



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EFICIENCIA DE ELECTRODOS DE HIERRO Y ALUMINIO PARA LA ELIMINACIÓN DE
FLÚOR POR ELECTROCOAGULACIÓN EVALUANDO EL EFECTO DEL POTENCIAL DE
HIDRÓGENO Y LA DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS, A NIVEL LABORATORIO**

Raúl Antonio Ruano Katz

Asesorado por la Inga. Mercedes Esther Roquel Chávez

Guatemala, mayo de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFICIENCIA DE ELECTRODOS DE HIERRO Y ALUMINIO PARA LA ELIMINACIÓN DE
FLÚOR POR ELECTROCOAGULACIÓN EVALUANDO EL EFECTO DEL POTENCIAL DE
HIDRÓGENO Y LA DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS, A NIVEL LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RAÚL ANTONIO RUANO KATZ

ASESORADO POR LA INGA. MERCEDES ESTHER ROQUEL CHÁVEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MAYO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|---|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| VOCAL I | Ing. José Francisco Gómez Rivera |
| VOCAL II | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente |
| VOCAL V | Br. Fernando José Paz González |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|-------------|---------------------------------------|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| EXAMINADOR | Ing. Jorge Rodolfo García Carrera |
| EXAMINADOR | Ing. William Eduardo Fagiani Cruz |
| EXAMINADORA | Inga. Cinthya Patricia Ortiz Quiroa |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EFICIENCIA DE ELECTRODOS DE HIERRO Y ALUMINIO PARA LA ELIMINACIÓN DE FLÚOR POR ELECTROCOAGULACIÓN EVALUANDO EL EFECTO DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y LA DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS, A NIVEL LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería de ingeniería Química, con fecha 15 de julio del 2021.

Raul Antonio Ruano Katz

Guatemala 15 de julio de 2022

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Williams:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación titulado: "EFICIENCIA DE ELECTRODOS DE HIERRO Y ALUMINIO PARA LA ELIMINACIÓN DE FLUOR POR ELECTROCOAGULACIÓN EVALUANDO EL EFECTO DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y LA DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS, A NIVEL LABORATORIO", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Raúl Antonio Ruano Katz, quien se identifica con el registro académico 2017-00846 y con el CUI 3011 85220 01 01.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Mercedes Esther Roquel Chávez
Ingeniera Química
Colegiado No. 1,451

Mercedes Esther Roquel Chávez
ASESOR
Ingeniera Química
Colegiado activo no. 1451



Guatemala, 06 de marzo de 2023.
Ref. EIQ.TG-IF.005.2023.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **033-2021**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Raul Antonio Ruano Katz**.
Identificado con número de carné: **3011852200101**.
Identificado con registro académico: **201700846**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **TESIS (Informe Final, Seminario de Investigación)**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EFICIENCIA DE ELECTRODOS DE HIERRO Y ALUMINIO PARA LA ELIMINACIÓN DE FLÚOR POR ELECTROCOAGULACIÓN EVALUANDO EL EFECTO DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y LA DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS A NIVEL LABORATORIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Mercedes Esther Roquel Chávez, profesional de la Ingeniería Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ana Rufina
Ana Rufina Herrera Soto
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

ANA RUFINA HERRERA SOTO
INGENIERA QUIMICA
COL 2151



C.c.: archivo





LNG.DIRECTOR.100.EIQ.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **EFICIENCIA DE ELECTRODOS DE HIERRO Y ALUMINIO PARA LA ELIMINACIÓN DE FLÚOR POR ELECTROCOAGULACIÓN EVALUANDO EL EFECTO DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y LA DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS, A NIVEL LABORATORIO**, presentado por: **Raúl Antonio Ruano Katz**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Williams G. Alvarez Mejía: Mg.I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, abril de 2023.

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.417.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EFICIENCIA DE ELECTRODOS DE HIERRO Y ALUMINIO PARA LA ELIMINACIÓN DE FLÚOR POR ELECTROCOAGULACIÓN EVALUANDO EL EFECTO DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y LA DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS, A NIVEL LABORATORIO**, presentado por: **Raúl Antonio Ruano Katz**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Guatemala, mayo de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la sabiduría necesaria para afrontar los retos puestos durante la carrera.
- Mis padres** Eddie Cristian Ruano Arriola y Ana del Carmen Katz de Ruano, por su amor y comprensión durante toda mi vida.
- Mi hermana** Celeste Ruano, la que siempre me ha apoyado en los momentos difíciles.
- Mis tíos** Luis Bonilla y Sandra Ruano de Bonilla. Por su apoyo incondicional en mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---|--|
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por ser el <i>alma máter</i> en mi formación como profesional. |
| Facultad de Ingeniería | Por brindarme las bases para poder ejercer como profesional de la ingeniería Química. |
| Mi asesora | Inga. Esther Roquel, por brindarme su apoyo durante toda la carrera. |
| Mis amigos de la Facultad | Por apoyarme y compartir experiencias durante toda la carrera brindándonos apoyo mutuamente. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VII |
| GLOSARIO | IX |
| RESUMEN | XIII |
| OBJETIVOS..... | XV |
| HIPÓTESIS..... | XVII |
| INTRODUCCIÓN | XIX |
| | |
| 1. ANTECEDENTES | 1 |
| | |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| 2.1. El fluoruro en el agua | 7 |
| 2.1.1. Los efectos del fluoruro sobre la salud | 8 |
| 2.2. Coagulación y floculación | 9 |
| 2.3. Electrocoagulación | 9 |
| 2.3.1. Factores que afectan a la eficiencia de la electrocoagulación..... | 10 |
| 2.3.2. Efecto de la corriente..... | 11 |
| 2.3.3. Efecto de la alcalinidad y pH..... | 12 |
| 2.3.4. Efecto de la geometría de la celda | 13 |
| 2.3.4.1. Efecto de la distancia entre los electrodos | 15 |
| 2.3.5. Mecanismos de electrocoagulación..... | 16 |
| 2.4. Método SPADNS | 19 |
| 2.4.1. Solución de referencia | 19 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3. | METODOLOGÍA | 21 |
| 3.1. | Localización para la metodología del proceso de remoción de fluoruro por electrocoagulación | 21 |
| 3.2. | Variables del proceso de remoción de fluoruro por electrocoagulación | 21 |
| 3.3. | Delimitación del campo de estudio..... | 22 |
| 3.3.1. | Obtención de los reactivos | 23 |
| 3.3.2. | Análisis cuantitativo de fluoruro removido | 23 |
| 3.3.3. | Variables del proceso | 23 |
| 3.3.3.1. | Concentración del fluoruro en la solución | 23 |
| 3.3.3.2. | Volumen efectivo de la celda de electrocoagulación | 23 |
| 3.3.3.3. | Tiempo de electrocoagulación..... | 24 |
| 3.3.3.4. | pH..... | 24 |
| 3.4. | Recursos humanos disponibles | 24 |
| 3.5. | Recursos materiales disponibles (Equipo, cristalería, reactivos)..... | 24 |
| 3.6. | Técnica cuantitativa..... | 25 |
| 3.6.1. | Procedimiento | 26 |
| 3.7. | Recolección y ordenamiento de la información de concentración de flúor por método SPADNS | 33 |
| 3.8. | Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información de concentración de flúor obtenido del experimento | 35 |
| 3.9. | Diseño experimental y análisis estadístico utilizado para calculo de resultados | 39 |
| 3.9.1. | Diseño Experimental | 39 |
| 3.9.2. | Cálculo de valores medio de cada corrida..... | 39 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 3.9.3. | Cálculo de desviación estándar | 39 |
| 3.9.4. | Análisis de varianza..... | 40 |
| 3.10. | Plan de análisis de los resultados | 40 |
| 3.10.1. | Métodos y modelos de los datos según tipo de variables | 40 |
| 3.10.1.1. | Cálculo del porcentaje de remoción (%) de flúor de la solución..... | 41 |
| 3.10.2. | Programas a utilizar para análisis de datos | 41 |
| 4. | RESULTADOS | 43 |
| 5. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 47 |
| | CONCLUSIONES | 49 |
| | RECOMENDACIONES..... | 51 |
| | REFERENCIAS | 53 |
| | APÉNDICES | 57 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Electrodos monopolares en conexión en paralelo (MP-P) | 14 |
| 2. | Electrodos monopolares en conexión en serie (MP-S) | 14 |
| 3. | Electrodo bipolar en conexiones en serie (BP-S) | 15 |
| 4. | Diagrama de flujo de elaboración de celda de electrocoagulación..... | 27 |
| 5. | Diagrama de flujo preparación de soluciones..... | 28 |
| 6. | Diagrama de flujo proceso de electrocoagulación con electrodos de hierro | 29 |
| 7. | Diagrama de flujo proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio | 31 |
| 8. | Concentración flúor final con una distancia de electrodos de 1 cm..... | 43 |
| 9. | Concentración flúor final con una distancia de electrodos de 1.5 cm..... | 44 |
| 10. | Cantidad de flúor removido con una distancia de 1 cm entre electrodos..... | 44 |
| 11. | Cantidad de flúor removido con una distancia de 1.5 cm entre electrodos..... | 45 |

TABLAS

| | | |
|------|--|----|
| I. | Efectos de la salud dependiendo la cantidad de fluoruro ingerida | 8 |
| II. | Ventajas y desventajas de electrocoagulación..... | 19 |
| III. | Variables independientes para el proceso remoción de fluoruro por electrocoagulación | 22 |

| | | |
|-------|---|----|
| IV. | Variables dependientes para el proceso remoción de fluoruro por electrocoagulación..... | 22 |
| V. | Reactivos..... | 25 |
| VI. | Cristalería, equipo y otros..... | 25 |
| VII. | Concentración de flúor por el método SPADNS del electrodo de hierro..... | 33 |
| VIII. | Concentración de flúor por el método SPADNS del electrodo de aluminio..... | 34 |
| IX. | Concentración de flúor utilizando electrodos de hierro..... | 35 |
| X. | Concentración de flúor utilizando electrodos de aluminio..... | 36 |
| XI. | Porcentaje de remoción de flúor con electrodos de hierro..... | 37 |
| XII. | Porcentaje de remoción de flúor con electrodos de aluminio..... | 38 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|-----------------------|------------------------|
| A | Amperio |
| cm³ | Centímetro cuadrado |
| °C | Grados Celsius |
| h | Hora |
| L | Litro |
| m² | Metro cuadrado |
| m³ | Metro cúbico |
| mL | Mililitro |
| min | Minuto |
| pH | Potencial de hidrógeno |
| s | Segundo |
| V | Voltio |

GLOSARIO

| | |
|--|---|
| Aguas Residuales | El agua residual de tipo ordinario o especial que ha recibido un uso y cuya calidad ha sido modificada por la incorporación de agentes contaminantes. |
| Agua residual de tipo especial | Agua residual generada por actividades municipales, industriales, servicios agrícolas, pecuarios, hospitalarios y todas aquellas que no sean de tipo ordinario. |
| Agua residual de tipo ordinario | El agua residual generada por las actividades domésticas, tales como servicios sanitarios, lavatorios, fregaderos, así como la mezcla de las mismas. |
| Caracterización de efluentes | Las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales provenientes de descargas. |
| Contaminación | La modificación o alteración adversa de la calidad física, química, biológica y radioactiva del cuerpo receptor proveniente de descargas de desechos líquidos. |
| Electrocoagulación | Procedimiento que implica la inyección de iones metálicos para aglutinar los contaminantes dispersos en un agua sacrificando directamente a uno de los |

electrodos (Ánodo) complementado con el barrido por arrastre del gas generado.

Electrodo Elemento terminal de un circuito, especialmente el encerrado en un tubo o ampolla de vidrio con aire o gas enrarecidos, como los de las válvulas radioeléctricas.

Ente generador La persona individual o jurídica, titular de una obra, proyecto o cualquier tipo de actividad, responsable de generar, producir o administrar aguas residuales y de su vertido en un cuerpo receptor.

Muestra simple Aquella tomada en una sola operación, de tal forma que el tiempo empleado en su extracción sea el transcurrido para obtener el volumen necesario, es decir, solo representa características del agua residual en ese momento.

Parámetro La variable que identifica una característica de las aguas residuales asignándole un valor numérico.

Tratamiento de aguas residuales Cualquier proceso físico, químico, biológico o una combinación de los mismos, utilizado para modificar las condiciones de las aguas residuales.

Sedimentación Proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo.

Método SPANDS

Método colorimétrico que se basa en la reacción de circonio y flúor en donde el colorante se vuelve progresivamente más claro a una alta concentración de flúor.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es para comparar la eficiencia de los electrodos de hierro y aluminio para la remoción de flúor por medio del proceso de electrocoagulación utilizando una celda con una disposición monopolar con conexiones en serie (MP-S) con una orientación vertical de los electrodos. Se evaluaron los efectos del potencial de hidrógeno en una solución sintética con una concentración de flúor conocida, y la distancia entre los electrodos dentro de la celda de electrocoagulación.

Se construyó una celda de electrocoagulación de un volumen efectivo de 1L, se tomó una muestra inicial con la cual se cuantificó el flúor por medio del método SPADNS. Se utilizó un espectrofotómetro especializado para obtener la concentración al final del tratamiento y se determinó el porcentaje de flúor eliminado por electrocoagulación de la solución, observando una mayor disminución con una distancia de los electrodos de 1.5 cm.

En el experimento realizado se obtuvo que el método de electrocoagulación es eficiente ya que se observó una disminución de la concentración de flúor en el agua, se determinó que los electrodos de hierro obtuvieron una mayor eficiencia que los electrodos de aluminio con una distancia entre electrodos de 1 cm teniendo un porcentaje de 80.9 % a 73.77 % respectivamente, utilizando un tiempo de residencia de 15 min y un voltaje de 10 V, trabajando a condiciones ambientales.

OBJETIVOS

General

Evaluar la eficiencia al utilizar electrodos de hierro y aluminio para remover flúor en una celda monopolar con conexiones en serie con una disposición vertical de los electrodos por el proceso de electrocoagulación

Específicos

1. Comparar la eficiencia de los electrodos de hierro y aluminio para la eliminación de flúor por electrocoagulación, a nivel laboratorio.
2. Evaluar el comportamiento de la eficiencia de la electrocoagulación para remover flúor a diferentes potenciales de hidrógeno, a nivel laboratorio.
3. Comparar el comportamiento de la eficiencia de los electrodos cuando se modifica la distancia entre ellos en la celda para la eliminación de flúor por electrocoagulación, a nivel laboratorio.

HIPÓTESIS

La eficiencia en la remoción de flúor de los electrodos de hierro y aluminio variará por el valor de pH de la solución.

Hipótesis nula:

- **Ho:** la eficiencia de la remoción de flúor de los electrodos de hierro y aluminio no tendrá variación por el valor de pH de la solución.

Hipótesis alternativa:

- **Ha.** la eficiencia de la remoción de flúor de los electrodos de hierro y aluminio tendrá variación por el valor de pH de la solución.

La eficiencia en la remoción de flúor de los electrodos de hierro y aluminio variará por la distancia entre los electrodos en la celda de electrocoagulación

Hipótesis nula

- **Ho:** la eficiencia de los electrodos no tendrá variación si se varia distancia entre los electrodos en la celda.

Hipótesis alternativa:

- **Ha:** la eficiencia de los electrodos tendrá variación si se varia la distancia entre los electrodos en la celda.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala la norma COGUANOR 29001 establece que el límite máximo permisible de fluoruro en el agua potable es de 1,7 mg / L y la OMS establece un valor de referencia para el fluoruro en el agua potable es de 1,5 mg / L. El tratamiento de flúor se realizó utilizando agua sintética preparada en el laboratorio con una concentración de flúor conocida utilizando el método de electrocoagulación.

Se ha estudiado la electrocoagulación, utilizando electrodos de hierro y aluminio, variando parámetros como la distancia entre los electrodos de 1 cm y 1.5 cm y de pH de la solución inicial de 4, 6, 8 y 10, la densidad de corriente eléctrica de 15 V y un tiempo de residencia de 15 min. La electrocoagulación es utilizado por sus propiedades de desestabilización de las cargas catiónicas y/o aniónicas de estos fomentando la eliminación de flúor por sedimentación.

Para la implementación de este método en el laboratorio se hicieron pruebas en proceso batch en una celda de electrocoagulación utilizando una configuración monopolar en conexiones en serie (MP-S) en un reactor discontinuo con un volumen efectivo de 1 L, para determinar la eficiencia de los electrodos en la eliminación de flúor en aguas residuales.

1. ANTECEDENTES

En el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), México, con apoyo de entidades internacionales Alarcón-Herrera, Bundschuh, Nath, Nicolli, Gutierrez, Reyes-Gomez, Nuñez, Martín-Dominguez, & Sracek, (2013) se realizó un estudio, *Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation*. El objetivo del estudio fue cuantificar la concentración de arsénico y fluoruro en aguas subterráneas de América latina. Los resultados del estudio demuestran la presencia de altas concentraciones de arsénico y fluoruro en el agua subterránea en zonas áridas de varias regiones de Latinoamérica por lo que esto podría traer riesgos para la salud como fluorosis dental o esquelética.

En el Centro de Tecnología y Desarrollo Rural, Instituto Indio de Tecnología, Delhi, Hauz Khas, Nueva Delhi, India. Meenakshi & Maheshwari, (2006) realizaron el estudio: *Fluoride in drinking water and its removal*. El objetivo principal el estudio es describir las tecnologías disponibles para la eliminación de flúor y las ventajas y limitaciones de cada una. La eficiencia de eliminación de fluoruro varía de acuerdo con muchas sustancias químicas, geográficas y condiciones económicas por lo que se ha concluido que la selección del proceso de tratamiento debe ser específico del sitio según las necesidades locales y las condiciones predominantes, ya que cada tecnología tiene algunas limitaciones y ningún proceso puede cumplir el propósito en diversas condiciones.

En la Unidad de Desarrollo de Tecnología de Silicio (UDTS), Algeria, Drouiche, Aoudj, Lounici, Drouiche, Ouslimane y Ghaffour (2012) realizaron el siguiente trabajo de investigación titulado: *Fluoride Removal from pretreated*

Photovoltaic Wastewater by Electrocoagulation: An Investigation of The Effect of Operational Parameters. El objetivo del estudio fue estudiar el efecto del voltaje, potencial de hidrógeno y distancia de los electrodos para la eliminación de fluoruro en aguas pre-tratadas por electrocoagulación. Se obtuvo que las condiciones más favorables para la eliminación de fluoruro fueron con un potencial de hidrógeno de 6, una distancia entre electrodos de 1 cm y un voltaje de 30. Además, la eliminación de fluoruro se realiza bajo la descarga directa. Los resultados mostraron una alta eficacia del método de electrocoagulación para eliminar el fluoruro de las soluciones acuosas.

Liu, Ye, He, Chen & Hu (2016) realizaron en el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica de Guangdong China el estudio *Simultaneous removal of Ni(II) and fluoride from a real flue gas desulfurization wastewater by electrocoagulation using Fe/C/Al electrode.* Se evaluó la eliminación con electrodos híbridos Fe / C /Al para la separación de fluoruro e iones de níquel de un agua residual FGD. Los resultados mostraron que la eliminación más favorable de níquel y fluoruro se obtuvo a un tiempo de contacto de 25 minutos y con una densidad de corriente de 5.00 mA/cm². La eficiencia máxima para la eliminación de flúor de 86 % y de níquel (II) de 98 % se eliminaron con los electrodos híbridos Fe / C /Al.

El Laboratorio de Química Analítica, Facultad de Ciencias, Universidad de Yaoundé I, Camerún apoyo con el estudio de Nanseu-Njiki, Tchamango, Ngom, Darchen y Ngameni (2009) *Mercury (II) removal from water by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes* en donde se estudió el tratamiento de soluciones sintéticas que contienen mercurio (II). Evaluando los efectos de la distancia entre los electrodos, la densidad de la corriente y el pH en la eficiencia de eliminación de mercurio (II) utilizando electrodos de aluminio y electrodos de hierro. Se obtuvo como resultado que la eficiencia de remoción de mercurio (II)

fue superior al 99.9 % cuando la distancia entre los electrodos era de 3 cm y que la densidad de corriente vario entre 2.4 1 3.125 A / m², a un pH de 3 a 7. La eficiencia máxima de los iones mercurio (II) utilizando electrodos de hierro y electrodos de aluminio son similares dado que el efluente de agua se hizo con agua desionizada, pero se confirmó que, con electrodos de hierro, el tratamiento fue más rápido y mejor que los electrodos de aluminio.

En el Departamento de Química, Government College University, Faisalabad, Pakistán Kaleem, Asghar, Amira, Majid, Mahmood y Samia (2013) realizaron el estudio: *Efficiency of Aluminum and Iron Electrodes for the Removal of Heavy Metals [(Ni (II), Pb (II), Cd (II))] by Electrocoagulation Method* el cual tuvo como objetivo cuantificar la eficiencia de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales que contienen iones de metales pesados como níquel (Ni), plomo (Pb) y cadmio (Cd). En la investigación se utilizaron electrodos de hierro y electrodos de aluminio, en aguas residuales sintéticas que contenían una alta concentraciones de metales pesados variando parámetros como: el tiempo de contacto, el pH, la concentración de electro coagulante y la densidad de corriente para lograr la máxima eliminación eficiencia estos metales pesados. Se obtuvo que la eliminación de metales pesados tuvo su eficiencia máxima a un pH 7 utilizando electrodos de hierro con una densidad de corriente de 2 V, debido a la alta capacidad de óxidos férricos hidratados.

En el Instituto de Posgrado de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Taiwán, República de China Hu, Lo & Kuan (2003) realizaron el estudio: *Effects of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminum electrodes*. Se llevaron a cabo Experimentos por lotes con electrodos de aluminio bipolares y pruebas de polarización potenciodinámica con sistemas monopolares se llevaron a cabo para investigar los efectos del tipo y la concentración de aniones coexistentes sobre la defluoruración en proceso de

electrocoagulación. La existencia de iones sulfato inhibe la localizada. Corrosión de los electrodos de aluminio, lo que conduce a una menor eficiencia de defluoración debido a una menor eficiencia de corriente. La presencia de iones cloruro o nitrato impidió la inhibición de los iones sulfato y los iones cloruro fueron más eficientes. Los resultados demuestran que el tipo de anión dominante dirige la EC reacción de defluoración. La eficiencia de defluoración fue casi del 100 % y la mayor parte de la reacción de eliminación de fluoruro. Ocurrió en la superficie del ánodo en la solución sin los aniones coexistentes, debido a la electrocondensación.

En el Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, Valencia, España. Arroyo, Pérez-Herranz, Montañés, García-Antón y Guiñón (2009) realizaron la investigación titulada: *Effect of pH and chloride concentration on the removal of hexavalent chromium in a batch electrocoagulation reactor*. Se realizó el estudio con el fin de estudiar el efecto del pH y la concentración de iones cloruro en la remoción de Cr (VI) en aguas residuales mediante electrocoagulación utilizando electrodos de hierro utilizando H₂SO₄ para la regulación del pH. Teniendo como conclusión, que a altas concentraciones de H₂SO₄ la reducción de Cr (VI) a Cr (III) se favorece, pero no hay precipitaciones del cromo debido al bajo valor del pH alcanzado en la solución. Los iones de cloruro que mejoran la disolución del ánodo mediante la corrosión por picaduras, lo que favorece la reducción de Cr (VI) a Cr (III) y la precipitación subsiguiente de hidróxidos de Fe³⁺ / Cr³⁺, especialmente a baja concentraciones de H₂SO₄.

Zhao, Zhao, Yang & Li (2010) realizaron un estudio en el Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad de Pekín, Beijín, República de China titulado: *Effects of Ca²⁺ and Mg²⁺ on Defluoridation in the Electrocoagulation Process* teniendo como objetivo estudiar la remoción de fluor utilizando iones Ca²⁺

e iones Mg^{2+} a diferentes concentraciones y determinar cuál de los dos iones es más adecuado para la desfluorización por el proceso de electrocoagulación. Se tuvo como resultado que la desfluorización de ambos iones era diferente. El aumento de concentración de Ca^{2+} mejoraba la eficiencia de desfluorización, pero no tenía la relación molar óptima y a bajas concentraciones no tuvo influencia en el mecanismo de desfluorización por electrocoagulación. Cuando se varió las concentraciones de Mg^{2+} la relación molar óptima aumento al aumentar la concentración de Mg^{2+} observando que la utilización de iones Mg^{2+} fue más eficiente para la remoción de flúor que los iones Ca^{2+} por electrocoagulación.

En la Universidad Tarbiat Modares, Iran se realizaron el estudio titulado: *Optimization of parameters of electrocoagulation/flotation process for removal of Acid Red 14 with mesh stainless steel electrodes*. Este estudio trata sobre el tratamiento de aguas residuales que contienen colorantes. El proceso de electrocoagulación y electro flotación, se utilizó por su adaptabilidad y compatibilidad con el medio ambiente se consideran los métodos más apropiados para el tratamiento de aguas residuales que contienen colorantes químicos. Se tuvo un valor de eficiencia en eliminación de flúor del 99 % con concentración inicial de 150 mg / L y densidad de corriente eléctrica 40 mA / cm² (0,8 A) en condiciones óptimas y en 20 minutos. (Ahangarnokolaei, Ganjidoust & Ayati, 2017)

El Laboratorio de Medio Ambiente, Procesos y Energía, Escuela Superior de Tecnología, Universidad Hassan II de Casablanca, Oasis Casablanca, Marruecos en donde se realizó la investigación: *Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches*. El proceso de la CE sigue siendo objeto de una intensa actividad de investigación dado a sus diversas ventajas: es simple, de bajo costo, ecológico, versátil, eficiente, y

también es una técnica inespecífica, capaz de eliminar casi todos los tipos de contaminantes simultáneamente. Como consecuencia, su diseño es complejo, dado que abarca geometrías de celdas y electrodos, modo de alimentación y condiciones de mezcla, que pueden afectar la densidad de corriente. Como conclusión, a pesar de que EC es un proceso robusto y versátil, sigue siendo más difícil de simular que otros tratamientos de agua, por lo que es necesario seguir desarrollando estas tecnologías que podría ser el tratamiento de aguas más importante en el futuro. (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017)

2. MARCO TEÓRICO

2.1. El fluoruro en el agua

El fluoruro en cantidades mínimas es un componente esencial para mineralización normal de los huesos y formación de esmalte dental. Sin embargo, su ingesta excesiva puede resultar en una enfermedad conocido como fluorosis. (Meenakshi & Maheshwari, 2006)

Según los Criterios de Salud Ambiental 227 - Fluoruro - Organización Mundial de la Salud, Ginebra, 2002 el flúor tiene efectos beneficiosos y perjudiciales para la salud humana por lo que la OMS recomienda el valor de referencia para el fluoruro en el agua potable es de 1.5 mg / L, en Guatemala la norma COGUANOR 29001 establece el límite máximo permisible de fluoruro en el agua potable de 1.7 mg / L. Estudios revelan presencia de niveles bajos de calcio y altos niveles de bicarbonato afectan la alcalinidad del agua lo que favorece el alto contenido de flúor en el agua subterránea, la concentración natural de fluoruro depende de la geología, características químicas y físicas del acuífero, la porosidad y acidez del suelo y rocas, temperatura, la acción de otros productos químicos y la profundidad de los pozos. (Meenakshi & Maheshwari, 2006).

Las aguas superficiales generalmente no contienen más de 0.3 mg / L de fluoruro a menos que estén contaminados por fuentes externas. Otras fuentes de intoxicación por flúor son alimentos, exposición industrial, medicamentos, cosméticos, entre otros. (Meenakshi & Maheshwari, 2006)

2.1.1. Los efectos del fluoruro sobre la salud

El flúor es un elemento altamente electronegativo que tiene un extraordinario tendencia a ser atraído por iones cargados positivamente como calcio. De ahí que el efecto del flúor sobre tejidos mineralizados como huesos y dientes que conducen a alteraciones en el desarrollo es de importancia ya que tienen la mayor cantidad de calcio y por lo tanto atraer la máxima cantidad de fluoruro que se deposita como cristales de calcio-fluorapatita. (Meenakshi & Maheshwari, 2006)

Los iones de fluoruro se incorporan a la red cristalina de apatita de esmalte de tejido calcífero durante su formación. El hidroxilo se sustituye por ion fluoruro ya que la fluorapatita es más estable que la hidroxiapatita. Por tanto, una gran cantidad de flúor se une a estos tejidos y solo se excreta una pequeña cantidad a través del sudor, la orina y las heces. (Meenakshi & Maheshwari, 2006)

Las diversas formas de fluorosis que surgen debido a una ingesta excesiva. de fluoruro teniendo los siguientes parámetros:

Tabla I. **Efectos de la salud dependiendo la cantidad de fluoruro ingerida**

| Efectos del fluoruro en el agua sobre la salud humana | |
|---|--|
| Concentración de fluoruro (mg/L) | Efectos |
| < 1.0 | Límite seguro |
| 1.0 - 3.0 | Fluorosis dental (decoloración, motas y picaduras de los dientes) |
| 3.0 - 4.0 | Huesos y articulaciones rígidos y quebradizos |
| 4.0 - 6.0 y por encima | Deformidades en los huesos de la rodilla y la cadera y, finalmente, parálisis que hace que la persona no pueda caminar o pararse en una postura erguida, fluorosis paralizante |

Fuente: Meenakshi & Maheshwari. (2006). *Fluoride in drinking water and its removal*.

Consultado 8 de marzo de 2021. Recuperado de <https://acortar.link/T0LUDN>.

2.2. Coagulación y floculación

La coagulación y la floculación ocurren en pasos sucesivos destinados a superar las fuerzas que estabilizan las partículas suspendidas en la solución acuosa. En la coagulación, que es la sustancia química más importante operación en el tratamiento de agua potable, se agregan coagulantes con el fin de reducir la carga eléctrica entre las partículas suspendidas y, respectivamente, en la floculación, se agregan floculantes para mejorar la colisión y el crecimiento de flóculos. (Katrivesis, Karela, Papadakis & Paraskeva, 2019)

En la mayoría de los casos, las partículas en aguas naturales tienen una fuerte carga negativa en sus superficies que obliga a la partícula a permanecer lejos de cada uno, formando soluciones estables con partículas en suspensión medio. Los coagulantes desestabilizan las partículas coloidales permitiendo la creación de micro flóculos. La adición adicional de reactivos floculantes como micro flóculos para formar flóculos más grandes y densos que pueden ser más fácil de precipitar en tanques de sedimentación (Katrivesis, Karela, Papadakis & Paraskeva, 2019). Electrolitos como alumbre (sulfato de aluminio, Al_2SO_4) y PAC (cloruro de poli aluminio, $AlnCl(3nm)(OH)m$) se utilizan ampliamente como coagulantes, mientras que PAM (poliacrilamida, $(C_3H_5NO)_n$), se utiliza como floculante de los micro flóculos formados por los electrolitos. (Katrivesis, Karela, Papadakis & Paraskeva, 2019)

2.3. Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso que consiste remover contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados, por electrodisolución de ánodos, generalmente de hierro o aluminio. La generación de cationes metálicos tiene lugar en el ánodo, debido a la electroquímica

oxidación del hierro o el aluminio, mientras que en el cátodo típicamente ocurre la producción de H₂. El gas generado ayuda a la flotación de partículas floculadas y, por lo tanto, el proceso a veces se denomina electro floculación. (Arroyo, Pérez-Herranz, Montañés, García-Antón y Guiñón 2009)

La CE comprende tres etapas sucesivas:

- Formación de coagulantes por oxidación electrolítica del ánodo.
- Desestabilización de los contaminantes, suspensión de partículas y rotura de emulsiones.
- Agregación de las fases desestabilizadas para formar bandadas.

Además, las siguientes reacciones fisicoquímicas también pueden tener lugar en la celda CE:

- Reducción catódica de impurezas presentes en aguas residuales.
- Descarga y coagulación de partículas coloidales.
- Migración electroforética de los iones en solución.
- Electro flotación de las partículas coaguladas por burbujas de O₂ y H₂ producido en los electrodos.
- Reducción de iones metálicos en el cátodo.

2.3.1. Factores que afectan a la eficiencia de la electrocoagulación

Los parámetros que afectan la eficacia de la EC están relacionados con el funcionamiento condiciones tales como corriente o voltaje y tiempo de funcionamiento, características de las aguas residuales como pH, alcalinidad y

conductividad y geometría del reactor EC y los electrodos EC. (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017).

2.3.2. Efecto de la corriente

La corriente I es un parámetro clave de EC ya que se diseña a menudo como una función de densidad de corriente i definido como la relación de corriente sobre la superficie del electrodo área S . La ecuación de continuidad impone la conservación actual entre el ánodo y el cátodo, la densidad de corriente puede diferir entre los electrodos dónde la densidad de corriente determina la dosis de coagulante en el ánodo y la evolución de gas hidrógeno (H_2) en el cátodo gobernado por Ley de Faraday. (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017)

La densidad de burbujas afecta la hidrodinámica del sistema, que influye en la transferencia de masa entre contaminantes, coagulantes y gases. microburbujas, y finalmente dicta la tasa de colisión de partículas coaguladas que da lugar a la formación de flóculos. (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017)

La densidad de corriente afecta también a la hidrolización especies de metales a través de la evolución del pH durante el proceso de EC como función de la alcalinidad del agua. La corriente parece, por tanto, crear un entorno fisicoquímico dinámico que gobierna directamente la coagulación mecanismo de floculación y favorece al electro migración de iones y coloides cargados. (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017)

2.3.3. Efecto de la alcalinidad y pH

El pH es otro factor clave que influye en el rendimiento de la EC, especialmente el mecanismo de coagulación ya que la influencia del pH gobierna el metal hidrolizado especies generadas en medios reactivos e influye en los mecanismos predominantes de las EC. (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017).

Un estudio de la especiación de Al y Fe resultante de la hidrólisis de sus cationes correspondientes gobernados por termodinámica el equilibrio es primordial para desentrañar cómo el pH contribuye a dictar los mecanismos de adsorción y coagulación particularmente dependen del pH. (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017).

La carga superficial del Al o Fe Los precipitados pueden explicarse por la adsorción de los solubles cargados. Tomando en cuenta su carga superficial, el comportamiento entre el pH dependiente especies coagulantes y sus contaminantes vecinos pueden ser deducido de interacciones electrostáticas. (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017)

La importancia del pH sobre el rendimiento de la EC puede ser igualmente subrayada por la termodinámica asociado con la electroquímica según lo definido por la ecuación de Nernst. Este último permite representar el diagrama E-pH de un electrodo apropiado material que, una vez superpuesto al diagrama E-pH del agua, conduce a un diagrama conocido como diagrama de Pourbaix que señala las regiones de especies de metales termodinámicamente estables en ambiente acuoso a saber, inmunidad, pasivación y corrosión, lo que permite predecir la correspondiente estabilidad del electrodo y su comportamiento de disolución en

agua definiendo la especie acuosa estable en un dominio dado de electroquímica potencial y pH. (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017).

2.3.4. Efecto de la geometría de la celda

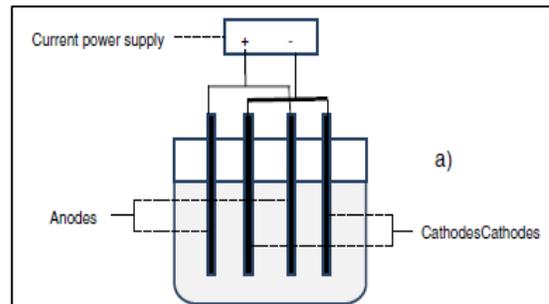
La celda de electrocoagulación EC está hecho principalmente de electrodos y carcasa. Los electrodos están colocados en una disposición vertical en un tanque no conductor en donde se realiza el tratamiento de aguas (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017).

- Disposición de electrodos:

El proceso de EC puede verse afectado por la disposición de los electrodos y su distancia entre ellos. Los electrodos pueden estar compuesto simplemente por un ánodo y un cátodo o estar compuesto por muchos ánodos y cátodos de acuerdo con el proceso a realizar en la celda EC. La disposición de los electrodos se puede clasificar en monopolar y bipolar. (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017).

Los electrodos monopolares en conexión en paralelo (MP-P) corresponden a una disposición de electrodos que consta de cátodos y ánodos colocados alternativamente. Cada par de cátodo / ánodo corresponde a una pequeña celda electrolítica en la que el voltaje es el mismo. El reactor consta, por tanto, de celdas electrolíticas en paralelo. En consecuencia, la corriente de cada celda electrolítica es aditiva. (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017).

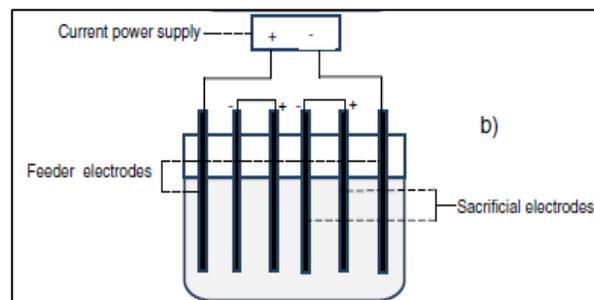
Figura 1. **Electrodos monopolares en conexión en paralelo (MP-P)**



Fuente: Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, (2017). *Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches*. Consultado el 9 de marzo de 2021. Recuperado de <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>.

Los electrodos monopolares en conexiones en serie (MP-S) cada par de electrodos de sacrificio internos está conectado internamente entre sí, y no tiene interconexiones con los dos exteriores electrodos. En este caso, la corriente eléctrica que atraviesa todos los electrodos es el mismo, mientras que el voltaje global es la suma del voltaje en cada celda electrolítica individual (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017).

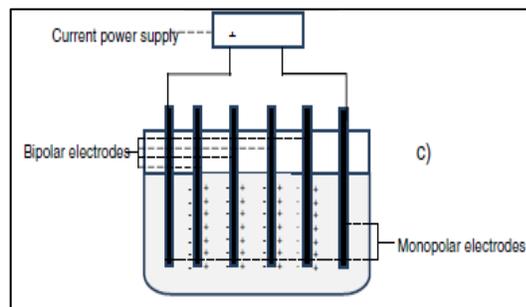
Figura 2. **Electrodos monopolares en conexión en serie (MP-S)**



Fuente: Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, (2017). *Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches*. Consultado el 9 de marzo de 2021. Recuperado de <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>.

El electrodo bipolar en conexiones en serie (BP-S) comprende dos electrodos conectados a la fuente de alimentación eléctrica y los electrodos de sacrificio colocado entre los dos electrodos externos. Electrodos externos son monopolares y los internos son bipolares. En la disposición bipolar los electrodos no están interconectados y cada uno de sus lados actúa simultáneamente como ánodo y cátodo. Esto significa que los lados opuestos de cada electrodo bipolar tienen carga opuesta, la disolución anódica tiene lugar en el lado positivo, mientras que el lado negativo es propenso a catódicas reacciones. Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017).

Figura 3. **Electrodo bipolar en conexiones en serie (BP-S)**



Fuente: Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, (2017). *Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches*. Consultado el 9 de marzo de 2021. Recuperado de <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>.

2.3.4.1. Efecto de la distancia entre los electrodos

La caída de voltaje aumenta a medida que aumenta la distancia entre electrodos. Por lo tanto, el consumo de energía disminuye al disminuir la brecha entre electrodos. A medida que la distancia entre electrodos se vuelve burbujas de gas más bajas, más generadas electroquímicamente traen sobre la hidrodinámica turbulenta, lo que conduce a una transferencia de gran masa, así

como a una alta velocidad de reacción entre las especies coagulantes y contaminantes. El espacio entre electrodos define el tiempo de residencia entre el ánodo y el cátodo para un sistema continuo y el tiempo de tratamiento para un reactor discontinuo para alcanzar una eficiencia EC deseable (Drouiche, 2012. Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017).

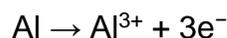
Para una disposición compleja de electrodos, la distancia entre electrodos determina también el número de electrodos a colocar en electrocoagulación celda, una vez definido su volumen (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017).

2.3.5. Mecanismos de electrocoagulación

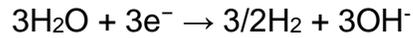
En el proceso de CE, las especies coagulantes se generan in situ utilizando la electrodisolución de un ánodo de sacrificio, generalmente en hierro o aluminio, utilizando por corriente eléctrica aplicada entre electrodos metálicos. (Arroyo Pérez-Herranz, Montañés, García-Antón, y Guiñón, 2009).

La formación de campos magnéticos es causada por la electrodisolución del ánodo y la reducción de agua en el cátodo que genera respectivamente dentro de la solución, iones de aluminio e hidróxido de acuerdo con las siguientes reacciones. (Arroyo Pérez-Herranz, Montañés, García-Antón, y Guiñón, 2009).

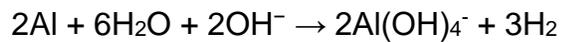
Ánodo:



Cátodo:



Por otro lado, a valores de pH altos, tanto el ánodo como el cátodo puede ser atacado químicamente por iones OH^- según la reacción a continuación.



Los iones Al^{3+} y OH^- producidos en los electrodos reaccionan para formar especies monoméricas y poliméricas que finalmente se transforman en $\text{Al}(\text{OH})_3$ capaz de unir iones metálicos. (Arroyo Pérez-Herranz, Montañés, García-Antón, y Guiñón, 2009).

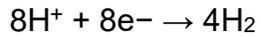
Fe_2^+ es el ion común generado durante la electrólisis de hierro, y en presencia de oxígeno disuelto en el agua, puede ser oxidado fácilmente en Fe_3^+ . Se han propuesto dos mecanismos para explicar la producción de hidróxidos de hierro. (Arroyo Pérez-Herranz, Montañés, García-Antón, y Guiñón, 2009).

- Mecanismo 1:

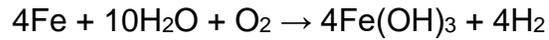
- Ánodo



- Cátodo

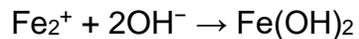


- Reacción general

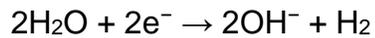


- Mecanismo 2:

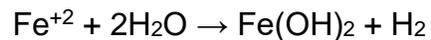
- Ánodo



- Cátodo



- Ecuación general



Durante la electrólisis, los hidróxidos de Fe (II) y Fe (III) permanecen en el solución como suspensiones y también puede eliminar los iones metálicos por complejación o atracción electrostática seguida de coagulación. (Arroyo Pérez-Herranz, Montañés, García-Antón, y Guiñón, 2009).

- Ventajas y desventajas de la utilización del proceso de electrocoagulación

Tabla II. **Ventajas y desventajas de electrocoagulación**

| Las ventajas y desventajas del proceso EC | |
|--|--|
| Ventajas | Desventajas |
| Método no específico | Necesidad de mantenimiento |
| Dirección de agua potable y aguas residuales | |
| Combina oxidación, coagulación y precipitación (resulta en costos de capital más bajos) | Pasivación de electrodos a lo largo del tiempo |
| Necesidad reducida de reactivos químicos (reemplazados por electrodos de Al o Fe y electricidad) | Necesidad de agua de alta conductividad |
| Costo operativo reducido | |
| Reducción del riesgo de contaminación secundaria | |
| Baja producción de lodos | Falta de diseño sistemático del reactor |
| Se puede utilizar energía solar | |

Fuente: Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, (2017). *Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches*. Consultado el 9 de marzo de 2021. Recuperado de <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>.

2.4. Método SPADNS

El método colorimétrico SPADNS se basa en la reacción entre el fluoruro y circonio. La velocidad de reacción entre los iones de fluoruro y circonio se ve muy influenciada por la acidez de la mezcla de reacción. Al aumentar la proporción de ácido en el reactivo, la reacción se puede hacer prácticamente instantánea. El método se rige en gran medida por la tolerancia resultante a estos iones. (Muralikrishna y Manickam, 2017).

2.4.1. Solución de referencia

Se agrega 10 mL de solución SPADNS a 100 mL de agua destilada. Diluya 7 mL de HCl concentrado a 10 mL y agréguelo al diluido. Solución SPADNS. La solución resultante, utilizada para establecer la referencia punto (cero) del espectrofotómetro o fotómetro, es estable y puede ser reutilizado

indefinidamente. Esta solución de referencia se puede eliminar utilizando, si deseado, uno de los estándares preparados como referencia. (Muralikrishna y Manickam, 2017)

3. METODOLOGÍA

3.1. Localización para la metodología del proceso de remoción de fluoruro por electrocoagulación

Las instalaciones en las cuales se realizó la fase experimental del presente estudio se detallan a continuación:

- Laboratorio de Química General, Departamento de Química General, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Laboratorio de Microbiología Sanitaria, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.2. Variables del proceso de remoción de fluoruro por electrocoagulación

En la tabla III, se describen las variables independientes para el proceso de remoción de fluoruro por electrocoagulación.

Tabla III. **Variables independientes para el proceso remoción de fluoruro por electrocoagulación**

| Núm. | Variable | Dimensional | Descripción |
|------|--------------------------------|--------------|--|
| 1 | pH | Adimensional | Depende de la cantidad de ácido y base utilizada se utilizaron valores de 4, 6, 8 y 10. |
| 2 | Distancia entre los electrodos | Cm | La distancia de los electrodos a utilizar depende de la configuración a utilizar que fue de 1 y 1,5. |

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel 365.

Tabla IV. **Variables dependientes para el proceso remoción de fluoruro por electrocoagulación**

| Núm. | Variable | Dimensional | Descripción |
|------|----------------------------|-------------|---|
| 1 | % Eficiencia | % | Depende del pH y la distancia de los electrodos en la celda de electrocoagulación |
| 2 | Cantidad de flúor extraído | M | Depende del pH y la distancia de los electrodos en la celda de electrocoagulación |

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel 365.

3.3. Delimitación del campo de estudio

La investigación es de carácter informativo-explicativo. La remoción del fluoruro se realizó por medio del método de utilizando electrodos de hierro y aluminio, modificando el pH con ácido sulfúrico, ácido clorhídrico e hidróxido de sodio a temperatura ambiente. Se utilizó una disposición monopolar con conexiones en serie vertical, a nivel laboratorio. Se evaluó del pH utilizando un potenciómetro y la remoción de fluoruro se cuantificará por medio del uso de un espectrofotómetro por el método SPADNS.

3.3.1. Obtención de los reactivos

Se obtuvieron de distribuidoras de productos químicos en Guatemala tales como: Distribuidora del Caribe S.A, Proquirsa S.A. y DILAB.

3.3.2. Análisis cuantitativo de fluoruro removido

La cuantificación del contenido de fluoruro se hizo mediante espectrofotometría que se realizó en el Laboratorio de EMPAGUA, Sección de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.3.3. Variables del proceso

A continuación, en los siguientes incisos se describen las variables del proceso.

3.3.3.1. Concentración del fluoruro en la solución

La concentración de flúor ya que es el componente que se quiere remover del efluente de agua se consideró como una variable de proceso. Para controlar la cantidad de fluoruro se hizo una solución con fluoruro de calcio con una molaridad conocida.

3.3.3.2. Volumen efectivo de la celda de electrocoagulación

El volumen efectivo es considerado una variable de proceso porque limitará la cantidad de solución utilizada para la cual se realizó una celda de

electrocoagulación de un volumen efectivo de 1L utilizando vidrio, debido a que es un material no conductor y fácil de obtener.

3.3.3.3. Tiempo de electrocoagulación

El tiempo de electrocoagulación se consideró una variable porque es necesario determinar el tiempo que la solución estará expuesta con la corriente eléctrica suministrada por medio de los electrodos. Estudios previos han utilizado un tiempo de 15 minutos. (Bazrafshan Ownagh, & Mahvi, 2012).

3.3.3.4. pH

Se utilizó ácido sulfúrico, ácido clorhídrico e hidróxido de sodio para regular el pH de la solución, se trabajó con valores de pH de 4, 6, 8 y 10.

3.4. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Br. Ciencias y Letras. Raúl Antonio Ruano Katz
- Asesora: Inga. Qca. Mercedes Esther Roquel Chávez

3.5. Recursos materiales disponibles (Equipo, cristalería, reactivos)

Se utilizó en la parte experimental del trabajo de investigación, diversas herramientas, las cuales se pueden clasificar en equipo y material de vidrio denominado cristalería:

Tabla V. **Reactivos**

| | |
|------------------|------------------------|
| Reactivos | Ácido sulfúrico |
| | Ácido clorhídrico |
| | Hidróxido de sodio |
| | Fluoruro de sodio |
| | Agua desmineralizada |

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel 365.

Tabla VI. **Cristalería, equipo y otros**

| | |
|--------------------|-----------------------------|
| Cristalería | Pipetas |
| | Balones aforados |
| | Beaker |
| | Varitas de agitación |
| | Probetas graduadas |
| Equipo | Vidrio de reloj |
| | Celda de electrocoagulación |
| | Transformador de voltaje |
| | Electrodos de aluminio |
| | Electrodos de hierro |
| Otros | Espectrofotómetro |
| | Lagartos |
| | Papel mayordomo |

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel 365.

3.6. **Técnica cuantitativa**

Para la determinación de flúor removido mediante el proceso de electrocoagulación, se utilizó una celda de electrocoagulación (10x10x12 cm) sobredimensionada para poder trabajar un volumen efectivo de 1 L. La disposición de la celda fue como se muestra en la (figura 2) con electrodos monopolares (10x10 cm) en conexión en serie (MP-S) en disposición vertical. (Ahangarnokolaei, Ganjidoust, & Ayati, 2017; Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017).

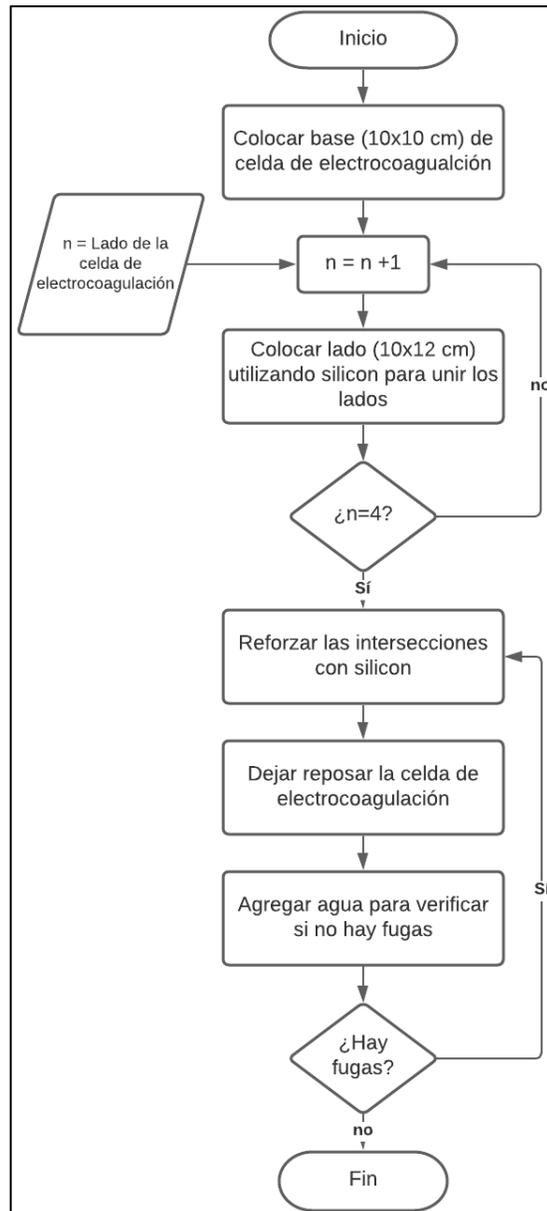
Se preparó una solución sintética madre con agua desmineralizada diluyendo fluoruro de calcio en un balón de 1000 mL a 2 M, la cual se diluirá hasta un volumen efectivo de 1L y obtener una molaridad de 0.4 en la solución que se utilizará en la electrocoagulación. (Kaleem, Asghar, Amira, Majid, Mahmood, & Samia, 2013; Nanseu-Njiki, Tchamango, Ngom, Darchen, & Ngameni, 2009).

Dentro de la celda de electrocoagulación, se utilizó dos tipos de electrodos de hierro y aluminio ya que son los electrodos que mayor eficiencia presentan durante el proceso (Emamjomeh & Sivakumar, 2009; Kaleem, Asghar, Amira, Majid, Mahmood, & Samia, 2013; Katrivesis, Karela, Papadakis, & Paraskeva, 2019; Nanseu-Njiki, Tchamango, Ngom, Darchen, & Ngameni, 2009). Se modificó el potencial de hidrógeno de la solución utilizando de ácido sulfúrico, ácido clorhídrico e hidróxido de sodio hasta obtener valor deseado (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017; Hu, Lo, & Kuan, 2003) y la distancia de separación de los electrodos dentro de la celda de electrocoagulación. (Hakizimana, Gourich, Chafi, Stiriba, Vial, Drogui, & Naja, 2017).

3.6.1. Procedimiento

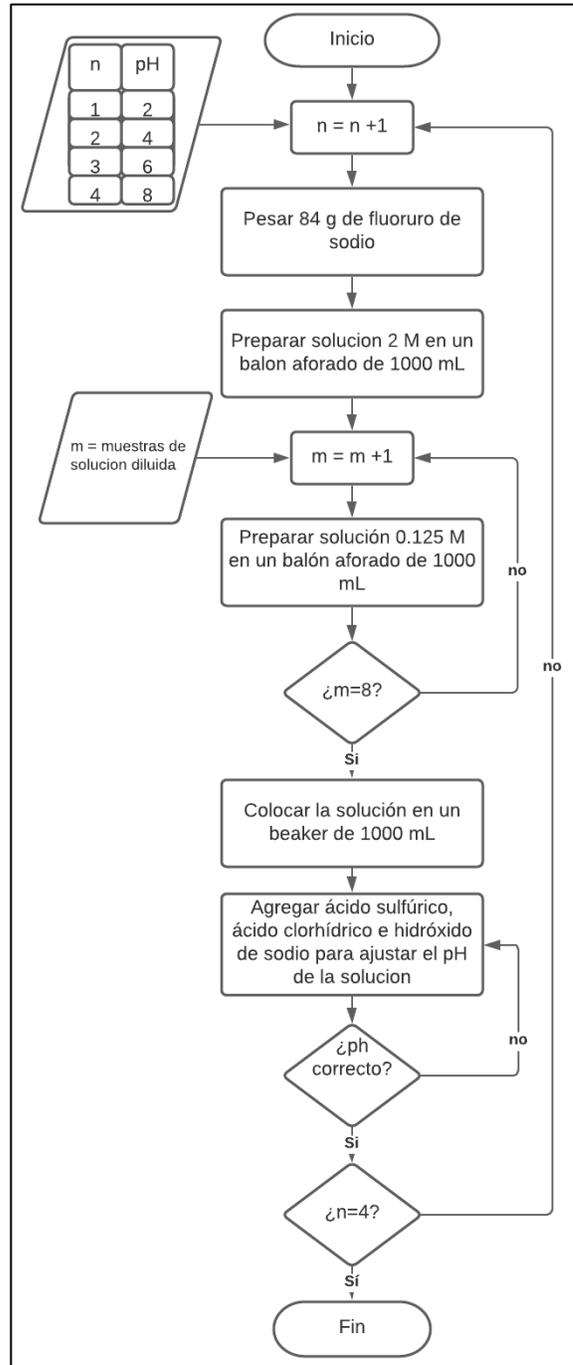
A continuación, se presentan los diagramas de flujo del proceso que se realizó para la remoción de fluoruro por medio del método de electrocoagulación y su cuantificación.

Figura 4. Diagrama de flujo de elaboración de celda de electrocoagulación



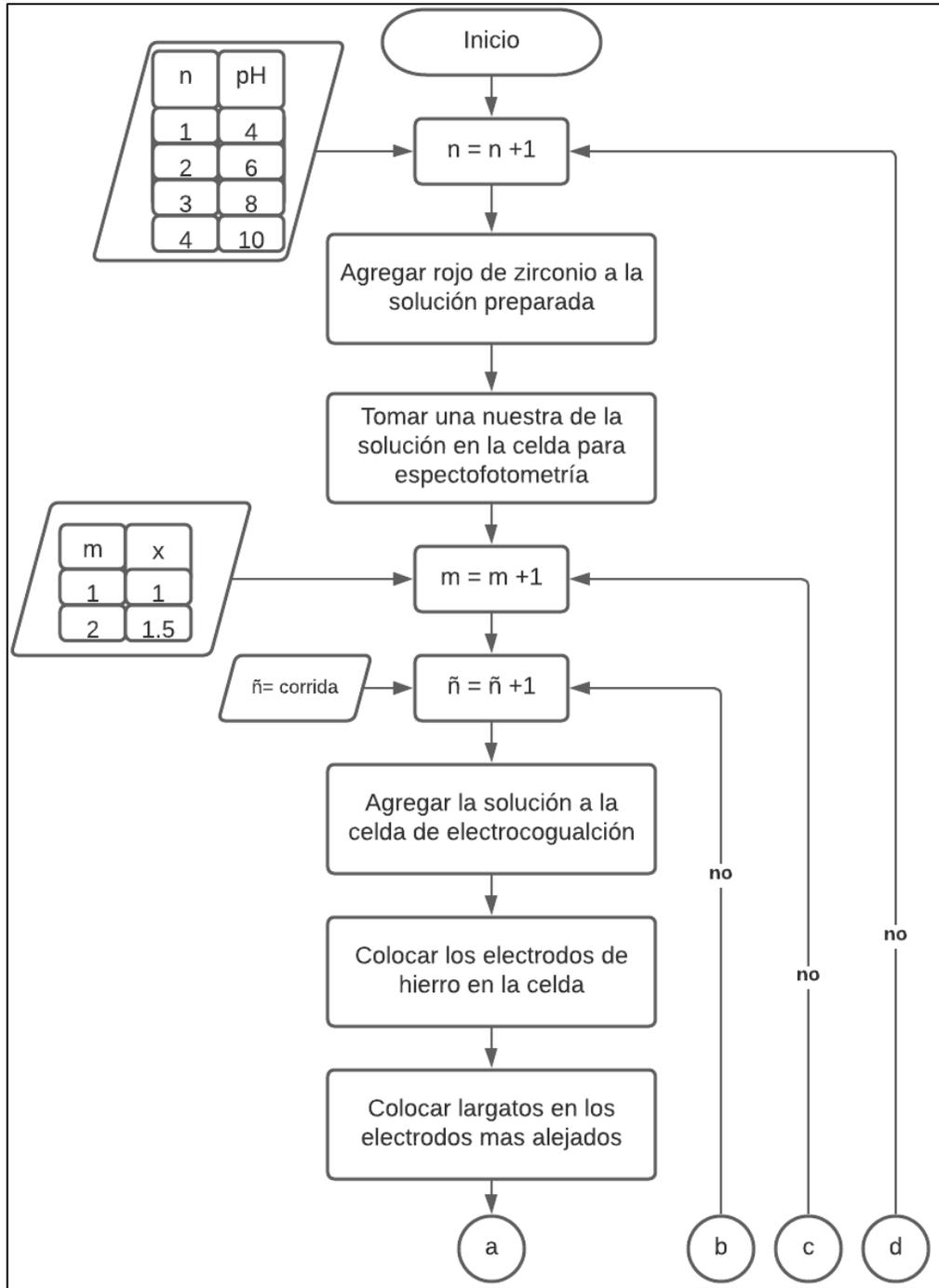
Fuente: elaboración propia, realizado con Visio 2019.

Figura 5. Diagrama de flujo preparación de soluciones

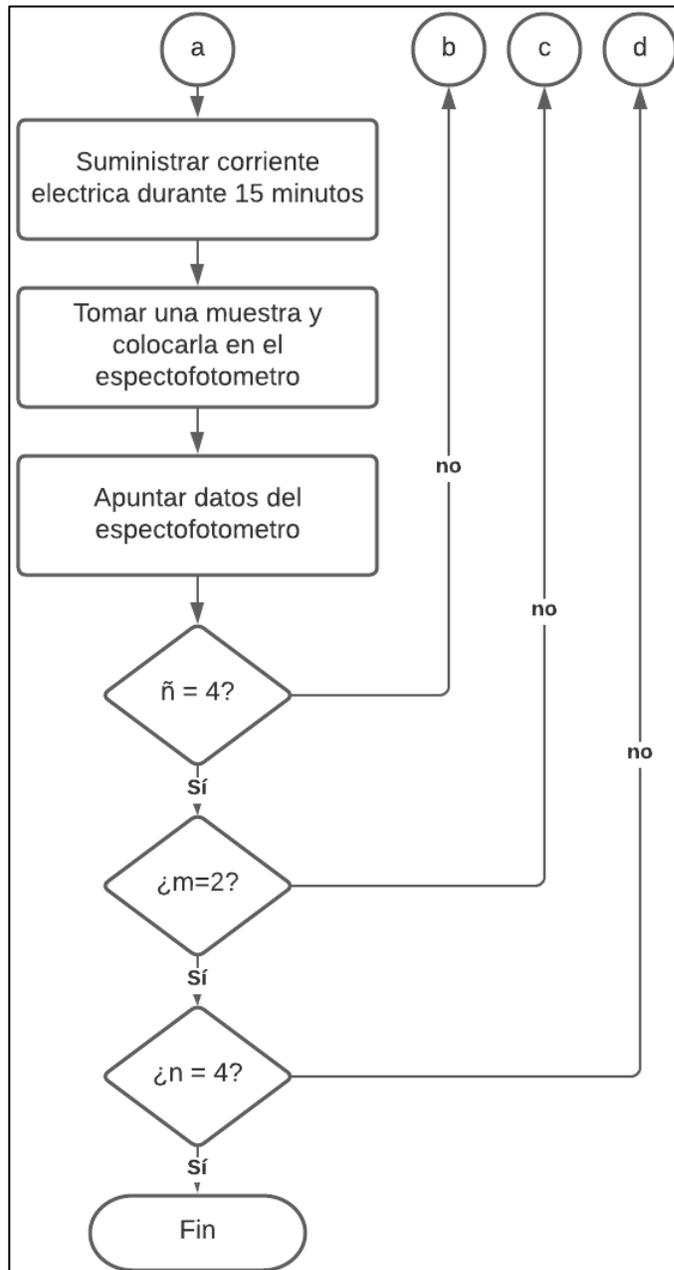


Fuente: elaboración propia, realizado con Visio 2019.

Figura 6. Diagrama de flujo proceso de electrocoagulación con electrodos de hierro

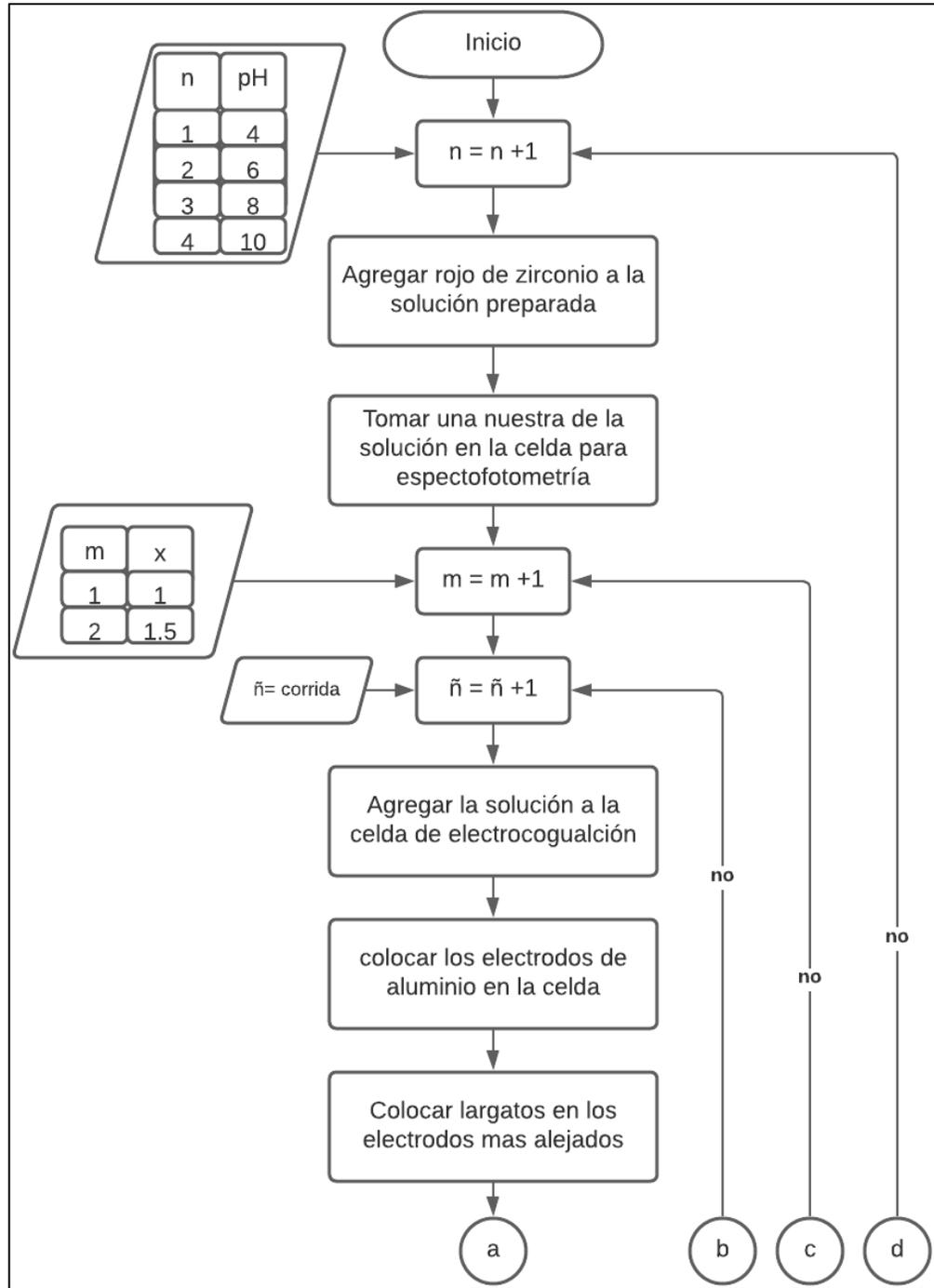


Continuación de la figura 6.

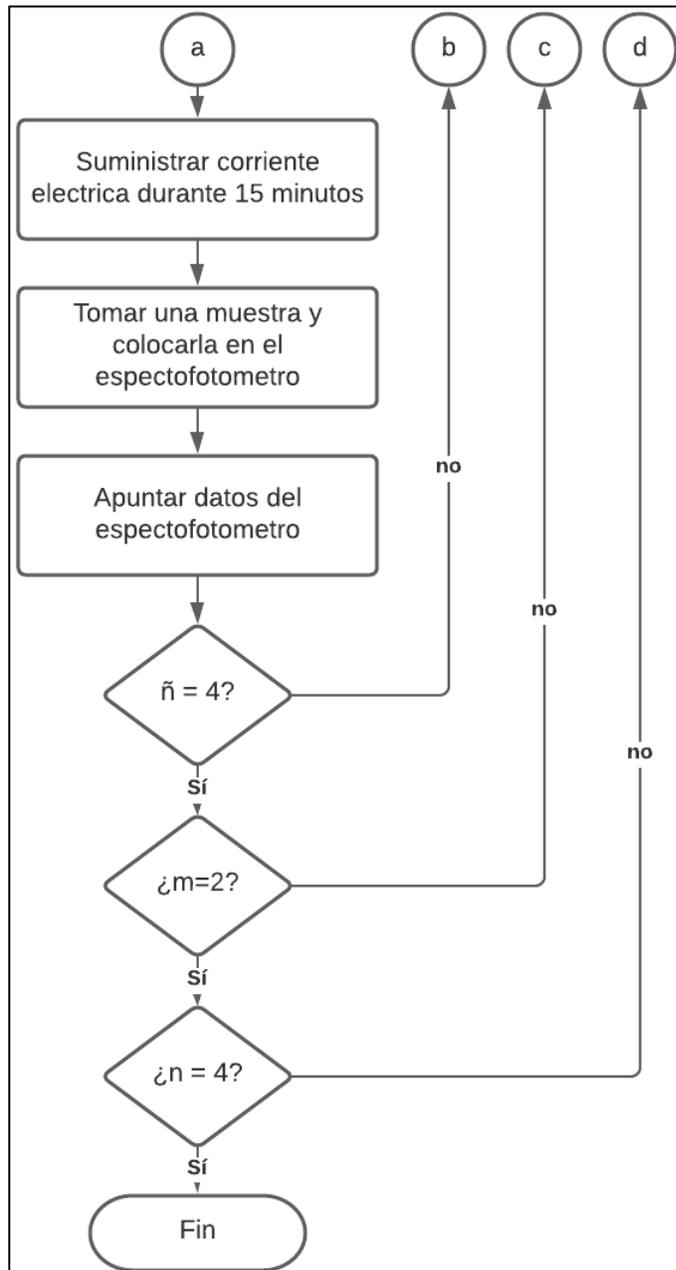


Fuente: elaboración propia, realizado con Visio 2019.

Figura 7. Diagrama de flujo proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio



Continuación de la figura 7.



Fuente: elaboración propia, realizado con Visio 2019.

3.7. Recolección y ordenamiento de la información de concentración de flúor por método SPADNS

La recolección y ordenamiento de la información se realizó de la siguiente manera, como se muestra en la tabla VII.

Tabla VII. **Concentración de flúor por el método SPADNS del electrodo de hierro**

| Distancia de los electrodos (cm) | pH utilizado | Flúor Inicial (M) | Flúor final (M) | | | |
|----------------------------------|--------------|-------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| | | | Corrida 1 | Corrida 2 | Corrida 3 | Corrida 3 |
| 1 | 4 | 1.02 | 0.21 | 0.20 | 0.18 | 0.18 |
| | | 1.00 | | | | |
| | | 0.99 | | | | |
| | 6 | 1.02 | 0.23 | 0.24 | 0.22 | 0.25 |
| | | 1.00 | | | | |
| | | 0.96 | | | | |
| | 8 | 1.03 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.28 |
| | | 0.99 | | | | |
| | | 1.02 | | | | |
| | 10 | 1.01 | 0.30 | 0.32 | 0.31 | 0.31 |
| | | 0.99 | | | | |
| | | 0.98 | | | | |
| 1.5 | 4 | 1.03 | 0.32 | 0.31 | 0.31 | 0.32 |
| | | 1.01 | | | | |
| | | 0.99 | | | | |
| | 6 | 0.99 | 0.35 | 0.34 | 0.35 | 0.36 |
| | | 0.98 | | | | |
| | | 0.97 | | | | |
| | 8 | 1.00 | 0.39 | 0.38 | 0.37 | 0.37 |
| | | 1.01 | | | | |
| | | 0.99 | | | | |
| | 10 | 1.02 | 0.40 | 0.42 | 0.41 | 0.43 |
| | | 1.00 | | | | |
| | | 0.97 | | | | |
| | | 0.96 | | | | |

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel 365.

Tabla VIII. **Concentración de flúor por el método SPADNS del electrodo de aluminio**

| Distancia de los electrodos (cm) | pH utilizado | Flúor Inicial (M) | Flúor final (M) | | | |
|----------------------------------|--------------|-------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| | | | Corrida 1 | Corrida 2 | Corrida 3 | Corrida 3 |
| 1 | 4 | 1.01 | 0.28 | 0.25 | 0.24 | 0.24 |
| | | 0.96 | | | | |
| | | 0.98 | | | | |
| | 6 | 0.90 | 0.28 | 0.27 | 0.29 | 0.30 |
| | | 1.00 | | | | |
| | | 0.99 | | | | |
| | 8 | 0.98 | 0.32 | 0.31 | 0.33 | 0.31 |
| | | 1.01 | | | | |
| | | 1.00 | | | | |
| | 10 | 1.00 | 0.35 | 0.34 | 0.33 | 0.34 |
| | | 1.02 | | | | |
| | | 1.01 | | | | |
| 1.5 | 4 | 1.02 | 0.35 | 0.34 | 0.33 | 0.36 |
| | | 0.98 | | | | |
| | | 0.99 | | | | |
| | 6 | 1.00 | 0.37 | 0.40 | 0.39 | 0.41 |
| | | 1.01 | | | | |
| | | 1.00 | | | | |
| | 8 | 0.97 | 0.42 | 0.43 | 0.45 | 0.42 |
| | | 1.03 | | | | |
| | | 1.01 | | | | |
| | 10 | 1.00 | 0.46 | 0.45 | 0.47 | 0.46 |
| | | 1.02 | | | | |
| | | 0.99 | | | | |
| | | 1.00 | | | | |

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel 365.

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información de concentración de flúor obtenido del experimento

La recolección y ordenamiento de la información se realizó de la siguiente manera, como se muestra en la tabla IX.

Tabla IX. **Concentración de flúor utilizando electrodos de hierro**

| Distancia de los electrodos (cm) | pH utilizado | Flúor Inicial (M) | Flúor Final Promedio (M) | Media | Desviación estándar |
|----------------------------------|--------------|-------------------|--------------------------|--------|---------------------|
| 1 | 4 | 1.02 | 0.21 | 0.1925 | 0.0150 |
| | | 1.00 | 0.20 | | |
| | | 0.99 | 0.18 | | |
| | 6 | 1.02 | 0.18 | 0.2350 | 0,0129 |
| | | 1.00 | 0.23 | | |
| | | 0.96 | 0.24 | | |
| | | 1.03 | 0.22 | | |
| | 8 | 0.99 | 0.25 | 0.2725 | 0,0096 |
| | | 1.02 | 0.26 | | |
| | | 1.00 | 0.27 | | |
| | 10 | 0.98 | 0.28 | 0.3100 | 0,0082 |
| | | 1.01 | 0.28 | | |
| 0.99 | | 0.30 | | | |
| 0.98 | | 0.32 | | | |
| 1.5 | 4 | 1.03 | 0.31 | 0.3150 | 0,0058 |
| | | 1.01 | 0.31 | | |
| | | 0.99 | 0.32 | | |
| | | 0.98 | 0.32 | | |
| | 6 | 0.99 | 0.32 | 0.3500 | 0,0082 |
| | | 0.98 | 0.35 | | |
| | | 0.97 | 0.34 | | |
| | 8 | 1.00 | 0.35 | 0.3775 | 0,0096 |
| | | 1.01 | 0.36 | | |
| | | 0.99 | 0.39 | | |
| | | 1.02 | 0.38 | | |
| | 10 | 1.00 | 0.37 | 0.4150 | 0,0129 |
| 1.01 | | 0.37 | | | |
| 1.00 | | 0.40 | | | |
| 1.02 | | 0.42 | | | |
| | | 0.97 | 0.41 | | |
| | | 0.96 | 0.43 | | |

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel 365.

Tabla X. **Concentración de flúor utilizando electrodos de aluminio**

| Distancia de los electrodos (cm) | pH utilizado | Flúor Inicial (M) | Flúor Final Promedio (M) | Media | Desviación estándar |
|----------------------------------|--------------|-------------------|--------------------------|--------|---------------------|
| 1 | 4 | 1.01 | 0,28 | 0,2525 | 0,0189 |
| | | 0.96 | 0,25 | | |
| | | 0.98 | 0,24 | | |
| | | 0.90 | 0,24 | | |
| | 6 | 1.00 | 0,28 | 0,2850 | 0,0129 |
| | | 0.99 | 0,27 | | |
| | | 0.98 | 0,29 | | |
| | 8 | 1.01 | 0,30 | 0,3175 | 0,0096 |
| | | 1.00 | 0,32 | | |
| | | 0.99 | 0,31 | | |
| | | 1.00 | 0,33 | | |
| | 10 | 1.02 | 0,31 | 0,3400 | 0,0082 |
| 1.01 | | 0,35 | | | |
| 1.02 | | 0,34 | | | |
| 0.99 | | 0,33 | | | |
| 1.5 | 4 | 1.00 | 0,34 | 0,3450 | 0,0129 |
| | | 1.02 | 0,35 | | |
| | | 0.98 | 0,34 | | |
| | | 0.99 | 0,33 | | |
| | 6 | 1.00 | 0,36 | 0,3925 | 0,0171 |
| | | 1.01 | 0,37 | | |
| | | 1.00 | 0,40 | | |
| | | 0.97 | 0,39 | | |
| | 8 | 1.03 | 0,41 | 0,4300 | 0,0141 |
| | | 1.01 | 0,42 | | |
| | | 1.00 | 0,43 | | |
| | | 1.02 | 0,45 | | |
| 10 | 0.99 | 0,42 | 0,4600 | 0,0082 | |
| | 1.00 | 0,46 | | | |
| | 0.98 | 0,45 | | | |
| | 1.02 | 0,47 | | | |
| | | 1.01 | 0,46 | | |

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel 365.

Tabla XI. **Porcentaje de remoción de flúor con electrodos de hierro**

| Distancia de los electrodos (cm) | pH | Porcentaje de remoción flúor (%) | Media (%) | Desviación estándar |
|----------------------------------|-------|----------------------------------|-----------|---------------------|
| 1 | 4 | 79.41 | 80.90 | 1.4117 |
| | | 80.00 | | |
| | | 81.82 | | |
| | | 82.35 | | |
| | 6 | 77.00 | 76.35 | 1.8313 |
| | | 75.00 | | |
| | | 78.64 | | |
| | | 74.75 | | |
| | 8 | 74.51 | 72.80 | 1.3061 |
| | | 73.00 | | |
| | | 71.43 | | |
| | | 72.28 | | |
| 10 | 69.70 | 69.06 | 1.1707 | |
| | 67.35 | | | |
| | 69.90 | | | |
| | 69.31 | | | |
| 1.5 | 4 | 67.68 | 67.94 | 0.3324 |
| | | 68.37 | | |
| | | 68.04 | | |
| | | 67.68 | | |
| | 6 | 64.29 | 64.65 | 0.3788 |
| | | 64.95 | | |
| | | 65.00 | | |
| | | 64.36 | | |
| | 8 | 60.61 | 62.43 | 1.2420 |
| | | 62.75 | | |
| | | 63.00 | | |
| | | 63.37 | | |
| 10 | 60.00 | 57.94 | 2.0436 | |
| | 58.82 | | | |
| | 57.73 | | | |
| | 55.21 | | | |

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel 365.

Tabla XII. **Porcentaje de remoción de flúor con electrodos de aluminio**

| Distancia de los electrodos (cm) | pH | Porcentaje de remoción flúor (%) | Media (%) | Desviación estándar |
|----------------------------------|----|----------------------------------|-----------|---------------------|
| 1 | 4 | 72,28 | 73,77 | 1,3519 |
| | | 73,96 | | |
| | | 75,51 | | |
| | | 73,33 | | |
| | 6 | 72,00 | 71,36 | 1,1993 |
| | | 72,73 | | |
| | | 70,41 | | |
| | | 70,30 | | |
| | 8 | 68,00 | 68,32 | 1,1012 |
| | | 68,69 | | |
| | | 67,00 | | |
| | | 69,61 | | |
| | 10 | 65,35 | 66,17 | 0,6325 |
| | | 66,67 | | |
| | | 66,67 | | |
| | | 66,00 | | |
| 1.5 | 4 | 65,69 | 65,41 | 1,1037 |
| | | 65,31 | | |
| | | 66,67 | | |
| | | 64,00 | | |
| | 6 | 63,37 | 60,84 | 1,6931 |
| | | 60,00 | | |
| | | 59,79 | | |
| | | 60,19 | | |
| | 8 | 58,42 | 57,22 | 1,0637 |
| | | 57,00 | | |
| | | 55,88 | | |
| | | 57,58 | | |
| | 10 | 54,00 | 54,11 | 0,2364 |
| | | 54,08 | | |
| | | 53,92 | | |
| | | 54,46 | | |

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel 365.

3.9. Diseño experimental y análisis estadístico utilizado para calculo de resultados

Se realizó en diseño de experimento para poder determinar las repeticiones a realizar y se analizó la infomacion correspondiente.

3.9.1. Diseño Experimental

Se realizó 4 repeticiones por solución de flúor por electrodo utilizado, mediante la modificación del potencial de hidrógeno y la distancia de entre los electrodos dentro de la celda de electrocoagulación. Teniendo un total de 64 muestras experimentales; las cuales serán analizadas estadísticamente.

3.9.2. Cálculo de valores medio de cada corrida

Promedio del conjunto de valores obtenidos de cada corrida según la cantidad de valores analizados.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

\bar{X} = *valor promedio*

X_i = *valor i*

n = *número de datos*

3.9.3. Cálculo de desviación estándar

Variación o dispersión en la que los puntos de datos individuales difieren de la media obtenidos de cada corrida según la cantidad de valores analizados.

$$S = \frac{\sqrt{\sum_0^n (X_i - \bar{X})^2}}{n-1} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

S = *desviación Estandar*

\bar{X} = *valor promedio*

X_i = *valor i*

n = *número de datos*

3.9.4. Análisis de varianza

Se hizo un ANDEVA evaluando los datos obtenidos durante el experimento para poder comprobar el efecto del potencial de hidrógeno y la distancia entre electrodos en la eliminación de fluoruro utilizando el proceso de electrocoagulación.

3.10. Plan de análisis de los resultados

Plan de procesamiento y análisis de los resultados acorde con los objetivos general y específico.

3.10.1. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

Metodos cuantitativos utilizados para determinar las variables de salida de el método de electrocoagulación.

3.10.1.1. Cálculo del porcentaje de remoción (%) de flúor de la solución

Porcentaje de remoción de fluor con relación a la concentración final e inicial de la corrida realizada.

$$\%_{\text{REMOCIÓN}} = \frac{\text{Fluor inicial (M)} - \text{Fluor final (g)}}{\text{Fluor inicial (M)}} * 100\% \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$\%_{\text{REMOCIÓN}}$ = porcentaje de remoción de flúor de la solución (M)

Flúor inicial = concentración de flúor inicial de la solución (M)

Flúor final = concentración de flúor final de la solución (M)

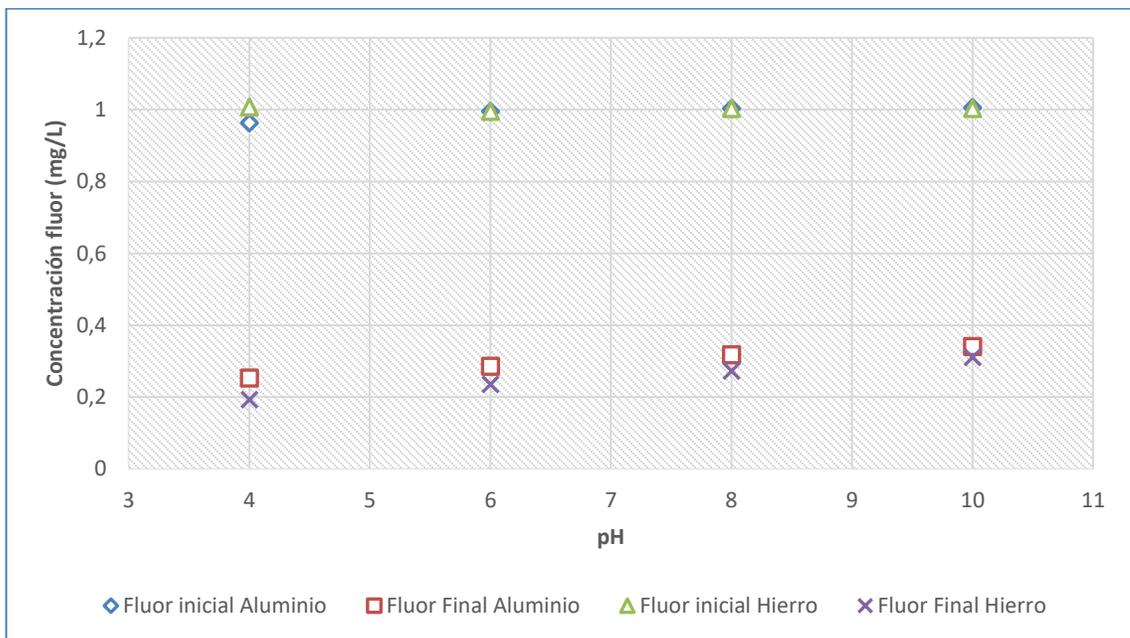
3.10.2. Programas a utilizar para análisis de datos

Excel herramienta de análisis de datos.

4. RESULTADOS

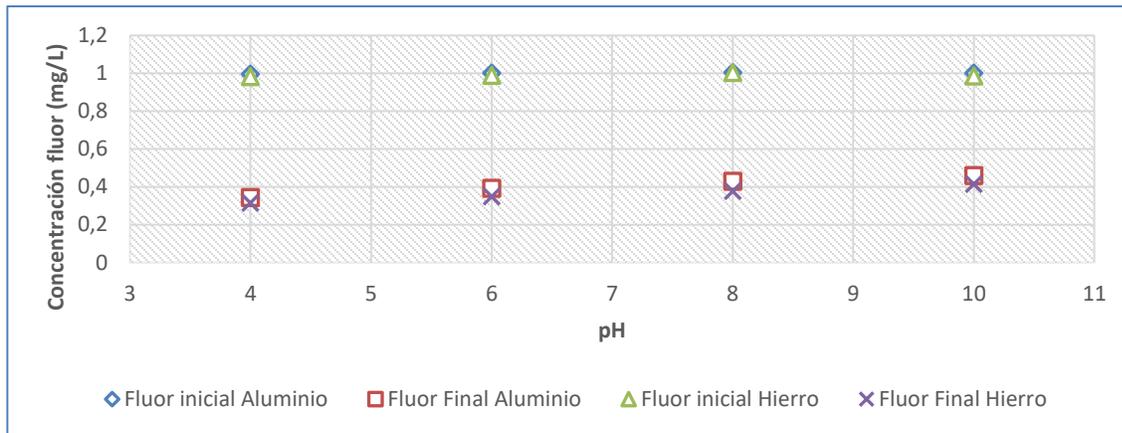
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la remoción de flúor a partir de la aplicación del método de electrocoagulación.

Figura 8. **Concentración flúor final con una distancia de electrodos de 1 cm**



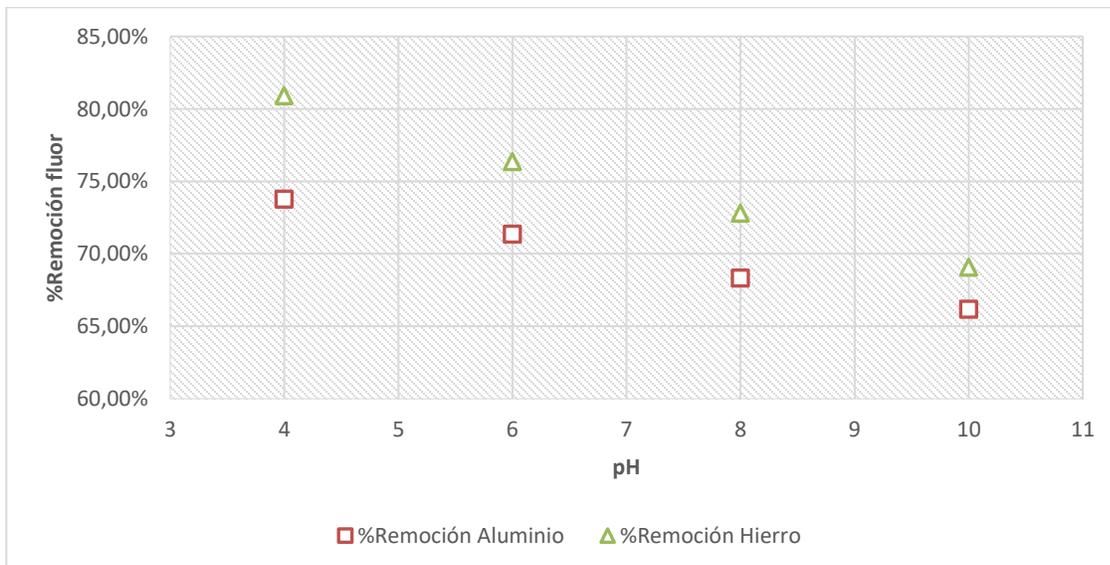
Fuente: elaboración propia, con datos de las tablas IX y X, realizado con Excel 365.

Figura 9. **Concentración flúor final con una distancia de electrodos de 1.5 cm**



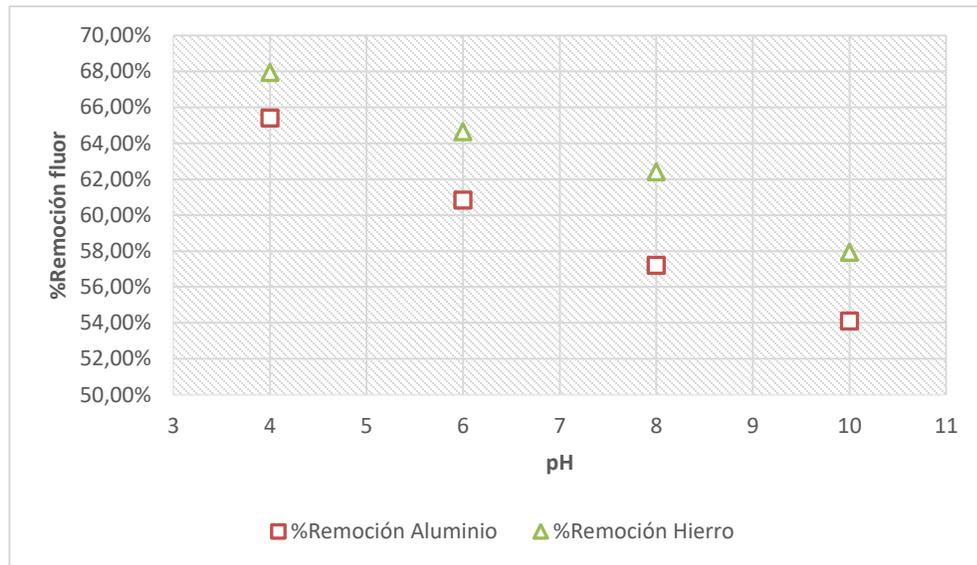
Fuente: elaboracion propia, realizado con Excel 365. Con base en datos de las tablas IX y X.

Figura 10. **Cantidad de flúor removido con una distancia de 1 cm entre electrodos**



Fuente: elaboracion propia, con datos de las tablas IX y X, realizado con Excel 365.

Figura 11. **Cantidad de flúor removido con una distancia de 1.5 cm entre electrodos**



Fuente: elaboración propia, con datos de las tablas IX y X, realizado con Excel 365.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El estudio realizado se llevó a cabo para determinar la eficiencia y las condiciones de pH y distancia de electrodos a las cuales la remoción del flúor presente en el agua es mayor, utilizando electrodos de hierro y aluminio.

Se realizaron los análisis en muestras de agua sintéticas con flúor, para determinar la concentración de flúor inicial en la solución, luego se introdujeron las muestras en la celda de electrocoagulación utilizando diferentes pH siendo estos 4, 6, 8 y 10, y modificando la distancia entre los electrodos de 1 cm y 1.5 cm. Para el cálculo de eficiencia de los electrodos de hierro y aluminio se tuvo en cuenta el tiempo de residencia de 15 min y el voltaje 10 V, con 4 repeticiones para cada tratamiento, para evaluar la remoción de flúor, teniendo 64 tratamientos para evaluar el efecto de la variación del pH y distancia entre los electrodos dentro de las celdas de electrocoagulación.

Utilizando el método SPANDS, se determinó la concentración de flúor al final del tratamiento de electrocoagulación. La remoción del flúor, de acuerdo con el ANDEVA, se observó que la remoción del flúor cambio al variar el pH de una manera inversamente proporcional. El valor de pH optimo, como se observa en la figura 10 y 11, fue 4 teniendo un mayor porcentaje remoción que a un pH mayor, obteniendo un porcentaje de remoción de flúor de 80.9 %, si se utilizan electrodos de hierro y 77.3 %, si se utilizan electrodos de aluminio.

Posteriormente se evaluó el efecto de remoción de flúor modificando la distancia entre electrodos para cada tratamiento, en donde el mayor porcentaje de remoción de flúor se da con una menor distancia entre electrodos. La distancia

entre electrodos óptima para cada tratamiento es de 1 cm, obteniendo un porcentaje de remoción, utilizando con un valor de pH 4 y una distancia de 1.5 cm y 1 cm, 80.9 % y 68 % utilizando electrodos de hierro 77.3 % y 65 % utilizando electrodos de aluminio.

Se analizaron los datos obtenidos en los tratamientos, cambiando valor de pH de la solución y la distancia entre los electrodos en la solución sintética preparada tiene un efecto significativo desde el punto de vista estadístico, con un nivel de confianza del 95 %, por medio del análisis de varianza de dos factores, tal y como se observa en las figuras 8, 9, 10 y 11.

Por medio del método de electrocoagulación se determinó que, al realizar una electrocoagulación para remover flúor, utilizar electrodos hierro aumenta la efectividad del método, si se compara con el uso de electrodos de aluminio debido a se obtuvo que la eficiencia máxima con un tiempo de residencia de 15 min con un voltaje de 10 V y a una distancia entre los electrodos de 1 cm obteniendo un porcentaje de 80.9 %.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvo que la eficiencia de los electrodos de hierro fue mayor que la de los electrodos de aluminio, variando los parámetros de pH y distancia entre los electrodos por medio del análisis de varianza entre dos grupos en donde las variaciones de ambos parámetros afectan en el valor de remoción obtenida, pero cuando los dos parámetros ejercen simultáneamente no tiene variación.
2. La eficiencia en la remoción de flúor es inversamente proporcional al valor de pH, teniendo un mayor porcentaje de remoción con un valor de pH 4 de 80.9 % si se utilizan electrodos de hierro y 77.3 % si se utilizan electrodos de aluminio.
3. La eficiencia en la remoción de flúor es inversamente proporcional a la distancia entre los electrodos, teniendo una mayor eficiencia cuando la distancia entre los electrodos es de 1 cm de 80.9 % y 68 % utilizando electrodos de hierro 77.3 % y 65 % utilizando electrodos de aluminio.

RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios a nivel industrial sobre el tratamiento de aguas residuales utilizando el método de electrocoagulación.
2. Utilizar la combinación de los electrodos de hierro y aluminio, para observar la variación utilizando cátodos y ánodos de diferente material.
3. Investigar sobre el efecto de la temperatura pueda afectar al proceso de electrocoagulación.

REFERENCIAS

1. Ahangarnokolaei, M., Ganjidoust, H. y Ayati, B. (junio, 2017). Optimization of parameters of electrocoagulation/flotation process for removal of Acid Red 14 with mesh stainless steel electrodes. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(2), 278–292. doi: <https://doi.org/10.2166/wrd.2017.091>.
2. Alarcón-Herrera, M., Bundschuh, J., Nath, B., Nicolli, H., Gutierrez, M., Reyes-Gomez, V., Nuñez, D., Martín-Dominguez, I. y Sracek, O. (noviembre, 2013). Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 262, 960–969. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.005>.
3. Arroyo, M., Pérez-Herranz, V., Montañés, M., García-Antón, J. y Guiñón, J. (septiembre, 2009). Effect of pH and chloride concentration on the removal of hexavalent chromium in a batch electrocoagulation reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1), 1127–1133. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.089>.
4. Bazrafshan, E., Ownagh, K. y Mahvi, A. (febrero, 2012). Application of Electrocoagulation Process Using Iron and Aluminum Electrodes for Fluoride Removal from Aqueous Environment. *E-Journal of Chemistry*, 9, 102629. doi: <https://doi.org/10.1155/2012/102629>.

5. Drouiche, N., Aoudj, S., Lounici, H., Drouiche, M., Ouslimane, T. y Ghaffour, N. (marzo, 2012). Fluoride Removal from pretreated Photovoltaic Wastewater by Electrocoagulation: An Investigation of The Effect of Operational Parameters. *Procedia Engineering*, 33, 385–391. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1218>.
6. Hakizimana, J., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P. y Naja, J. (febrero, 2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404, 1–21. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>.
7. Hu, C., Lo, S. y Kuan, W. (noviembre, 2003). Effects of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminum electrodes. *Water Research*, 37(18), 4513–4523. doi: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00378-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00378-6)
8. Kaleem, K., Asghar, J., Amira, H., Majid, M., Mahmood, Z. y Samia, H. (mayo, 2013). Efficiency of Aluminum and Iron Electrodes for the Removal of Heavy Metals [(Ni (II), Pb (II), Cd (II)] by Electrocoagulation Method. *Journal of the Korean Chemical Society*, 57(3), 316–321. doi: <https://doi.org/10.5012/JKCS.2013.57.3.316>
9. Katrivesis, F., Karela, A., Papadakis, V. y Paraskeva, C. (febrero, 2019). Revisiting of coagulation-flocculation processes in the production of potable water. *Journal of Water Process Engineering*, 27, 193–204. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.12.007>

10. Liu, S., Ye, X., He, K., Chen, Y. y Hu, Y. (marzo, 2017). Simultaneous removal of Ni(II) and fluoride from a real flue gas desulfurization wastewater by electrocoagulation using Fe/C/Al electrode. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 7(3), 288–297. doi: <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.010>
11. Meenakshi. y Maheshwari, R. (septiembre, 2006). Fluoride in drinking water and its removal. *Journal of Hazardous Materials*, 137(1), 456–463. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.024>
12. Muralikrishna, I. y Manickam, V. (agosto, 2017). *Chapter Eighteen - Analytical Methods for Monitoring Environmental Pollution* (I. V Muralikrishna & V. B. T.-E. M. Manickam (eds.); pp. 495–570). Butterworth-Heinemann. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00018-X>
13. Nanseu-Njiki, C., Tchamango, S., Ngom, P., Darchen, A. y Ngameni, E. (septiembre, 2009). Mercury(II) removal from water by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2), 1430–1436. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.042>
14. Zhao, H., Zhao, B., Yang, W. y Li, T. (octubre, 2010). Effects of Ca²⁺ and Mg²⁺ on Defluoridation in the Electrocoagulation Process. *Environmental Science & Technology*, 44(23), 9112–9116. doi: <https://doi.org/10.1021/es102540t>

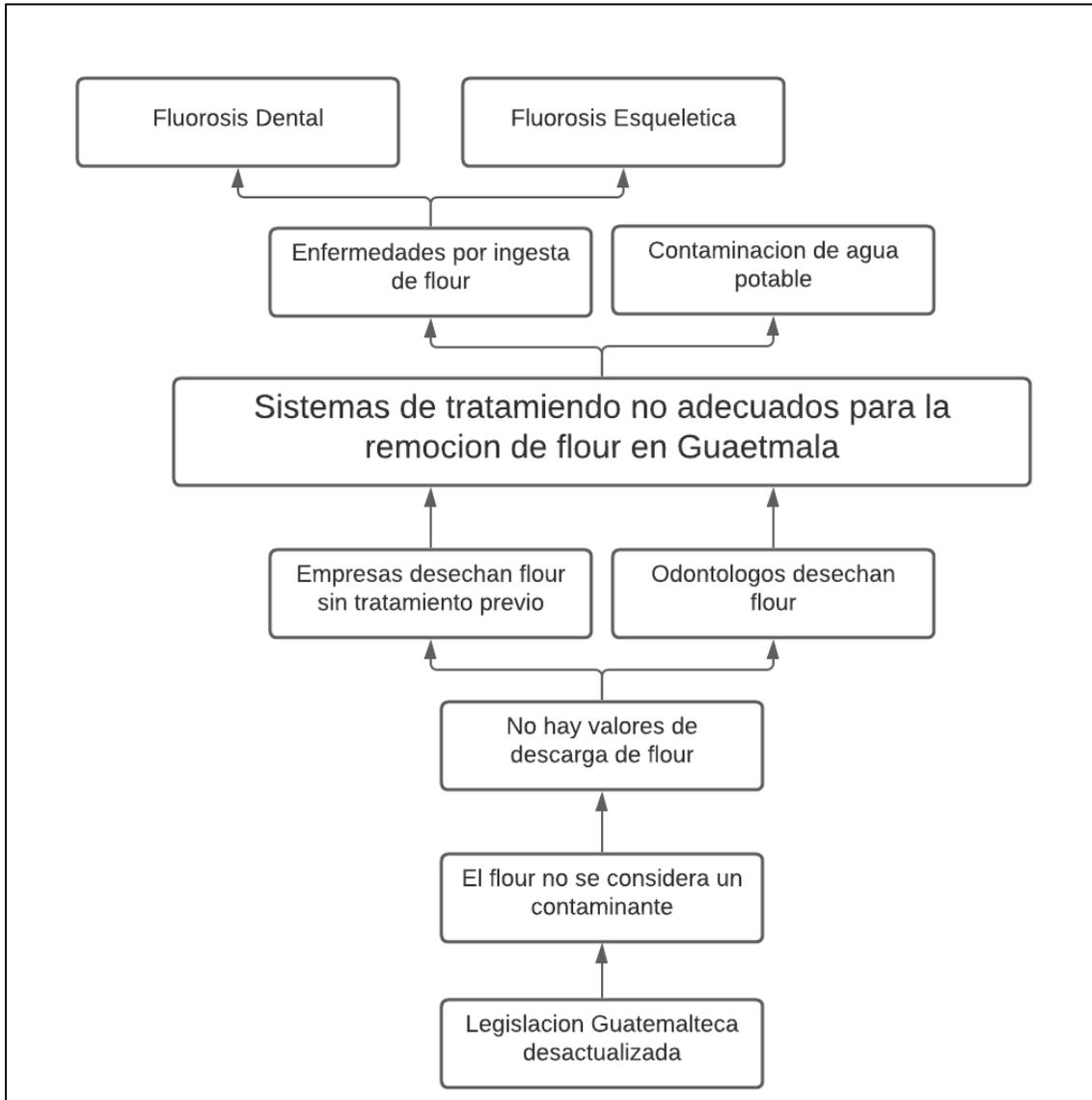
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

| Carrera | Área | Curso | Tema |
|-----------------------|------------------------|--------------------------------|--|
| ingeniería Química | Área de química | Química 3 | Nomenclatura y estequiometría |
| | | Química 4 | Electrolisis |
| | | Análisis cualitativo | Soluciones y equilibrio ácido base |
| | | Calidad del agua | Límites máximos permisibles de contaminantes en el agua, Métodos de tratamiento de aguas |
| | Área de físico química | Laboratorio de Fisicoquímica 2 | Uso del espectrofotómetro |
| | Ciencias básicas | Estadística 2 | Pruebas de hipótesis y análisis de varianza |
| | | Física 2 | Ley de ohm y corriente eléctrica |

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel 365.

Apéndice 2. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel 365.

Apéndice 3. **ANDEVA eficiencia de remoción de flúor de electrodos de aluminio respecto al pH y distancia entre electrodos**

| RESUMEN | 4 | 6 | 8 | 10 | Total |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <i>1</i> | | | | | |
| Cuenta | 4 | 4 | 4 | 4 | 16 |
| Suma | 2,950790985 | 2,854324657 | 2,732947118 | 2,64679868 | 11,18486144 |
| Promedio | 0,737697746 | 0,713581164 | 0,68323678 | 0,66169967 | 0,69905384 |
| Varianza | 0,000182761 | 0,000143831 | 0,000121263 | 4,00117E-05 | 0,000990882 |

| | | | | | |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <i>1,5</i> | | | | | |
| Cuenta | 4 | 4 | 4 | 4 | 16 |
| Suma | 2,616590636 | 2,433543258 | 2,288739521 | 2,164586468 | 9,503459884 |
| Promedio | 0,654147659 | 0,608385815 | 0,57218488 | 0,541146617 | 0,593966243 |
| Varianza | 0,000121811 | 0,000286652 | 0,000113143 | 5,58856E-06 | 0,00199719 |

| <i>Total</i> | | | | | |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| Cuenta | 8 | 8 | 8 | 8 | |
| Suma | 5,567381621 | 5,287867915 | 5,021686639 | 4,811385148 | |
| Promedio | 0,695922703 | 0,660983489 | 0,62771083 | 0,601423144 | |
| Varianza | 0,002124993 | 0,003346224 | 0,003624038 | 0,00417184 | |

ANÁLISIS DE VARIANZA

| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>Valor crítico para F</i> |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------|---------------------|-----------------------------|
| Muestra | 0,088347225 | 1 | 0,088347225 | 696,2910847 | 3,06574E-19 | 4,259677273 |
| Columnas | 0,040298644 | 3 | 0,013432881 | 105,8685832 | 5,63538E-14 | 3,00878657 |
| Interacción | 0,001477258 | 3 | 0,000492419 | 3,88090596 | 0,02149482 | 3,00878657 |
| Dentro del grupo | 0,003045182 | 24 | 0,000126883 | | | |
| Total | 0,13316831 | 31 | | | | |

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 3, realizado con Excel 365.

Apéndice 4. **ANDEVA eficiencia de remoción de flúor de electrodos de hierro respecto al pH y distancia entre electrodos**

| RESUMEN | 4 | 6 | 8 | 10 | Total |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <i>1</i> | | | | | |
| Cuenta | 4 | 4 | 4 | 4 | 16 |
| Suma | 3,235828877 | 3,053882514 | 2,912156031 | 2,762537518 | 11,96440494 |
| Promedio | 0,808957219 | 0,763470629 | 0,728039008 | 0,690634379 | 0,747775309 |
| Varianza | 0,000199296 | 0,000335357 | 0,000170583 | 0,000137058 | 0,002206906 |
| <i>1,5</i> | | | | | |
| Cuenta | 4 | 4 | 4 | 4 | 16 |
| Suma | 2,717621194 | 2,585906035 | 2,497174953 | 2,317638215 | 10,1183404 |
| Promedio | 0,679405299 | 0,646476509 | 0,624293738 | 0,579409554 | 0,632396275 |
| Varianza | 1,10485E-05 | 1,43479E-05 | 0,000154256 | 0,00041765 | 0,001527819 |
| <i>Total</i> | | | | | |
| Cuenta | 8 | 8 | 8 | 8 | |
| Suma | 5,953450071 | 5,63978855 | 5,409330984 | 5,080175733 | |
| Promedio | 0,744181259 | 0,704973569 | 0,676166373 | 0,635021967 | |
| Varianza | 0,00488549 | 0,004060623 | 0,003214382 | 0,003772293 | |

ANÁLISIS DE VARIANZA

| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>Valor crítico para F</i> |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------|---------------------|-----------------------------|
| Muestra | 0,106498572 | 1 | 0,106498572 | 591,8251154 | 2,01519E-18 | 4,259677273 |
| Columnas | 0,050989924 | 3 | 0,016996641 | 94,45233954 | 1,99445E-13 | 3,00878657 |
| Interacción | 0,000712162 | 3 | 0,000237387 | 1,319189924 | 0,291267494 | 3,00878657 |
| Dentro del grupo | 0,004318785 | 24 | 0,000179949 | | | |
| Total | 0,162519444 | 31 | | | | |

Fuente: elaboración propia, con datos del apéndice 3, realizado con Excel 365.

Apéndice 5. Celda de electrocoagulación con electrodos de hierro



Fuente: [Fotografía de Raúl Ruano]. (Laboratorio de Microbiología Sanitaria, CII. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Apéndice 6. Celda de electrocoagulación con electrodos de aluminio



Fuente: [Fotografía de Raúl Ruano]. (Laboratorio de Microbiología Sanitaria, CII. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Apéndice 7. **Potenciómetro**



Fuente: [Fotografía de Raúl Ruano]. (Laboratorio de Microbiología Sanitaria, CII. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Apéndice 8. **Sedimentación de flúor después del proceso de electrocoagulación con electrodos de aluminio**



Fuente: [Fotografía de Raúl Ruano]. (Laboratorio de Microbiología Sanitaria, CII. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Apéndice 9. **Sedimentación del flúor después del proceso de electrocoagulación con electrodos de hierro**



Fuente: [Fotografía de Raúl Ruano]. (Laboratorio de Microbiología Sanitaria, CII. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Apéndice 10. **Muestra del agua obtenida del proceso de electrocoagulación**



Fuente: [Fotografía de Raúl Ruano]. (Laboratorio de Microbiología Sanitaria, CII. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Apéndice 11. Espectrofotómetro



Fuente: [Fotografía de Raúl Ruano]. (Laboratorio de Microbiología Sanitaria, CII. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Apéndice 12. Concentración obtenida con el espectrofotómetro



Fuente: [Fotografía de Raúl Ruano]. (Laboratorio de Microbiología Sanitaria, CII. 2021).
Colección particular. Guatemala.