ver Gráfica 2). Para el caso de la muestra 1, se observa que a mayor porcentaje de remoción de SDT, se genera una reducción considerable en la conductividad.

El mayor porcentaje de remoción de SDT (32.72 %) se obtiene a tiempos de retención de 10 minutos. Este porcentaje disminuye al incrementar el tiempo de retención hasta los 40 minutos. Procesos experimentales de electrocoagulación realizados con anterioridad para tratamiento de aguas residuales indican que el máximo porcentaje de remoción de SDT es de (95.4 %) al menor tiempo de 25 minutos. Dicho estudio concluye que con menores tiempos de retención se presentan mayores niveles de conductividad los que aumenta la intensidad de corriente, fomentando la cantidad de iones aluminio producidos por las reacciones de óxido-reducción aumenta, formando hidróxidos de aluminio que desestabilizan el contaminante (Morales & Rojas, 2018)

La variable PH disminuye de acuerdo con el tiempo de retención, este parámetro se encuentra dentro del rango que permite una mayor eficiencia para el proceso de electrocoagulación ver Tabla 14.

Tabla 14. pH inicial – final según el tiempo.

	M. (10 min)	M. (20 min)	M. (30 min)	M. (40 min)
pH Inicial	8	9	8	9
pH Final	7	7	7	8

Nota: Análisis de pH en cada muestra variando el tiempo. Adaptada por Manchego & Zabala, 2019.

La variable de pH expone una disminución con diferencias de 2 unidades de pH antes y después del tratamiento realizado en la muestra 2, donde se estimó un tiempo de 20 minutos.

El agua presentaba una característica inicial alcalina debido a la adición de hidróxido de sodio como electrolito soporte, lo que facilitó que, en el proceso de electrocoagulación, el pH decreciera gradualmente durante la electrolisis. Debido a esto ocurrió la formación de especies iónicas que establecieron el coagulante, donde se produjo la formación de hidróxido ferroso, ya que este requiere pH de unidades alcalinas (Castro, 2006).

Los valores de pH adecuados para una eliminación eficaz de arsénico oscilan en un rango de 6 a 8 unidades de pH (Arango, 2012), ratificando los resultados del estudio, que para el caso permitieron eficiencias mayores al 99%.

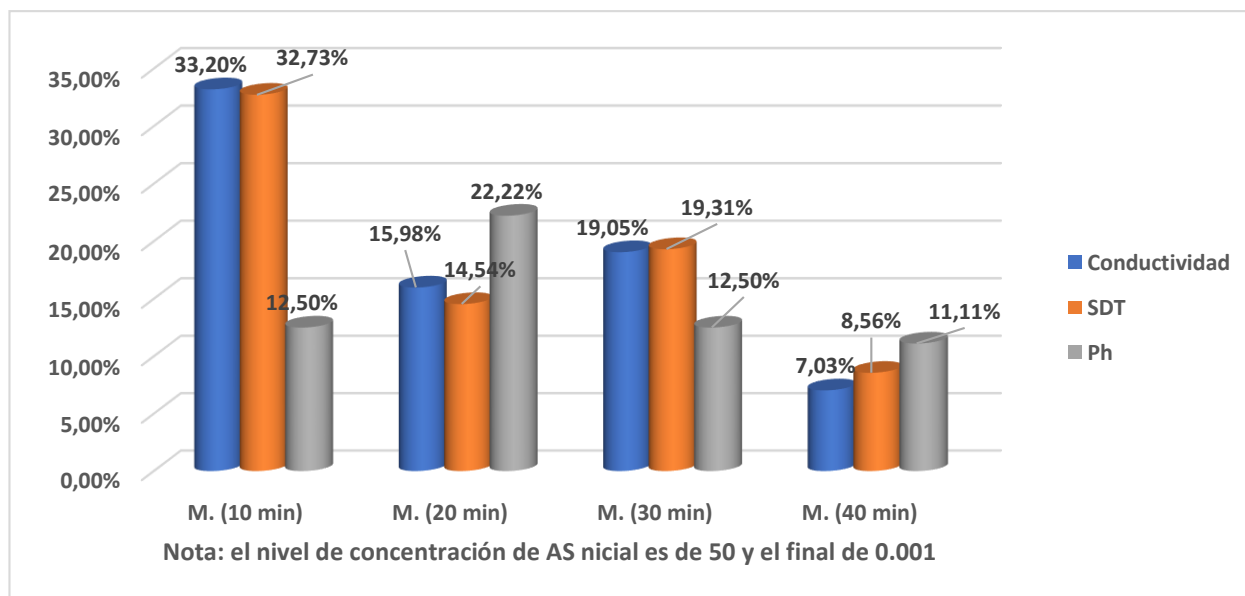
Estos valores se encuentran dentro del valor dado por Piña et al., (2011), donde se establece que el pH ideal para soluciones alcalinas debe estar en 7 unidades para que se promueva una mayor eficiencia. Así mismo Hernández y Mejía (2019) validaron que para aguas alcalinas el pH de la solución en el tratamiento tiende a disminuir, lo cual es dependiente del contaminante tratado.

En contraposición Balasubramanian et al, (2009), expresó que el valor de pH para obtener una eficiencia similar fue 4,5 unidades, aumentando progresivamente durante el proceso, los materiales usados para los electrodos estaban compuestos por aluminio y acero inoxidable.

Las características del agua crean una diferencia de unidades de pH en los estudios analizados, igualmente el material de los electrodos. En la ejecución de este proyecto se usaron electrodos de aluminio que promueven la formación de hidróxidos e influyen en la variación del pH, y electrodos de hierro que por sus propiedades de adsorción de especies de arsénico presenta menores tiempos de remoción.

Motivo por el cual se observa una ventaja considerable en este estudio, ya que comparando el tiempo necesario para garantizar eficiencia del 99%, se presentó una diferencia de 410 minutos.

Es importante tener en cuenta que los rangos de pH obtenidos en el proyecto además de cumplir con las necesidades del proceso, se encuentran dentro de los límites máximos permisibles en la normatividad de agua potable y residual (Restrepo et al., 2006).



Gráfica 2. Porcentaje de variación de los parámetros evaluados. Adaptada por Manchego & Zabala, 2019.

Para determinar las variables que presentaron mayor significancia en la eficiencia del proceso de electrocoagulación, se presentaron las variaciones de estos para cada muestra (ver Gráfica 2). Analizando los resultados de las cuatro muestras, se evidenció que la gráfica porcentual tenía un comportamiento decreciente en las variables, adicionalmente se observó una relación inversamente proporcional de la variable tiempo con los porcentajes de remoción, indicando que el mayor porcentaje de remoción se encontró en el menor tiempo, siendo la Muestra 1 la que garantizó el punto más alto de remoción de (As).

Esto se debe a que según la Ley de Faraday una concentración inicial de un contaminante requiere de un voltaje aplicado en determinado tiempo, es decir que a mayor tiempo mayor producción de iones metálicos liberados por lo electrodos, siendo estos una sobrecarga para el proceso lo que implica que las condiciones de la solución se modifiquen y los porcentajes de los parámetros en estudio se alteren.

Teniendo en cuenta lo anterior se seleccionó la Muestra 1 como variable de estudio en la Fase 3 debido a que presentó los requerimientos ideales para el tratamiento del agua contaminada, adicionalmente la variable sólidos disueltos totales (SDT) tuvo el mayor porcentaje de remoción con un 32,73%; el pH disminuyó de 8 a 7 unidades. Por último, los valores de conductividad

variaron de forma decreciente con porcentajes de 33,20%, estas reducciones permitieron que la muestra tratada se encontrara en el rango de los límites máximos permisibles según la normatividad vigente.

8.3 Evaluación de la eficiencia del electro-coagulador para la remoción de arsénico con diferentes concentraciones.

Con base en la Tabla 15 los resultados de la Muestra 1 se analizaron a partir de la normatividad establecida en Colombia para agua potable y residual. Se destaca que, para los rangos de concentración en la remoción de As, los datos se encuentran dentro del margen de límites permisibles según el Resolución 631 de 2015 y el Decreto 1575 de 2015. Una característica relevante se observa en la variable de sólidos disueltos totales (SDT) en la muestra que arrojó 148 mg/L y el límite permisible para agua potable describe <100 mg/L, siendo esta variable la única que sobrepasa el parámetro establecido en la normatividad.

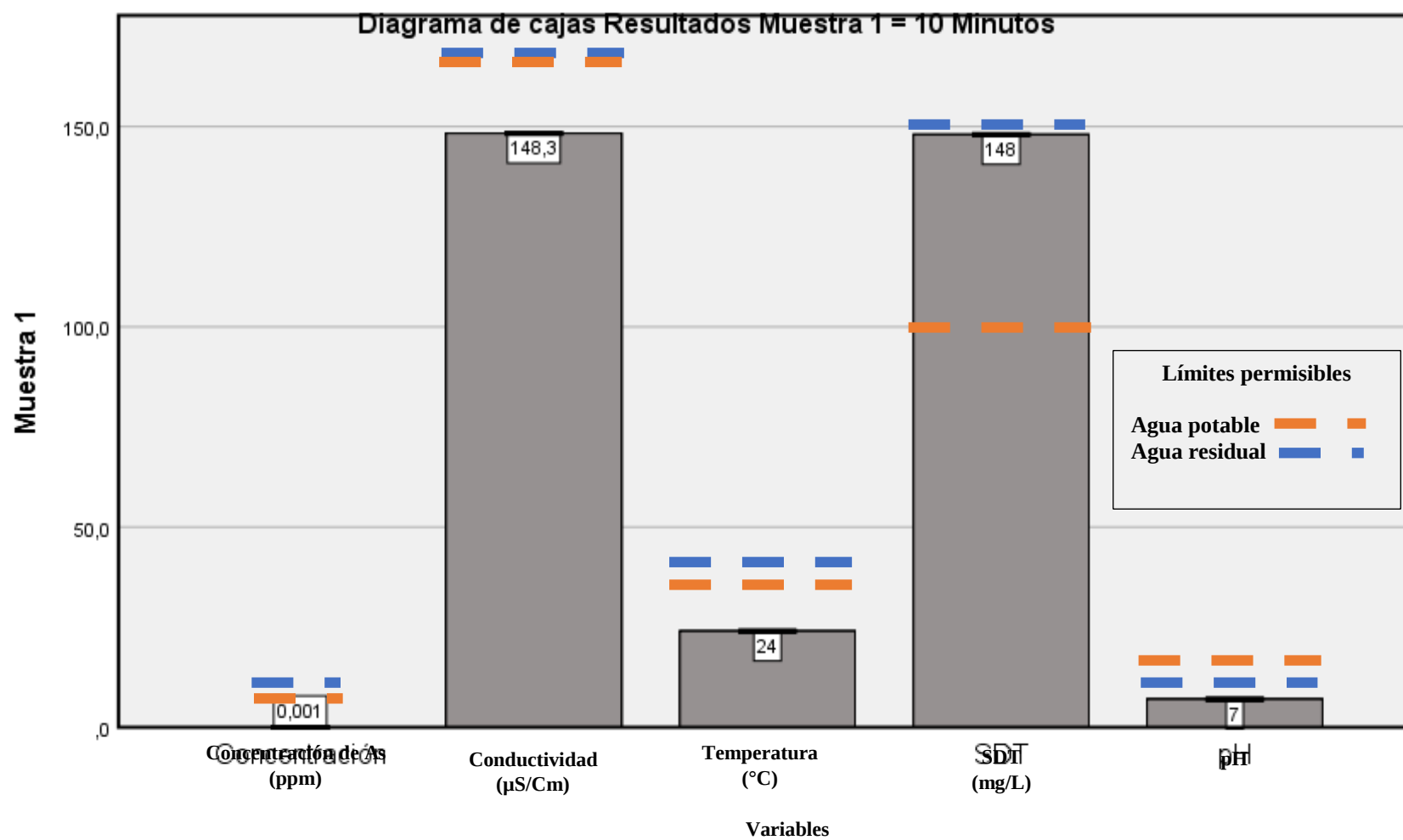
Partiendo de lo anterior, el proceso de remoción del contaminante garantizó que el tratamiento del agua alcanzara los límites permisibles según la normatividad.

Tabla 15. Comparación de la muestra frente a la normatividad de aguas.

Parámetro	M.1 10 minutos	Agua residual	Agua potable
Concentración de As	<0,001 ppm	0,1 ppm	0,01 ppm
Conductividad	148,3 μ S/Cm	1000 μ S/Cm	1000 μ S/Cm
Temperatura	24 °C	40 °C	<35 °C
SDT	148 mg/L	150 mg/L	<100 mg/L
pH	7	6	6,5 - 9

Fuente: Decreto 1575 de 2007 y Resolución 631 de 2015. Adaptada según el estudio. 2019.

Se consideró significativo presentar los valores en la Gráfica 4, evidenciando mediante un diagrama de caja, los datos finales de la Muestra 1, frente al límite permisible en la normatividad para agua potable y residual. El gráfico representa la condición final que tiene el agua cumpliendo con los requisitos propuestos en la norma.

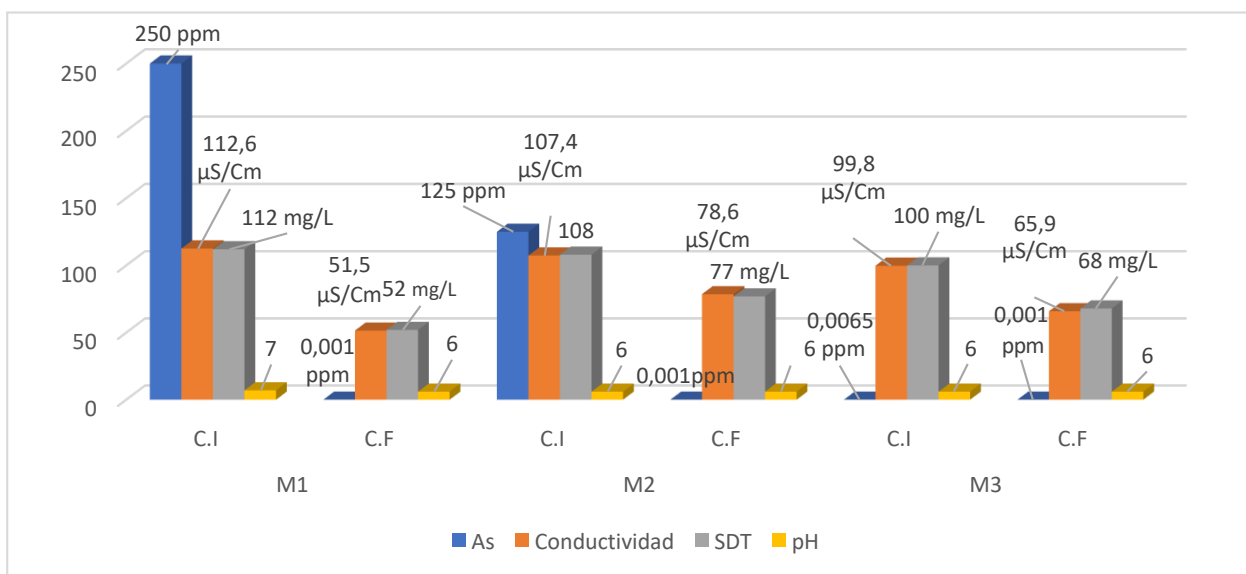


Gráfica 4. Comparación de la muestra frente a la normatividad de aguas. Programa IBM SPSS – 25. Adaptada por Manchego & Zabala, 2019.

Como un complemento de análisis se enviaron tres muestras al laboratorio Hidrolab en el cual se solicitó realizar un análisis adicional de disoluciones en serie con el fin de conocer los rangos de concentración que el reactor era capaz de remover. Mediante la gráfica 10 se puede observar los valores iniciales de los parámetros evaluados, además de los datos posteriores al tratamiento de electrocoagulación.

La finalidad de realizar estas disoluciones en serie fue emplear concentraciones inferiores a las utilizadas en otros estudios para conocer la capacidad del reactor de realizar la remoción de Arsénico. En la Gráfica 5 se destaca que los mejores porcentajes de remoción se presentan en la Muestra 1 con una eficiencia de 53,5% para sólidos disueltos totales (SDT), en cuanto a la concentración de As se destaca que todas las muestras arrojaron eficiencias cercanas al 99%. Cabe destacar que la con menor efectividad para conductividad y sólidos disueltos totales (Muestra 2) los cuales arrojaron una variación de 27% y un porcentaje de remoción 28% respectivamente, siendo estos significativos frente a la disminución del contaminante.

El rango de mayor efectividad para remover concentraciones de Arsénico se ubica entre 250 mg/L y 500 mg/L, sin menospreciar las concentraciones inferiores que se evaluaron 125 mg/L y 0,0065 mg/L, teniendo en cuenta que allí también se presentaron niveles de remoción del contaminante.



Gráfica 5. Disoluciones en serie. Manchego & Zabala, 2019.

Conclusiones

Para el diseño experimental del prototipo para el tratamiento de agua contaminada con arsénico se evaluaron 4 voltajes distintos mediante la formación de flóculos, encontrando que el voltaje de 10 Voltios de referencia para el proceso de electrocoagulación fue el de menor consumo de energía y mejor compactación de los flóculos; lo cual favoreció la secuencia de la Fase 2. Se destaca que durante los ensayos se implementó la celda de electrocoagulación que contenía 4 electrodos (2 ánodos de aluminio y 2 cátodos de hierro). Así mismo, la sustancia utilizada para la preparación de la muestra patrón (Trióxido de arsénico) presenta características de un óxido anfótero, implicando el uso de una sustancia alcalina (hidróxido de sodio) para disolver el contaminante.

En la construcción del prototipo a escala de laboratorio se aumentaron los electrodos debido a que en la fase experimental se presentaron espacios sin conducción eléctrica que posiblemente afectaban el proceso de remoción. Se evaluó el voltaje obtenido en la Fase 1, tomando cuatro tiempos basados en la revisión bibliográfica realizada. Los ensayos que se realizaron arrojaron porcentajes de remoción para el contaminante aproximadamente en un 99%, esta situación requería un soporte adicional para validar el tiempo con mejor efectividad, tomando parámetros como Conductividad, Temperatura, pH y Sólidos Disueltos Totales; de esta manera los registros obtenidos permitieron determinar el tiempo más eficiente (10 minutos) para la remoción de As.

Al evaluar la eficiencia del electrocoagulador para la remoción de Arsénico la cual en primera instancia se recurre a la ecuación de eficiencia de remoción (Scava 2004), de igual manera, se acudió a la revisión bibliográfica de la normatividad colombiana para límites permisibles en agua potable y residual, hallando que la muestra seleccionada puede cumplir con las condiciones establecidas para usos residuales, se destaca que los SDT sobrepasan el límite permisible en agua potable, de esta manera, se deberá realizar un tratamiento posterior para ajustar el parámetro a la normatividad. Teniendo en cuenta las disoluciones en serie se evaluaron los rangos de concentración inferiores a la muestra patrón encontrando mejores porcentajes en las concentraciones de 250mg/L a 500mg/L.

Los resultados presentados demuestran que la H_1 fue comprobada gracias a la configuración electrónica de la celda de electrocoagulación que permitió la remoción de arsénico en agua con porcentajes mayores al 99%.

Por tanto, se concluye que el proceso de electrocoagulación implementado se convierte en una herramienta de apoyo para futuras investigaciones cuya finalidad sea generar un aporte socioambiental y económico a la comunidad, gracias a la ventaja que ofrece el tratamiento en mejorar la calidad del agua en diferentes usos; además del bajo costo en la ejecución del proceso.

Recomendaciones

Es importante dar continuidad al proceso de investigación, tomando como base el estudio de otros parámetros directos que conforman la electrocoagulación, destacando la participación en la manipulación de variables según las necesidades del estudio.

Evaluar distintas configuraciones en cuanto a electrodos, distancia y tamaño del reactor, ya que estas variables alteran considerablemente el rendimiento del prototipo.

Analizar la efectividad del proceso de electrocoagulación evaluando diferentes tipos de agua residual presente en las industrias de la región.

Evaluar la eficiencia en reactores de flujo tipo continuo y comparar los porcentajes de remoción teniendo en cuenta el tipo batch usado en la presente investigación.

Teniendo en cuenta que la variable sólidos disueltos totales sobrepasa los límites máximos permisibles según la normatividad colombiana, se recomienda implementar un tratamiento previo como procesos de sedimentación y filtración que disminuya la concentración de SDT en el tratamiento de agua residuales con arsénico permitiendo que estas puedan ser utilizadas para el consumo humano.

Referencias

- Alarcón, M., Leal, L., Martín, I., Miranda, S., & Benavides, A. (2014). Arsénico en Agua: presencia, cuantificación analítica y mitigación. In Centro de Investigación en Materiales Avanzados (Ed.), *Centro de Investigación en Materiales Avanzados* (Primera, Vol. 2). Retrieved from [https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1056/1/Libro 2013-Arsenico en el Agua con ISBN.pdf](https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1056/1/Libro%202013-Arsenico%20en%20el%20Agua%20con%20ISBN.pdf)
- Alonso, D. (2014). *Determinación de Arsénico total y biodisponible en la zona sur-occidental del distrito minero de oro California-Vetas en el Departamento de Santander*, Colombia (Universidad Nacional de Colombia). Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/46037/1/80727607.2014.pdf>
- American Public Health Association. (1992). Metals by hidrige generation. In American Public Health Association (Ed.), *Standard Methods* (9th ed., Vol. 4, pp. 330–348). Retrieved from <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/apha.method.3114.1992.pdf>
- Arango. (2014). Tratamiento de aguas residuales mediante electroagulación: desarrollo y potencial de aplicación. *Ingenieria e Investigación*, 3, 79–98. Retrieved from <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/jet/article/download/1132/978>
- Arango, Á. (2012). Effects of the pH and the conductivity on the electrocoagulation of waste water from dairy industries. *Producción + Limpia*, 7(1), 59–67 retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552012000100006.
- Arboleda, J., & Herrera, P. (2015). *Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo Batch para la remoción de cromo hexavalente (cr6+) con electrodos de aluminio – aluminio y de hierro – aluminio en condiciones de laboratorio* (Vol. 1). Santo Tomas retrieved from <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/613>
- Balasubramanian, N., Kojima, T., Basha, A., & Srinivasakannan, C. (2009). Arsenic removal from industrial effluent through electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 24(5), 519–521. [https://doi.org/10.1002/1521-4125\(200105\)24:5<519::AID-CEAT519>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/1521-4125(200105)24:5<519::AID-CEAT519>3.0.CO;2-P)
- Beltrán, K. (2015). *Diseño y construcción de un electrocoagulador controlado por labview* (Santo Tomas). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/302357083_diseno_y_construccion_de_un_electrocoagulador_controlado_por_labview
- Castro, E. (2006). Natural arsenic in Groundwaters of Latin America. In Centro Panamericano de

- Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Ed.), *Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos* (p. 20). Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd51/remocion-agua.pdf>
- Castruita, L., García, M., Camporredondo, J., Sifuentes, C., & Garza, M. (2011). Estudio cinético de la remoción de arsénico en un reactor electroquímico tipo filtro prensa. *Prospectiva*, 9(1), 7–12. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4207124.pdf>
- Consultoria y Asesoría Conocer Ltda. (2019). *Resultados laboratorio (Pruebas)*.
- Dixint, S., & Hering, J. (2003). Comparación de la absorción de arsénico (V) y arsénico (III) en minerales de óxido de hierro: implicaciones para la movilidad del arsénico. *Ciencia y Tecnología Ambiental*, 37, 18. Retrieved from <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es030309t>
- Feria, J., Escobar, A., & Marínez, J. (2014). Tratamiento de aguas residuales de origen químico mediante electrocoagulación. *Avances de Investigación En Ingeniería*, 11(1), 65–69 retrieved from <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/332>.
- Galetovic, A., & Fernicola, N. (2003). Arsénico en el agua de bebida: un problema de salud pública. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, 39(4), 365–372. <https://doi.org/10.1590/s1516-93322003000400003>
- Garcés, L., & Arango, R. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, 43(147), 56–67. Retrieved from <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/download/764/672/>
- Garcés, L., & Ruiz, A. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, 43(147), 56–67. Retrieved from <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/764/672>
- Gilpas, E., Arbeláez, E., Sierra, L., White, C., Oviedo, C., & Restrepo, P. (2008). *Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales* (Universidad EAFIT). Retrieved from https://repository.uniminuto.edu/bitstream/handle/10656/5304/TIND_RuizBelloPablo_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Guzmán, N. G., Granada, E. V., & Calderon, R. A. A. (2014). Eficiencia de remoción en sistemas de tratamiento de aguas residuales del beneficio de café (*Coffea Arabica*). *Colombia Forestal*,

- 17(2), 151–159. retrieve from <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/5407>.
- Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., & Naja, J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>
- Hansen, H., Nuñez, P., Raboy, D., Schippacasse, I., & Grandon, R. (2007). Electrocoagulación en aguas residuales que contienen arsénico: comparando diferentes diseños de procesos. *Electrochimica Acta*, 3464–3470. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468606010206>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6th ed.; MacGraw Hill, Ed.). México.
- Kumar, Poneselvan, F., Malviya, J., Srivastava, V., Mall, L., & Kumar, M. (2009). Tratamiento de efluentes de biodigestores por electrocoagulación con electrodos de hierro. *Elsevier Journal of Hazardous Materials*, 15, 345–352. retrieved from <https://go.gale.com/ps/anonymous?id=GALE%7CA401506852&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&iissn=01200739&p=IFME&sw=w>.
- Kumar, R., Shaudhari, C., Khilar, K., & Mahajan, S. (2004). Eliminación del arsénico del agua por electrocoagulación. *Science Direct*, 55(9), 1245–1252. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653504000591>
- Lee, S. Y., & Gagnon, G. A. (2014). Review of the factors relevant to the design and operation of an electrocoagulation system for wastewater treatment. *Environmental Reviews*, Vol. 22, pp. 421–429. <https://doi.org/10.1139/er-2014-0009>
- Lizarazo, J., & Orjuela, M. (2013). *Sistema de tratamientos de aguas residuales en Colombia* (Universidad Nacional de Colombia). Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/11112/1/marthaisabelorjuela2013.pdf>
- Mandal, Badal, K., & Suzuki, Kazuo, T. (2002). Arsenic round the world: a review. *Talanta*, 58(1), 201–235. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00268-0](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00268-0)
- Meng, X. (2000). Efectos del silicato, sulfato y carbonato en el arsénico: Eliminación por cloruro férrico. *Pergamon-Elsevier Science*, 34(4), 1255–1261. retrieved <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd51/remocion-agua.pdf>.
- Mercado, I., Reyes, A., & Morante, G. (2006). La electroquímica en función de la ingeniería

- ambiental . Método de electrocoagulación aplicado a un flujo continuo de residuos líquidos. *Electroquímica*, 12, 4. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/280577547_La_Electroquimica_en_Funcion_de_la_Ingenieria_Ambiental_Metodo_de_Electrocoagulacion_Aplicado_a_un_Flujo_Continuo_de_Residuos_Liquidos
- Mollah, A., Morkovsky, P., Gomes, J., Kesmez, M., Parga, J., & Cocke, D. (2004). Fundamentos, perspectivas actuales y futuras de la electrocoagulación. *Science Direct*, 114, 199–210. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389404004170>
- Mollah, M., & Yousuf, A. (2001). Electrocoagulación (CE) - Ciencia y aplicaciones. *Journal of Hazardous Materials*, 84–1, 29–41.
- Monsalve, J., & Cardona, S. (2014). *Electrocoagulación para reuso de aguas residuales del proceso de impresión en la industria papelera* (Universidad Pontificia Bolivariana; Vol. 3). <https://doi.org/http://dx.doi.org/110.21043/equilibrium.v3i2.1268>
- Morales, P., & Rojas, R. (2018). Evaluación de la presencia y distribución de arsénico y cadmio en el río Ocoa, municipio de Villavicencio, Meta, (Santo Tomas). Retrieved from <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/13700/2018paulamorales.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Nidheesh, P. V., & Singh, T. S. A. (2017). Arsenic removal by electrocoagulation process: Recent trends and removal mechanism. *Chemosphere*, 181, 418–432. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.082> retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653517306173>
- Ojeda, A., Hing, R., & Gonzalez, Y. (2012). Estudio de la factibilidad del proceso de electrocoagulación para la obtención de sólidos a partir de la vinaza Feasibility study of the electrocoagulation process to obtain solids from vinasse. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 43 retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181628775006.pdf>.
- Organización Mundial de la Salud. (2018). Arsénico. Retrieved from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Palacios, A. (2015). *Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas del colector agua de las Virgenes por electrocoagulación, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energetica un papel fotovoltaico* (Universidad Nacional del Centro del Perú). Retrieved from <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/4171/Riccio>

Yauri.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Pérez, V. (2013). Recuperación / Eliminación de metales pesados en aguas residuales mediante tecnología electroquímica. *Universidad de Alicante*, 7. Retrieved from <https://sgittotri.ua.es/es/empresa/documentos/ot-0737-recuperacion-eliminacion-metales-pesados.pdf>
- Prieto, F., Callejas, J., Reyes, V., & Marmolejo, Y. (2012). Electrocoagulación: Una Alternativa para depuración de lactosuero residual. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 5(3), 51–77 retrieved from <http://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/34727>.
- Restrepo, A., Arango, Á., & Gardes, L. (2006). *Electrocoagulation: Challenges and opportunities in water treatment* Artículo de Revisión. 20. Retrieved from http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/514/1/pl_v1n2_58-77_electrocoagulacion.pdf
- Reyes, & Mercado, I. (2003). *Estudio de tratabilidad por electrocoagulación de los lixiviados del Relleno Sanitario La Esmeralda* (Universidad Nacional de Colombia; Vol. 14). Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/1069/1/deisyreyesavila.2003.pdf>
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). Contaminación Por Metales Pesados: Implicaciones En Salud, Ambiente Y Seguridad Alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66–77. <https://doi.org/10.19053/1900771x.v16.n2.2016.5447>
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16, 66–77 retrieved from https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/5447.
- Ruiz, P. (2017). *Prototipo de una celda de electrocoagulación abastecida con energía fotovoltaica para tratamiento de aguas residuales en la industria minera* (Universidad Minuto de Dios). Retrieved from https://repository.uniminuto.edu/bitstream/handle/10656/5304/TIND_RuizBelloPablo_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sarria, V., Parra, S., Rincón, A., Torres, R., & Pulgarín, C. (2005). Nuevos Sistemas Electroquímicos Y Fotoquímicos Para El Tratamiento De Aguas Residuales Y De Bebida New Electrochemical and Photochemical Systems for Water and Wastewater Treatment. *Revista Colombiana de Química*, 34(2), 161–173. Retrieved from

<http://www.scielo.org.co/pdf/rcq/v34n2/v34n2a06.pdf>

- Singh, R., Singh, S., Parihar, P., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2015). Arsenic contamination, consequences and remediation techniques: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112, 247–270. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.10.009>
- Song, P., Yang, Z., Zeng, G., Yang, X., Xu, H., Wang, L., ... Ahmad, K. (2017). Electrocoagulation treatment of arsenic in wastewaters: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 317, 707–725. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.086>
- Tsouris, D., DePaoli, J., Shor, M., Hu, M., & Ying, T. (2001). *Electrocoagulación para Siembra magnética de partículas coloidales*. 177, 223–233 retrieved from <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/cuadernos-investigacion/article/download/1279/1158>.
- Walton, F., & Reyes, J. (2005). *Análisis químico e instrumental* (Primera; Reverte, Ed.). Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=htRP2dHJkXgC&pg=PA54&dq=arsenito+de+sodio&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiz5bC5orXjAhXOzlkKHTOPAcQQ6AEILjAB#v=onepage&q=arsenito de sodio&f=false>

Anexos

Anexo A. Resultados concentración de Arsénico.

RESULTADOS DE LABORATORIO
CONSULTORIA Y SERVICIOS CONOSER LTDA

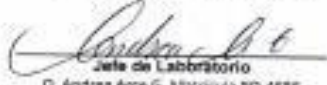


Maestra No.	58579	Fecha de Recepción:	Junio 13 de 2019
Procedencia:	Paola Zabala	Fecha de Toma:	Junio 10 de 2019
Dirección:	Multifamiliar 6 Casa 3 Caminos de Sevilla	Tipo de Muestra:	Agua / Puntual
Sitio de Toma:	Muestra No. 1 10 Minutos	Tomada Por:	Puesta en Laboratorio

PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO	FECHA DE ANALISIS
Arsénico*	mg/L-As	SM 3114 B Absorción Atómica	< 0.001	Ver Anexo

OBSERVACIONES

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE CON FIRMA DEL JEFE DE LABORATORIO Y SELLO NECO. PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL.
(SM - Standard Methods for examination of water and waste water- 19th ed. 2005)
*Basado en convenio con laboratorio acreditado ante el IDEAM en este parámetro.


Jefe de Laboratorio
G. Andrea Arce G. Matrícula PO-4686
Consejo Profesional de Química

FECHA DE EMISION
Julio 4 de 2019

Página 1 de 1
SOG-AP-LUL-13

Recibido a Conformidad
El servicio se recibe a conformidad, según lo solicitado.

Nota: La muestra ha sido preservada según lo establecido en el método estándar para análisis de aguas y aguas residuales. Una vez expira el periodo de preservación, la muestra será desechada. Resultados válidos para la muestra(s) analizada(s) únicamente.
Conoser Ltda. acreditado según Resolución IDEAM No. 3773 del 7 de Diciembre de 2016.

Consultoría y Servicios Conoser Ltda.
Carrera 278 No 70 - 30 Barrio los Alcázares. PBX: 2312699
E - Mail: conoser@hotmail.com

RESULTADOS DE LABORATORIO

CONSULTORIA Y SERVICIOS CONOSER LTDA



Muestra No.	58580	Fecha de Recepción:	Junio 13 de 2019
Procedencia:	Pavla Zahala	Fecha de Toma:	Junio 10 de 2019
Dirección:	Multiamiliar 6 Casa 3 Caminos de Sevilla	Tipo de Muestra:	Agua / Pantual
Sitio de Toma:	Muestra No. 2 20 Minutos	Tomada Por:	Puesta en Laboratorio

PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO	FECHA DE ANALISIS
Aséptico*	mg/L-Aa	SM 3114 B Absorción Atómica	< 0,001	Ver Anexo

OBSERVACIONES

RESULTADOS VALIDADOS ÚNICAMENTE CON FIRMA DEL JEFE DE LABORATORIO Y SELLO SECO. PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL.
(SM - Standard Methods for the examination of water and waste water- Edición 20 - 2017)

*Resultado por conversión con laboratorio acreditado ante el IRLAM en sus primeros.

Jefe de Laboratorio
Q. Andrea Arce G. Matrícula PQ-4588
Consejo Profesional de Química

FECHA DE EMISION
Julio 4 de 2019

Página 1 de 1
SCD-AP-UR-19

Recibido a Conformidad

El servicio se recibe a conformidad, según lo solicitado.

Nota: La muestra ha sido preservada según lo establecido en el método estándar para análisis de aguas y aguas residuales. Una vez expire el periodo de preservación, la muestra será desechada. Resultados válidos para la muestra(s) analizada(s) únicamente.
Conoser Ltda. acreditado según Resolución IRLAM No. 2772 del 7 de Diciembre de 2016.

RESULTADOS DE LABORATORIO

CONSULTORIA Y SERVICIOS CONOSER LTDA



Muestra No.	58581	Fecha de Recepción:	Junio 13 de 2019
Procedencia:	Paola Zabala	Fecha de Toma:	Junio 10 de 2019
Dirección:	Multifamiliar 6 Casa 3 Caminos de Sevilla	Tipo de Muestra:	Agua / Puntual
Sitio de Toma:	Muestra No. 3 30 Minutos	Tomada Por:	Puesta en Laboratorio

PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO	FECHA DE ANALISIS
Aménica*	mg/L-As	SM 3114 B Absorción Atómica	< 0.001	Ver Anexo

OBSERVACIONES

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE CON FIRMA DEL JEFE DE LABORATORIO Y SELLO SICO. PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL.
 (SM) - Standard Methods for examination of water and waste water. Edición 22 / 2017.

*Validado por convenio con laboratorio acreditado ante el IDEAM en este parámetro.

Jefe de Laboratorio
 Q. Andrea Arce G. Matrícula PQ-4586
 Consejo Profesional de Química

FECHA DE EMISION
 Julio 4 de 2019

Página 1 de 1
 SCG-AP-LRL-15

Recibido a Conformidad
 El servicio se recibe a conformidad, según lo solicitado.

Nota: La muestra no solo preservada según lo establecido en el método estándar para análisis de aguas y aguas residuales. Una vez expire el periodo de preservación, la muestra será desechada. Resultados válidos para la muestra(s) analizada(s) únicamente.
 Conoser Ltda. acreditado según Resolución IDEAM No. 2772 del 7 de Diciembre de 2016.



RESULTADOS DE LABORATORIO

CONSULTORIA Y SERVICIOS CONOSER LTDA

Muestra No.	58582	Fecha de Recepción:	Junio 13 de 2019
Procedencia:	Paola Zabala	Fecha de Toma:	Junio 10 de 2019
Dirección:	Multifamiliar 4 Casa 3 Caminos de Sevilla	Tipo de Muestra:	Agua / Puntual
Sitio de Toma:	Muestra No. 4 40 Minutos	Tomada Por:	Puesta en Laboratorio

PARAMETRO	UNIDAD	METODO	RESULTADO	FECHA DE ANALISIS
Aménico*	mg/L-As	SM 3114 B Absorción Atómica	< 0,001	Ver Anexo

OBSERVACIONES

RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE CON FIRMA DEL JEFE DE LABORATORIO Y SELLO SECO. PROHIBIDA SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL.
 (SM - Standard Methods for examination of water and waste water- Edición 21 / 2017)
 *Realizado por convenio con laboratorio acreditado ante el IIRAM en esta parameter.



Jefe de Laboratorio
 D. Andres Arce G. Matrícula PQ-4588
 Consejo Profesional de Química

FECHA DE EMISION
 Julio 4 de 2019

Página 1 de 1
 SCG-AP-LRL-19

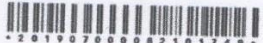
Recibido a Conformidad
 El servicio se recibe a conformidad, según lo solicitado.

Note: La muestra ha sido preservada según lo establecido en el método estándar para análisis de aguas y aguas residuales. Una vez expire el periodo de preservación, la muestra será desechada. Resultados válidos para la muestra(s) analizada(s) únicamente.
 Conoser Ltda. acreditado según Resolución (IIRAM No. 2772 del 7 de Diciembre de 2016).

Consultoria y Servicios Conoser Ltda.
 Carrera 27B No 70 – 10 Barrio los Alcázares. PBX: 2312699
 E – Mail: conoser@hotmail.com

Anexo B. Resultados de concentración disoluciones en serie.

Informe N°: 201907000082


* 201907000082101740 *

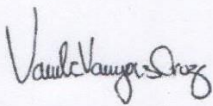
Informe de Ensayo (SN)

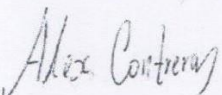
Numero de Ingreso 14298-08
Cliente: Gina Paola Zabala Gutierrez
Dirección: Carrera 7 # 6-73 sur torre 2 APTO 214
Proyecto: Control muestras de agua residual industrial
Identificación Cliente: Gina Paola Zabala Gutierrez
Lugar de Muestreo: ARI
Dirección: Sin definir
Ciudad /Región: BOGOTÁ, Bogotá D,C
Instrumento Ambiental
Punto de Muestreo: Muestra N° 58613
Matriz: Aguas residuales
Termino de Muestreo: 08/07/2019 00:00:00
Muestrado por: Cliente

Tipo de Muestreo: Puntual
Recepción Laboratorio: 10/07/2019 09:45:00

Parámetro	Unidades	Resultados	Fecha y Hora Análisis	Ref.Método
Arsénico	mg/L As	<0,001	24/07/2019 12:25:00	SM 3114C (2)

Notas:
(2) Standard Methods for the Examination of Water And Wastewater, 22th Edition 2012


Varcelis Vargas
Directora Operativa


Alex Contreras
Jefe de Área Fisicoquímica

(SN)

* 1429727VV101740 *

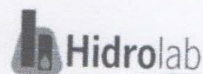
Fecha Emisión Informe: 26 de julio de 2019

Resultados Válidos únicamente para la muestra analizada.
Prohibida toda reproducción parcial o total de este informe sin autorización del laboratorio

Autopista Medellín Km 2.5, vía parcelas de Cota Km 1.3 Conjunto de Bodegas AEPI, Bodega N° 3A - Teléfono +57 (1) 5 19 03 85

14298-08 1/1

Informe N°: 201907000083



Informe de Ensayo (SN)

Numero de Ingreso 14298-09

Cliente: Gina Paola Zabala Gutierrez

Dirección: Carrera 7 # 6-73 sur torre 2 APTO 214

Proyecto: Control muestras de agua residual industrial

Identificación Cliente: Gina Paola Zabala Gutierrez

Lugar de Muestreo: ARI

Dirección: Sin definir

Ciudad / Región: BOGOTÁ, Bogotá D.C

Instrumento Ambiental

Punto de Muestreo: Muestra N° 58614

Matriz: Aguas residuales

Termino de Muestreo: 08/07/2019 00:00:00

Muestrado por: Cliente

Tipo de Muestreo: Puntual

Recepción Laboratorio: 10/07/2019 09:45:00

Parámetro	Unidades	Resultados	Fecha y Hora Análisis	Ref.Método
Arsénico	mg/L As	<0,001	24/07/2019 12:25:00	SM 3114C (2)

Notas:

(2) Standard Methods for the Examination of Water And Wastewater, 22th Edition 2012

Varcelis Vargas
Directora OperativaAlex Contreras
Jefe de Área Fisicoquímica

(SN)



Fecha Emisión Informe: 26 de julio de 2019

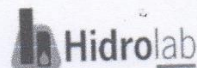
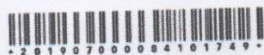
Resultados Válidos únicamente para la muestra analizada.
Prohibida toda reproducción parcial o total de este informe sin autorización del laboratorio

Autopista Medellín Km 2.5, vía parcelas de Cota Km 1.3 Conjunto de Bodegas AEPI, Bodega N° 3A - Teléfono +57 (1) 5 19 03 85

14298-09

1/1

Informe N°: 201907000084



Informe de Ensayo (SN)

Numero de Ingreso 14298-10

Cliente: Gina Paola Zabala Gutierrez

Dirección: Carrera 7 # 6-73 sur torre 2 APTO 214

Proyecto: Control muestras de agua residual industrial

Identificación Cliente: Gina Paola Zabala Gutierrez

Lugar de Muestreo: ARI

Dirección: Sin definir

Ciudad /Región: BOGOTÁ, Bogotá D,C

Instrumento Ambiental

Punto de Muestreo: Muestra N° 58615

Matriz: Aguas residuales

Termino de Muestreo: 08/07/2019 00:00:00

Muestrado por: Cliente

Tipo de Muestreo: Puntual

Recepción Laboratorio: 10/07/2019 09:45:00

Parámetro	Unidades	Resultados	Fecha y Hora Análisis	Ref.Método
Arsénico	mg/L As	<0,001	24/07/2019 12:25:00	SM 3114C (2)

Notas:

(2) Standard Methods for the Examination of Water And Wastewater, 22th Edition 2012

Varcelis Vargas
Directora OperativaAlex Contreras
Jefe de Área Físicoquímica

(SN)



Fecha Emisión Informe: 26 de julio de 2019

Resultados Válidos únicamente para la muestra analizada.
Prohibida toda reproducción parcial o total de este informe sin autorización del laboratorioAutopista Medellín Km 2.5, vía parcelas de Cota Km 1.3 Conjunto de Bodegas AEPI, Bodega N° 3A - Teléfono +57 (1) 5 19 03 85
14298-10 1/1