



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA AMBIENTAL**

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE CROMO MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN PARA CURTIEMBRES, TRUJILLO - 2022”

Tesis para optar al título profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Autora:

Milagros Nyraida Valle Alfaro

Asesora:

M.Sc. Marieta Eliana Cervantes Peralta

<https://orcid.org/0000-0001-9405-7048>

Trujillo - Perú

2022

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	FERNANDO ENRIQUE UGAZ ODAR	18098186
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	LUIS ENRIQUE ALVA DIAZ	43679478
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	LIANA YSABEL CARDENAS GUTIERREZ	40221041
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

DEDICATORIA

Esta tesis es dedicada a mi familia por su gran apoyo, especialmente a mi madre por acompañarme incondicionalmente en mis metas y sueño que me propongo. Adicionalmente se le dedico a mi pequeña Pelusa, mi mascota que me acompañó cada noche cuando avanzaba mis trabajos de universidad

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a mi madre por apoyarme siempre y darme este gran regalo que es tener un título profesional y a mi papá por acompañarme en mi vida universitaria y darme los consejos que necesitaba para seguir adelante, a mi abuelita por estar pendiente de mí cuidarme como mi madre y a Dios por siempre darme su bendición.

Tabla de contenido

JURADO EVALUADOR	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	4
TABLA DE CONTENIDO	5
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE ECUACIONES	9
RESUMEN	10
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	11
1.1. Realidad problemática	11
1.2. Formulación del problema	24
1.3. Objetivos	24
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	25
2.1. Población y muestra	26
2.2. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	26
2.3. Procedimiento	31
2.4. Consideraciones éticas	32
CAPÍTULO III: RESULTADOS	33
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	69
REFERENCIAS	75
ANEXOS	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de Homogenización	27
Tabla 2. Matriz de búsqueda de información	31
Tabla 3. Codificación de artículos seleccionados para análisis.	33
Tabla 4. Eficiencias de Remoción de Cromo de los Procesos de Electrocoagulación. .	38
Tabla 5. Matriz de homogenización de datos cualitativos de electrocoagulación.....	40
Tabla 6. Matriz de homogenización de datos cuantitativos de electrocoagulación.....	43
Tabla 7. Distribución de Frecuencia del Tipo de Muestra Tratada.	45
Tabla 8. Distribución de Frecuencias del tipo y material del reactor.	46
Tabla 9. Eficiencias de remoción de cromo en reactor tipo batch de plexiglás.....	47
Tabla 10. Distribución de frecuencia de la dinámica de la solución.	47
Tabla 11. Estadística del Uso y No uso de Agitador Magnético en el Sistema de EC..	48
Tabla 12. Distribución de frecuencias del tipo de conexión de electrodos.	49
Tabla 13. Distribución de frecuencias de la naturaleza de Cromo.	49
Tabla 14. Eficiencias de remoción de cromo según su naturaleza.	50
Tabla 15. Distribución de frecuencias del Material de Electrodo.	50
Tabla 16. Eficiencias de remoción de cromo según el material de electrodo.....	51
Tabla 17. Variables de condiciones de diseño para un sistema de electrocoagulación.	52
Tabla 18. Datos del análisis del tiempo de contacto en la remoción de cromo.....	53
Tabla 19. ANOVA: Tiempo de Contacto Vs Agrupación de Concentración Inicial. ...	55
Tabla 20. Método Tukey al 95% de confianza: Tiempo de Contacto.	55
Tabla 21. Estadística del tiempo de contacto según grupo de concentración inicial.....	56

Tabla 22. Datos del análisis del pH inicial en la remoción de cromo.	57
Tabla 23. ANOVA: porcentaje de remoción de Cromo Vs Agrupación de pH inicial. 60	
Tabla 24. Método Tukey al 95% de confianza: pH inicial de la solución tratada.	60
Tabla 25. Estadística descriptiva del pH inicial y % de Remoción.	61
Tabla 26. Resumen de pruebas estadísticas y conclusiones de las variables cuantitativas del diseño de electrocoagulación.	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma del proceso de selección de artículos en la revisión sistemática	28
Figura 2. Distribución de publicaciones según país.	37
Figura 3. Distribución de publicaciones según año.	37
Figura 4. Correlación de Pearson: Tiempo de contacto y Concentración Inicial.	54
Figura 5. Diferencia de medias del tiempo de contacto.	56
Figura 6. Correlación de Pearson: pH inicial vs Remoción (%)	59
Figura 7. Porcentajes de Remoción de Cromo según la escala de pH de la solución. ..	61
Figura 8. Vista Frontal del diseño de Electrocoagulación.	64
Figura 9. Vista 45° del diseño de Electrocoagulación.	65
Figura 10. Medidas de la celda de plexiglás escala laboratorio en Reactor tipo Batch	66
Figura 11. Elementos principales del sistema de electrocoagulación.	67
Figura 12. Medidas del electrodo de Hierro y Componentes del Reactor tipo Batch ..	68

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Porcentaje de Remoción de Contaminantes.....	38
---	-----------

RESUMEN

Las curtiembres del departamento de La Libertad, han aumentado significativamente y con ello la búsqueda de tecnologías para el tratamiento de sus residuos, en especial por los efluentes de cromo. El objetivo de la tesis es la elaboración de un sistema de remoción de cromo mediante electrocoagulación para curtiembres. La investigación del tipo descriptivo, consiste en una revisión documental de las tecnologías de remoción mediante electrocoagulación, así como del análisis estadístico sobre los factores que condicionan este proceso. Los resultados mostraron mayores remociones cuando el pH inicial estuvo entre valores de 5-8, con un tiempo de contacto de 27 minutos y tiempos de 75 minutos, para concentraciones menores y mayores a 1000 ppm de cromo, respectivamente. Además, los electrodos de Hierro demostraron tener en promedio una eficiencia de remoción del 99,15 %, asimismo se demostró que los factores que influyen en la electrocoagulación son la densidad de corriente, conductividad, cantidad de electrodos y material de reactor. Finalmente, se diseñó un sistema de remoción de cromo, siendo este un reactor tipo batch de plexiglás de una capacidad de 1 litro, con dos electrodos fijos de hierro en conexión monopolar en paralelo, con una fuente de alimentación de 1 a 30 voltios.

PALABRAS CLAVES: Tratamiento de aguas residuales, electrocoagulación, remoción, cromo, diseño.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

A nivel mundial, la industria de la curtiduría es considerada como una de las más contaminantes (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial [ONUDI], 2021), y cada año se deben destinar enormes sumas de dinero para reparar y en menor grado para prevenir sus impactos ambientales negativos para los ecosistemas y el ser humano (Martínez y Romero, 2018). Que estas industrias sean consideradas como altamente contaminantes se debe por la descarga de compuestos químicos altamente tóxicos que se producen en sus procesos operativos. De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] (2006), los vertidos de aguas residuales procedentes de la industria del cuero contienen altas cargas de metales pesados (cadmio, cromo, cianuro, cobre, cinc, plomo y níquel), también cantidades importantes de vertidos de fenoles que en concentraciones elevadas superan lo tolerado por el ser humano y, por lo tanto, alcanzan muy altos niveles de toxicidad (Lazo, 2017). Los efluentes de curtiembres sin tratar son vertidos a mares y ríos conteniendo altas concentraciones de cromo (PNUMA, 2006), porque este es uno de los principales agentes de curtación; sin embargo, este metal es tóxico tanto para los animales, los seres humanos y el medio ambiente (Rey de Castro, 2013).

En Latinoamérica la industria del cuero genera un panorama de impactos potencialmente significativos especialmente en el medio ambiente, afectando la calidad del aire, agua y tierra (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2000). La visibilidad de las emisiones contaminantes es diferente a la del resto del

mundo, las emisiones de las curtiembres no se concentran alrededor de una fuente fija (mar o laguna), sino que son descargadas a la red de drenaje en donde se mezclan con los efluentes de distintos orígenes. Se estima que por cada tonelada de cuero crudo se producen sólo 200 kg de cuero y se requiere de 50 metros cúbicos de agua, estas aguas luego de su ciclo de vida se convierten en aguas residuales con grandes cantidades de sólidos en suspensión y principalmente el cromo⁺³ y residuos sólidos impregnados de químicos utilizados (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2005). En algunos países como Argentina, los efluentes de las curtiembres son vertidos en ríos, conjuntamente a los efluentes de los diferentes sectores de la industria magnificando su impacto, especialmente en las cuencas vecinas a los lugares de concentración de la industria (Martínez y Romero, 2018). Sin sistemas de tratamientos eficientes, se comenzaron a implementar medidas donde se exigía seguir la Ley de Gestión Ambiental, no solo para reducir el grado de contaminación de los efluentes industriales, sino con objetivos para el saneamiento y recomposición de las zonas dañadas (Frecia, 2017).

Actualmente en el Perú, existen varias curtiembres capaces de producir más productos de cuero que el número limitado de pieles y la demanda efectiva que pueda absorber el mercado doméstico, además es un sector que brinda menos protección y seguridad para el trabajador, y una contaminación con serias consecuencias ambientales y para la salud pública (Campos, 2013). Las descargas de cromo que se generan en la industria del curtido, durante los procesos de curtido y recurtido, como resultado del uso de sales de cromo para que sean

absorbidas por las pieles, quedando siempre un cierto porcentaje que no es aprovechado (10 %), el cual forma parte de sus residuos líquidos (Chávez, 2010).

En el departamento de Arequipa, específicamente en el sector de Parque Industrial Río Seco se ha venido denunciando en los últimos años la descarga de efluentes altamente nocivos para la salud humana con concentraciones provenientes de las industrias de curtiembre, sobrepasando los límites máximos permisibles que estipula la normativa peruana correspondiente al sector (Rosas, 2019). De igual manera, en Lima existe una gran cantidad de curtiembres clandestinas que generan un gran impacto ambiental negativo. Tan solo en el año 2012, se identificaron 60 curtiembres, de las cuales el 50% de estas se encontraron ubicadas en Lima. Siendo el sector de Santa María de Huachipa uno de los más afectados, en donde la informalidad; impacta negativamente sobre las aguas superficiales del Río Huaycoloro, que desemboca en el Río Rímac, y por adición de contaminantes producto del proceso de curtición (Aguilar y Palomino, 2018, p. 20).

Ahora bien, en la provincia de Trujillo la industria del cuero es una de las actividades más importantes de la provincia, esto se refleja con la existencia de más de 80 curtiembres distribuidas en tres distritos: La Esperanza, El Porvenir y Florencia de Mora; sin embargo, debido a una mala política de planificación en los sectores industriales, no hay un sistema adecuado para tratar los efluentes de las empresas. Por lo que, todas las curtiembres vierten sus efluentes líquidos al colector de aguas domésticas, haciendo necesario que cada empresa destine un

área para que acondicione las aguas residuales a las normas ambientales vigentes antes de ser vertidas (Mendoza, 2019).

Como medida de solución a esta problemática, diversos autores han propuesto técnicas y tratamientos para los efluentes de curtiembre. Ferro et. al, (2021) explican que los tratamientos convencionales suelen ser costosos, implican altos requerimientos de tiempos, materiales y recursos. Alternativas como un sistema de centrifugación de lodos cumplen con ser eficaces, pero no eficientes mostrando porcentajes de remoción por debajo de los esperados de técnicas tradicionales de filtración. Por otro lado, Carreño (2016), explora procesos de biorremediación, y aunque se presenta como un tratamiento de bajo costo, su fortaleza son los contaminantes orgánicos, en su investigación logró remover solo el 18% de Cromo.

Es así, que desde la última década se popularizó el uso de la tecnología de electrocoagulación como una alternativa económica, eficiente y moderna. El proceso de electrocoagulación se ha hecho más eficiente cuando se trata de remover metales pesados como el cromo (Arias, 2013), no obstante, esta tecnología aún es poco explorada, y el diseño de un tratamiento de electrocoagulación dependerá de condiciones específicas de operación y control, como, por ejemplo, del tipo de agua a tratar, contaminante a remover, ubicación geográfica, entre otros factores (Palomino y Ramos, 2021).

Justificación:

Es a partir de esta realidad problemática que se justifica el desarrollo del diseño de un sistema de electrocoagulación eficiente para la remoción de Cromo en Aguas Residuales de Curtiembre, teóricamente la investigación aporta conocimientos sobre el diseño de un sistema de electrocoagulación enfocado a la remoción de uno de los principales metales pesados en aguas de curtiembre como es el cromo, además metodológicamente plantea métodos para el análisis de diferentes investigaciones con el fin de delimitar condiciones de diseño que permitan una mayor eficiencia de remoción de cromo, del mismo modo, el desarrollo de esta tecnología de electrocoagulación permitirá disminuir la carga de contaminantes al ambiente, justificándose en su variable ambiental. Además, se justifica en lo económico ya que la electrocoagulación reduce tiempo de remoción, dinero en pago de multas, adaptaciones o espacios amplios para la construcción de lagunas y tratamientos convencionales. Finalmente, el desarrollo del diseño de un sistema de electrocoagulación eficiente traerá beneficios económicos, ambientales y legales para las empresas de curtido que deseen implementarla en sus instalaciones.

Antecedentes

Cristancho et. al (2019). En su artículo de investigación llamado "Evaluación de la eficiencia de un sistema de electrocoagulación en los vertimientos de curtiembres en el sector de Villapinzón (Cundinamarca)". Publicado por la Revista Mutis, Colombia. Se llevó a cabo una búsqueda de información acerca del proceso de electrocoagulación, la cual sirvió de base para

el diseño e implementación a escala laboratorio. Después de la implementación del sistema se obtienen los siguientes porcentajes de remoción: Cr (52,8 %), DQO (36 %), nitritos (99,6 %), nitratos (99,4 %), sulfatos (92,9 %) y fosfatos (99,1 %). Se concluye que el sistema de electrocoagulación es una alternativa viable como tratamiento no convencional para el tratamiento de aguas residuales industriales de curtiembre que contribuye a la disminución de los impactos generados a la cuenca alta del río Bogotá.

Beltrán (2015) en sus tesis para optar al título de Ingeniero Ambiental titulada "Diseño conceptual y construcción de un electro coagulador controlado por LabVIEW", publicada por la Universidad Santo Tomas, Colombia. La investigación aporta un prototipo automatizado en las funciones de dosificación de químicos y aplicación de voltaje por medio del diseño de un algoritmo diseñado en el software LabVIEW. El diseño del reactor de electrocoagulación fue definido a partir de una serie de ensayos teniendo en cuenta las siguientes variables: tiempo que tarda la reacción de electrocoagulación, tamaño del reactor y voltaje aplicado. Mediante el este proyecto se estudia la electrocoagulación como una técnica para el tratamiento de agua residual aplicando electroquímica por medio de un prototipo de electrocoagulación automatizado, y de esta forma dar a conocer el funcionamiento de este sistema.

Bermúdez y Salazar (2019) en su tesis de investigación de nombre "Aplicación de fotocatalisis heterogénea y electrocoagulación en depuración de cromo y cadmio en agua residual proveniente de una industria metalmecánica" publicada por la Universidad de Guayaquil. La presente investigación el objetivo

de reducir los contaminantes cadmio y cromo hasta los límites permisibles estipulados en la normativa ecuatoriana de descargas de efluentes a alcantarillado. El trabajo experimental se realizó en el laboratorio de aguas de la Universidad de Guayaquil donde se diseñó dos prototipos de reactor para los dos procesos, un reactor tipo batch con capacidad de 6 litros, el otro reactor con el mismo volumen y diseño de recirculación, además se construyó un conjunto de 10 placas bipolares de hierro. Obteniendo así la reducción de cromo hexavalente en un 99,7 % y cadmio 99,5 % en 15 voltios y 4,5 amperios durante 5 min en temperatura ambiente.

Mayta y Mayta (2017) en su artículo de investigación titulado "Remoción de Cromo y Demanda Química de Oxígeno de aguas residuales de Curtiembre por Electrocoagulación" publicado en la Revista Sociedad Química, Perú, su estudio consistió en la remoción de Cr^{+3} y demanda química de oxígeno (DQO) de muestras de aguas residuales de curtiduría por electrocoagulación (EC) en un reactor electroquímico de operación discontinua. Durante el proceso de EC de las muestras se vio el incremento de pH, la temperatura y disminución de la conductividad, la máxima remoción de Cr^{+3} fue de 98 % y de DQO de 48 % fue obtenida con el tratamiento de 45 min de tiempo, 10 V y dilución de 2, además el resultado experimental permitió el desarrollo de modelos matemáticos para la remoción de Cr^{+3} y de DQO.

Perales (2019) en su tesis para obtener el título de Ingeniero Ambiental titulada "Influencia del proceso de electrocoagulación en la remoción de cromo hexavalente (Cr^{+6}) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad

Continental, 2019", publicado por la Universidad Continental, Huancayo, Perú. Lo cual tiene como objetivo la influencia de la variación del tiempo de electrocoagulación y del voltaje eléctrico sobre la remoción del Cr^{+6} a nivel de laboratorio empleando el reactor tipo Batch, con respecto a los porcentajes de remoción de Cr^{+6} se alcanzó un 100 % de remoción en un tiempo de electrocoagulación de 40 minutos y con un voltaje eléctrico de 30 voltios siendo estos dos valores los óptimos para lograr una remoción completa de Cr^{+6} .

Aguilar y Palomino (2018) en su tesis para obtener el título de Ingeniero Ambiental con título "Evaluación de un Sistema de Electrocoagulación de Flujo Continuo para la Remoción de cromo⁺⁶ y DQO de Curtiembre-Huachipa-2018.", publicado en la Universidad Privada Cesar Vallejo, Perú. Lo cual el objetivo de la investigación fue evaluar el nivel de eficiencia de un sistema de electrocoagulación con flujo continuo para la remoción de cromo⁺⁶ y DQO de Curtiembre de Huachipa en el año 2018 y se concluyó que la aplicación de un sistema de electrocoagulación es eficiente en la remoción de DQO y cromo⁺⁶, debido a las características fisicoquímicas del efluente.

De La Cruz et. al (2017) con su tesis para obtener el título de profesional de Ingeniero Químico de título "Tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembre mediante el método de electrocoagulación para la reducción de la Demanda Química de Oxígeno y Cromo" publicado en la Universidad Nacional Del Callao Facultad De Ingeniería Química, el objetivo es el tratamiento de aguas residuales de la industria curtiembre mediante el método de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno y Cromo, la cual se realizó

en cuatro etapas: la primera etapa es la sedimentación del agua, la segunda el proceso de filtración con bomba de succión al vacío, la tercera el método de electrocoagulación y la última el filtro de arena y carbón activado. Al final se obtuvo una remoción de la demanda química de oxígeno 90,1 % y una remoción del cromo del 99,99%.

Carhuancho y Salazar (2015) en su tesis para obtener el título de Ingeniero Químico que tiene como título "Estudio del efecto de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales a nivel de laboratorio en la planta de tratamiento de aguas residuales Covicorti en la ciudad de Trujillo –La Libertad" publicado en la Universidad Nacional de Trujillo, Perú. La tesis tiene como estudio la electrocoagulación. Se trabajó con ánodos de Aluminio, Zinc y Hierro, se evaluó el agua residual proveniente de los alcantarillados del distrito Porvenir, Trujillo metropolitano, Víctor Larco Herrera y parte de la esperanza. El parámetro físico químico se obtuvo como resultado porcentajes máximos de remoción de 97,2 % de color; 96,48 % de SST; 93,56 % de turbidez; 90,95 % de DQO; y 58,24 % de DBO₅. En conclusión, la electrocoagulación se convierte en un proceso electroquímico que tiene resultados exitosos.

Guerrero (2017) en su tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental de título "Influencia del tiempo y voltaje en la disminución de la carga orgánica por electrocoagulación del agua residual de la curtiembre cuenca S.A.C." publicado por la Universidad Privada Cesar Vallejo, lo cual el objetivo principal de la investigación fue evaluar la influencia de la Electrocoagulación en la disminución de la carga orgánica del agua residual de la curtiembre Cuenca S.A.C.

Los resultados obtenidos, fue que aplicando mayor voltaje y tiempo de reacción se encuentran, los mejores porcentajes de remoción con 71,2 % y 46,9 % para ambos parámetros. La presente investigación concluyó, que el tiempo óptimo de electrocoagulación es de 45 minutos, suministrando 16 voltios de potencial energético a la celda electroquímica, a estas condiciones se identificaron los mejores resultados de disminución de ambos parámetros.

Mendocilla (2018) en su tesis de pregrado "Influencia del PH y el tiempo en la remoción de cromo hexavalente presente en soluciones acuosas utilizando la electrocoagulación". La investigación consistió en demostrar la influencia del pH y el tiempo en la remoción de cromo (VI) de una solución acuosa utilizando la electrocoagulación. Para ello se diseñó un reactor lo cual se acondicionaron 8 placas de aluminio con $75,6 \text{ cm}^2$ de superficie de contacto cada una (4 de ánodos y 4 de cátodos). El resultado óptimo del proceso se encontró a un pH de 3 y en un tiempo de 15 minutos, con una remoción de 20,0652 ppm o 97,44% de remoción cromo⁺⁶. Por consiguiente, se llegó a demostrar que el pH y el tiempo influyen en la remoción de cromo⁺⁶, en un tratamiento por electrocoagulación con electrodos de aluminio.

Bases Teóricas

Sistema de Remoción

Según Lorezon (2020), un sistema se define como la unión de partes o componentes, conectados en una forma determinada. Las partes influyen en el sistema, de manera que la unión de partes hace algo (muestra una conducta dinámica como opuesto a permanecer inerte). Es decir, un sistema se encuentra en equilibrio cuando las partes o componentes no llegan a interactuar entre sí. Un sistema de remoción es aquel sistema donde las partes o componentes interactúan entre sí para eliminar, retener o remover algún compuesto, elemento o parte.

Generalmente la remoción de cada metal, empleando soluciones de concentración conocida, dichos estudios se han enfocado en estudiar de forma individual el comportamiento del material en la remoción de cada metal de interés, lo cual les permite establecer las isotermas de adsorción de cada caso; pero deja un vacío en cuanto a la interacción que tienen los contaminantes en sistemas reales, donde existirán más de un tipo de moléculas a ser adsorbidas (Ramírez et. al, 2013).

Parámetros ambientales

Son indicadores ambientales seleccionados definen la metodología para realizar la evolución, si es necesario hacer muestreos o si la información se recolecta directamente del factor ambiental, para cada indicador ambiental es necesario conocer los procedimientos metodológicos para la toma de datos y la clase de equipos necesarios (Orozco, 2004, p. 277).

Metales pesados

No existe una definición exacta de lo que son los metales pesados, puesto existen posturas diferentes entre su catalogación como tal. Rosas (2019), explica que podría catalogarse como metal pesado a aquel elemento con una gravedad específica mayor a los 5 g/cm^3 , otros lo definen como aquellos elementos con números atómicos superiores al del Sodio (Na). Sin embargo, la definición más acercada al uso de estudios de tratamiento de aguas sería aquella que considera a los metales pesados como aquel grupo de metales o metaloides asociados con la contaminación y toxicidad potencial para el ser humano o ecosistemas.

Cromo

El Cromo es un metal blanco azulado brillante, en muchos minerales de Cr reemplaza a parte de Al y Fe dotándolos de colores característico; también el color de muchas piedras preciosas se debe a la presencia de cromo. Se trata de un metal muy duro y resistente químicamente, por ello su mayor aplicación se encuentra en las aleaciones con Fe, W y Co aumentando su dureza y resistencia a la corrosión. (Herbello, 2007, p. 06)

Tratamiento de Aguas Residuales

Por lo general el tratamiento de aguas residuales este compuesto por tres etapas o tres fases. La primera es la conocida como el pretratamiento, donde sobresalen el uso de equipos de remoción física, como rejillas, rejillas, filtros, desarenadores, sedimentadores, entre otros. Luego están los de tratamiento primario que combina procesos físicos y químicos como la adición de cal, precipitación química,

coagulantes y floculantes, entre otros. Los tratamientos secundarios son aquellos que implementan procesos más avanzados en procesos continuos para eliminar a los elementos biológicos como las lagunas facultativas o procesos de fitorremoción, entre otros (Arias, 2013).

Electrocoagulación

La coagulación asistida electroquímicamente, o electrocoagulación (EC), es un proceso electroquímico en el que, a partir de compuestos procedentes de la disolución de un ánodo, se agrupa la materia coloidal existente en un agua residual, lo que posibilita su conversión en sólidos suspendidos y su separación del agua mediante técnicas convencionales de separación sólido/líquido, tales como la decantación, la flotación y la filtración. Como consecuencia de su disolución, los ánodos van desapareciendo a medida que transcurre el tratamiento, llegando un momento en el que es necesaria su reposición (ánodos de sacrificio). Considerando que el sistema de electrocoagulación requiere una fuente de poder, se consultó que la disposición de los electrodos tiene mayor efectividad con una conexión monopolar en paralelo, donde la corriente eléctrica se reparte entre todos los electrodos (Aguilar, 2015).

Electrodo

Los electrodos son materiales que por su naturaleza se comporta como un conductor eléctrico en contacto con una solución, y de acuerdo al tipo de conexión puede comportarse como cátodo o ánodo, este electrodo recibe una corriente eléctrica, provocando el flujo de electrones del material por el que está formado,

originando las reacciones electroquímicas, que llevan a cabo la coagulación *in situ* de un contaminante (Acosta et. al, 2013)

Cátodo y Ánodos

El cátodo de una celda electroquímica es el electrodo en que tiene lugar la reducción mientras que el ánodo es el electrodo donde ocurre la oxidación. Estas definiciones son aplicables tanto a celdas galvánicas como electrolíticas. (Hernández et. al, 2007, p. 05).

1.2. Formulación del problema

- ¿Qué diseño de un sistema de electrocoagulación será el más eficiente para la remoción de cromo de aguas residuales de curtiembres en la ciudad de Trujillo en el año 2022?

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar un sistema de Electrocoagulación para la remoción eficiente de Cromo para aguas residuales de curtiembre en la ciudad de Trujillo.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar las eficiencias de remoción de los diversos estudios de sistemas de electrocoagulación para la remoción de Cromo.
- Determinar las condiciones de diseño más eficientes para la remoción de Cromo en aguas residuales de curtiembre.
- Elaborar el diseño gráfico del sistema de electrocoagulación en Autocad.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

El desarrollo de la presente investigación guarda un enfoque mixto, esto debido a que, para el procesamiento de datos, usan datos cuantitativos (pH, conductividad, densidad de corriente) como datos cualitativos (tipo de material de electrodo, tipo de material de reactor). Los métodos mixtos o híbridos representan un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y el análisis de datos tanto cuantitativos como cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada (denominadas meta inferencias) y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio (Hernández y Mendoza, 2018)

La investigación es del tipo no experimental, debido a que se realizó sin manipular las variables. Las variables se observan tal y como se pueden mostrar en su estado natural para finalmente llevar a cabo un análisis de la relación de estos (Gómez et al., 2014).

El diseño de la investigación fue descriptivo porque presenta el diseño de un sistema de electrocoagulación eficiente para la remoción de cromo en aguas residuales de curtiembre.

El desarrollo de la investigación fue documental, la cual consiste en revisar la información de investigaciones básicas y aplicadas (Hernández et. al, 2014), y su metodología es la de una revisión sistemática. Para llevar a cabo esta investigación se realizaron estrategias de búsqueda en las principales bases de datos de artículos científicos y generales, así como la aplicación de criterios de inclusión y exclusión de acuerdo con el autor, para finalmente realizar un estudio a profundidad de las tecnologías de electrocoagulación enfocadas en la remoción de Cromo.

2.1.Población y muestra

La población la presente investigación corresponde al total de las investigaciones de electrocoagulación aplicadas en el tratamiento de aguas residuales de curtiembre encontradas luego del proceso de búsqueda literaria, definida por Baptista, et al. (2014), como finita, al existir un registro documental de dichas unidades. Este proceso de búsqueda nos muestra 17 estudios pertinentes a la investigación. Así mismo, en este caso, tal población resulta accesible en su totalidad por lo que no será necesario extraer una muestra. Dicho de otro modo, la investigación y obtención de datos se obtendrá de toda la población objetivo. Salas (2016) reafirma este criterio y señala que cuando el investigador tiene acceso al 100% de esta población.

2.2.Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

La técnica utilizada para la investigación fue la de Análisis Documental, trabajo mediante el cual por un proceso intelectual extraemos unas nociones del documento para representarlo y facilitar el acceso a los originales. Analizar, por tanto, es derivar de un documento el conjunto de palabras y símbolos que le sirvan de representación (Rizo, 2015). El instrumento del análisis documental fue la matriz de búsqueda de información, que expone el desarrollo de la investigación según la base de datos (motor de búsqueda), así como los resultados obtenidos de la investigación y los seleccionados luego del proceso de revisión sistemática.

Con respecto al análisis de datos la técnica utilizada fue la del análisis estadístico de la asociación (relación, covarianza, correlación) entre variables, esta representa una parte básica del análisis de datos en cuanto que muchas de las preguntas e hipótesis que se plantean en los estudios que se llevan a cabo en la práctica implican analizar la

existencia de relación entre variables (Molina y Rodrigo, 2010). Se utilizó como instrumento a la matriz de homogenización o normalización de datos (Rizo, 2015), que consiste en una matriz que caracteriza las condiciones de operación y tratamiento de las diferentes investigaciones y las normaliza de acuerdo con las condiciones específicas.

Tabla 1.

Matriz de Homogenización

Código	Variable	Cromo (Cr _f) mg/L	Remoción de Cromo (%)
Código de la investigación (R + N°)	En unidades del SI	Concentración de Cromo final en mg/L	Porcentaje de Remoción

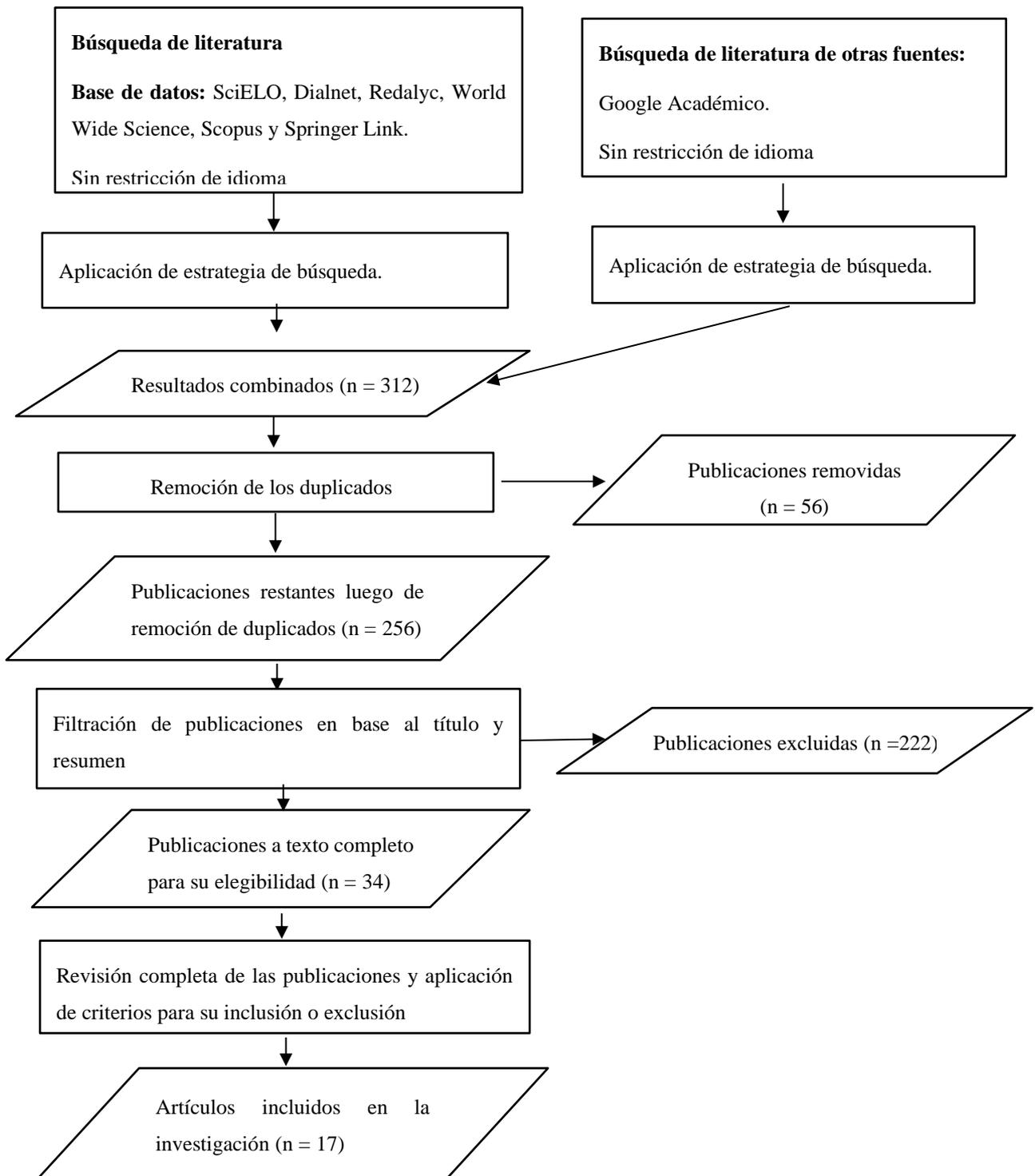
Nota. La matriz puede contener la cantidad de variables que el investigador considere pertinente para la investigación, debiendo guardar condiciones similares con los demás para su análisis correspondiente.

La metodología aplicada para el proceso de selección de artículos para la investigación fue la de revisión sistemática se ciñó en el flujograma de la figura 1, mismo que consiste en cuatro etapas esenciales: identificación; tamizaje; elegibilidad de textos; y la inclusión de artículos en la revisión sistemática (Bolaños y Calderón, 2014).

La búsqueda de literatura se llevó a cabo en las bases de datos SciELO, Dialnet, Redalyc, World Wide Science, Scopus y Springer Link, así como en el buscador de Google Académico. Como estrategia de búsqueda se incluyeron palabras claves en español e inglés, conectores y el uso de los siguientes términos: [electrocoagulación] o [tratamiento de aguas residuales] o [EC aguas de curtiembre] o [remoción de Cromo], y [electrocoagulation or tannery wastewater] or [EC or chrome removal] or [tannery effluents treatment].

Figura 1.

Flujograma del proceso de selección de artículos en la revisión sistemática



Nota. El gráfico representa el proceso de selección de artículos, los rectángulos significan el proceso, mientras que los trapecios rectangulares muestran la entrada y lectura de datos.

Criterios de Inclusión

A fin de mantener un significativo grado de confianza entre las publicaciones son elegibles aquellos trabajos que por su naturaleza sean considerados como artículos científicos y, por ende, se encuentren publicados por una revista indexada.

Además, en la revisión completa de los artículos se deberá encontrar datos sobre la remoción de cromo (Cr^{+6} , Cr^{+3} y Cr Total) a través de tecnologías de electrocoagulación. Para ser considerado incluido en la revisión, la investigación deberá contar con información acerca de concentración inicial, final y porcentaje de remoción o eficacia, así como los métodos de electrocoagulación utilizados.

Criterios de Exclusión

Se excluirán las publicaciones de revisiones bibliográficas, revisiones sistemáticas y los trabajos de tesis de bachillerato, titulación, licenciatura, maestría o doctorado, esto con el fin de mantener la homogeneidad de las publicaciones. No obstante, estos trabajos que cumplan con los demás criterios de inclusión serán considerados dentro de la llamada "literatura gris", para poder ser consultadas si es necesario.

Los artículos que no especifiquen información relacionada al tipo de agua tratada, parámetros iniciales, energía administrada, condiciones de diseño serán excluidos o considerados como artículos deficientes.

Finalmente serán excluidos de esta revisión aquellos trabajos que tengan una antigüedad de publicación mayor de 20 años. Es decir, se excluirán los artículos publicados antes del año 2002.

Presentación de datos

Los datos obtenidos mediante el proceso de revisión sistemática serán presentados en una matriz de desarrollo del capítulo de resultados, se presentará información relacionada a los parámetros iniciales de la solución, condiciones de diseño y condiciones de operación, se convertirán unidades de ser necesario para presentarlas de una manera uniforme.

Procesamiento y análisis de datos

Para el procesamiento de datos se utilizarán los softwares de megaStat y minatab el procesamiento de datos será aplicado de acuerdo con las características propias del diseño de investigación. Para la descripción de las variables se utilizó la estadística descriptiva, en distribución de frecuencias y presentación de gráficos. Además, para el desarrollo del diseño se utilizará el programa AutoCad para moldear las características físicas del sistema de electrocoagulación

Matriz de búsqueda de información

La matriz de búsqueda de información expone el motor de búsqueda usado en la identificación de publicaciones en las distintas bases de datos y buscadores académicos web, así como el número de artículos encontrados, excluidos y seleccionados para la investigación.

Tabla 2.

Matriz de búsqueda de información

Base de datos	Búsqueda	Nº de artículos	Nº de artículos excluidos	Nº de artículos seleccionados
SciELO	Electrocoagulación / Remoción de Cromo / Chromium	9	8	1
Dinalnet	Tratamiento de aguas residuales con electrocoagulación / Remoción de Cromo	14	12	2
Google Académico	Tannery wastewater / Aguas residuales de curtiembre / Electrocoagulación / Electrocoagulation	136	134	2
Redalyc	Electrocoagulación / Tannery effluent	12	9	3
World Science	Wide Electrocoagulación para remoción de cromo/ Chrome removal	8	8	0
Scopus	Remove of Chromium/ Electrocoagulation for tanney effluent / Electrocoagulation	109	102	7
Springer Link	Electrocoagulation of tannery effluent	24	22	2
	Total	312	295	17

Nota. Esta tabla muestra cuales fueron la base de datos, la cantidad de artículos que se encontró, cuales fueron excluidos y seleccionados en la investigación.

2.3.Procedimiento

- Se buscaron a través de una estrategia de búsqueda las investigaciones de sistemas de electrocoagulación para la remoción de cromo, y se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión.
- Se identificaron aquellas investigaciones de remoción de cromo en aguas residuales de curtiembre.

- Se identificaron las eficiencias de remoción de cromo en los sistemas de electrocoagulación de las investigaciones seleccionadas.
- Se determinaron las condiciones de diseño que presentan mayor afinidad a la remoción de cromo en aguas residuales de curtiembre a través del uso de estadística descriptiva.
- Se diseñó físicamente las condiciones de un sistema de electrocoagulación con el uso del software AutoCad, además se determinaron las condiciones de operación pertinentes.

2.4.Consideraciones éticas

La bibliografía consultada referente a los sistemas de electrocoagulación fue debidamente citada. Del mismo modo, el investigador cuenta con las características de honestidad, tanto científica, académica y profesional, en ese sentido se es honesto en la obtención de información, su uso y el procesamiento de datos para la realización de los objetivos planteados en su investigación (Ojeda y Quintero, 2007); además se citaron todas las fuentes bajo las normas APA 7ma edición con el fin de proteger la propiedad intelectual de los autores consultados. Por último, se recalca el principio de responsabilidad, con lo cual el investigador se ha responsable de la información vertida en la investigación, su uso y especialización.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

Determinar las eficiencias de remoción de los diversos estudios de sistemas de electrocoagulación para la remoción de Cromo.

Luego de aplicar el proceso de selección de artículos bajo los criterios de inclusión y exclusión, se obtuvieron en total 17 artículos científicos que muestran sus procesos y condiciones de operación para el proceso de electrocoagulación de aguas residuales de curtiembre para la remoción de Cromo (Cr^{+3} , Cr^{+6} y Cr total). Dichos trabajos de investigación fueron codificados en orden de antigüedad, con la finalidad de realizar un análisis más fluido y ordenado, tal y como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.

Codificación de artículos seleccionados para análisis.

Autor (es)	Título de la Investigación	Año de publicación	País de publicación	Código
Golder, A., Samanta, A. y Ray, S.	Eliminación de cromo trivalente por electrocoagulación.	2007	India	R01
Kongjao, S., Damronglerd, S. y Hunsom, M.	Eliminación simultánea de contaminantes orgánicos e inorgánicos en aguas residuales de la curtiduría mediante la técnica de electrocoagulación.	2008	Tailandia	R02
Apaydin, O., Kurt, U. y Gonullu, M.	Una investigación sobre el tratamiento de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación	2009	Turquía	R03

Espinoza, F., Fornari, M., Módenez, A., Palácio, S., Silva, F., Szymanski, N., Kroumov, A. y Trigueros, D.	Eliminación de contaminantes del efluente de la curtiduría por electrocoagulación	2009	Brasil	R04
Zaroual, Z., Chaair, H. Essadki, A. El Ass, K. y Azzi, M.	Optimización de la eliminación de cromo trivalente por electrocoagulación utilizando diseño experimental	2009	Marruecos	R05
GilPavas, E., Dobrosz, I. y Gómez, M.	La eliminación del cromo trivalente de las aguas residuales de la curtiduría de cuero: la optimización de los parámetros del proceso de electrocoagulación	2011	Colombia	R06
Golder, A., Samanta, A. y Ray, S.	Eliminación de cromo y contaminantes orgánicos de los efluentes industriales de curtiembre por cromo por electrocoagulación	2011	Turquía	R07
Benhadji, A., Taleb, M, y Maachi, R.	Electrocoagulación y efecto de los materiales catódicos en la eliminación de contaminantes de aguas residuales de curtiduría de Rouïba	2011	Argelia	R08

Shahriari, T., Nabi, G., Mehrdadi, N. y Torabian, A.	Eliminación de cromo (III) de aguas residuales por método de electrocoagulación.	2013	Corea del Sur	R09
Deghlesa, A. y Kurt, U.	Tratamiento de aguas residuales de curtiduría en bruto mediante técnica de electrocoagulación: optimización de parámetros efectivos utilizando el método Taguchi	2015	Turquía	R10
Elabbas, S., Ouazzani, N., Mandi, L., Berrekhis, L., Perdicakis, M., Pontvianne, S., Pons, M., Lopicque, F. y Leclerc, J.	Tratamiento de aguas residuales de curtiduría altamente concentradas mediante electrocoagulación: influencia de la calidad del aluminio utilizado para el electrodo	2015	Marruecos	R11
Mella, B., Glanert, A. y Gutierrez, M.	Eliminación de cromo de las aguas residuales de curtido y su reutilización.	2015	Brasil	R12
Deghlesa, A. y Kurt, U.	Tratamiento de aguas residuales de la curtiduría mediante un proceso híbrido de electrocoagulación / electrodiálisis	2016	Turquía	R13
Mayta, R. y Mayta J.	Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación	2017	Perú	R14

Mendocilla, C. y Cruz, J.	Influencia del PH y el tiempo en la remoción de cromo hexavalente presente en soluciones acuosas utilizando la electrocoagulación	2018	Perú	R15
Apaza, H., Carrillo, E., Castilla, D. y Huaraya, F.	Modelo de un sistema de tratamiento para efluentes de la industria de curtiembre	2020	Perú	R16
Tejada, C., Villabona, A. y Contreras, R.	Electrocoagulación como alternativa para eliminación de cromo (VI) en solución	2021	Colombia	R17

Nota. La tabla muestra las investigaciones resultantes del proceso de revisión sistemática y las codifica de acuerdo con un orden descendente de antigüedad desde el valor R01, investigación más antigua, hasta la investigación R17, la más reciente.

La mayoría de las publicaciones seleccionadas corresponden a los países de Turquía (4) y de Perú (3), siendo ambos países conocidos por su actividad de curtiembres. Estas distribuciones de artículos se encuentran reflejadas en la figura 02 que se muestra a continuación.

Figura 2.

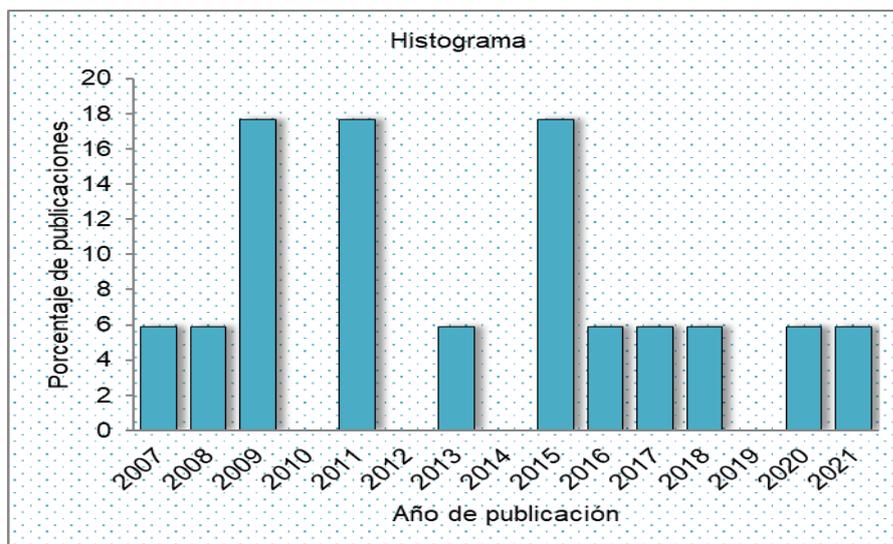
Distribución de publicaciones según país.



Nota. Gráfica de barras de las cantidades de investigaciones seleccionadas, de acuerdo con el país de publicación.

Figura 3.

Distribución de publicaciones según año.



Nota. Histograma de frecuencia de publicaciones en porcentaje, de acuerdo con el año de publicación.

En el análisis de los sistemas de electrocoagulación presentados en las publicaciones seleccionadas, se identificaron las mejores eficiencias de remoción de Cromo (Cr^{+3} , Cr^{+6} y Cr total) de sus respectivos procesos. Estas eficiencias se encuentran determinadas por la ecuación 1.

Ecuación 1.

Porcentaje de Remoción de Contaminantes.

$$\text{Porcentaje de Remoción (\%)} = \frac{\text{Concentración Inicial} - \text{Concentración Final}}{\text{Concentración Inicial}} \times 100$$

De esto modo, se identificaron las concentraciones iniciales y finales de cada uno de los estudios seleccionados y luego se determinaron sus porcentajes de remoción, esta información se muestra en la tabla 4. Determinando así las eficiencias de remoción de los diversos estudios de sistemas de electrocoagulación para la remoción de Cromo.

Tabla 4. *Eficiencias de Remoción de Cromo de los Procesos de Electrocoagulación.*

Código	Material de electrodos	Cromo (Cr 0) mg/L	Cromo (Cr f) mg/L	Remoción de Cromo (%)
R01	Fe - Fe	1000	2	99,80%
R02	Fe - Fe	12,59	0,01	100,00%
R03	Fe - Fe	22	0,66	97,00%
R04	Fe - Fe	50	0,5	99,00%
R05	Al - Al	200	18	91,00%
R06	Al - Al	3596	8,63	99,76%
R07	Al - Al	2700	17	99,40%

R08	Al - Al	18.4	1,26	93,15%
R09	Fe - Fe	500	0.2	99,96%
R10	Al - Al	570	5,7	99,00%
R11	A-U4G	7000	69,9	99,70%
R12	Al - Al	2000	44.8	97,76%
R13	Al - Al	570	0,1	99,98%
R14	Al - Al	1470	5,6	97,72%
R15	Al - Al	20	0,53	97,44%
R16	Al - Al	50	7,786	84%
R17	AISI - Al	50	3,55	92,90%

Nota. Tabla de determinación de eficiencias en porcentaje de remoción del proceso de electrocoagulación. El porcentaje de Remoción de Cromo fue hallado con la ecuación 1.

3.2. Determinar las condiciones de diseño más eficientes para la remoción de Cromo en aguas residuales de curtiembre.

La determinación de las condiciones de diseño más eficientes para la remoción de cromo trivalente, hexavalente y/o total, se dividió en dos etapas, la primera corresponde a la determinación de diseño de las variables cualitativas (material del reactor, uso de agitador magnético, tipo de conexión, etc.) de los sistemas de electrocoagulación propuestos por los diversos autores, la segunda corresponde a la determinación de las condiciones de diseño y operación de las variables cuantitativas como el tamaño del reactor, la densidad de corriente eléctrica, entre otros.

El procesamiento de datos requiere la estandarización en cuanto al idioma, unidades de magnitud y recursos usados. De este modo, la presentación de datos de las variables cualitativas y cuantitativas se realizó en dos matrices de homogenización de datos.

Tabla 5.

Matriz de homogenización de datos cualitativos de procesos de electrocoagulación

Código	Muestra tratada	Tipo de Reactor	Dinámica de la solución	Material de electrodos	Tipo de conexión de electrodos	Tipo de cromo	Remoción de Cromo (%)
R01	Solución de Cromo, preparada recreando situación de Curtiembre	Batch de plexiglás	Uso de Agitador Magnético	Fe - Fe	Monopolar	Cr ⁺³	99,80%
R02	Muestra de Agua Residual Industrial de Curtiembre	Batch de plexiglás	Recirculación	Fe - Fe	Monopolar	Cr Total	100,00%
R03	Muestra de Agua Residual Industrial de Curtiembre	Batch de vidrio	No	Fe - Fe	Monopolar	Cr Total	97,00%
R04	Muestra de Agua Residual Industrial de Curtiembre	Batch de polietileno	No	Fe - Fe	Monopolar	Cr Total	99,00%
R05	Solución de Cromo, preparada recreando situación de Curtiembre	Reactor electroquímico termostatzado	Uso de Agitador Magnético	Al - Al	Monopolar	Cr 3+	91,00%

R06	Muestra de Agua Residual Industrial de Curtiembre	Batch de plexiglás	No	Al - Al	Monopolar	Cr 3+	99,76%
R07	Muestra de Agua Residual Industrial de Curtiembre	Batch de plexiglás	Uso de Agitador Magnético	Al - Al	Monopolar	Cr ⁺³	99,40%
R08	Muestra de Agua Residual Industrial de Curtiembre	Batch de plexiglás	Uso de Agitador Magnético	Al - Al	Monopolar	Cr Total	93,15%
R09	Solución de Cromo, preparada recreando situación de Curtiembre	Batch de plexiglás	Uso de Agitador Magnético	Fe - Fe	Monopolar - Bipolar	Cr ⁺³	99,96%
R10	Muestra de Agua Residual Industrial de Curtiembre	Batch de plexiglás	Uso de Agitador Magnético	Al - Al	Monopolar	Cr Total	99,00%
R11	Muestra de Agua Residual Industrial de Curtiembre	Batch de plexiglás	Uso de Agitador Magnético	A-U4G	Monopolar	Cr ⁺³	99,70%
R12	Muestra de Agua Residual Industrial de Curtiembre	Batch de vidrio	Uso de Agitador Magnético	Al - Al	Monopolar	Cr Total	97,76%
R13	Muestra de Agua Residual Industrial de Curtiembre	Batch de plexiglás	No	Al - Al	Monopolar	Cr Total	99,98%

R14	Muestra de Agua Residual Industrial de Curtiembre	Batch de plexiglás	No	Al - Al	Monopolar	Cr ⁺³	97,72%
R15	Solución de Cromo, preparada recreando situación de Curtiembre	Batch de plexiglás	No	Al - Al	Monopolar	Cr ⁺⁶	97,44%
R16	Muestra de Agua Residual Industrial de Curtiembre	Batch de polietileno	Circulación continua	Al - Al	Monopolar	Cr Total	84%
R17	Solución de Cromo, preparada recreando situación de Curtiembre	Batch de plexiglás	No	AISI - Al	Monopolar	Cr ⁺⁶	92,90%

Nota. Los valores fueron estandarizados de acuerdo con las características de las variables cualitativas. Los valores registrados corresponden al diseño de electrocoagulación donde se obtuvieron los mejores resultados de remoción de Cromo.

Se muestran características de los artículos analizados sobre el tipo de muestra tratada, material del reactor, dinámica de la solución, material de electrodo, tipo de conexión entre electrodos, tipo de cromo analizado y eficiencias de remoción. En cuanto a las variables cuantitativas estas se presentan en la tabla 5, donde antes de la presentación correspondiente, los datos fueron convertidos a unidades internacionales y magnitudes iguales entre publicaciones, a fin de realizar un análisis correcto de los valores obtenidos en las investigaciones.

Tabla 6.

Matriz de homogenización de datos cuantitativos de los procesos de Electrocoagulación

Código	pH _i	Conductividad (k _i) mS/cm	Capacidad del reactor (Litros)	Cantidad de electrodos	Distancia de separación entre electrodos (mm)	Dimensiones del electrodo (cm)	Área de reacción (cm ²)	Voltaje	Amperaje	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo de contacto ideal (min)	Cromo (Cr _i) mg/L	Cromo (Cr _f) mg/L	Remoción de Cromo (%)
R01	3,40	4,40	0,80	2,00	22,00	13 * 9 * 0.05	30,74	-	-	48,78	60,00	1000,00	2,00	99,80%
R02	7,00	2480,00	0,30	6,00	50,00	-	161,00	-	3,60	22,40	20,00	12,59	0,01	100,00%
R03	7,42	21,63	0,50	2,00	60,00	6 * 7.5 * 0.2	45,00	10,00	1,50	33,30	30,00	22,00	0,66	97,00%
R04	8,00	21,10	5,00	2,00	40,00	7 * 14 * 0.15	80,50	30,00	5,50	68,00	30,00	50,00	0,50	99,00%
R05	4,23	-	5,00	2,00	10,00	-	109,00	9,14	-	-	10,00	200,00	18,00	91,00%
R06	4,52	12,05	0,30	2,00	50,00	9 * 3 * 0.1	27,00	30,00	5,00	57,87	60,00	3596,00	8,63	99,76%
R07	3,42	32,50	0,80	2,00	22,00	13 * 9 * 0.5	30,74	0,50	3,00	97,59	90,00	2700,00	17,00	99,40%
R08	7,10	2,36	1,00	2,00	30,00	7 * 4 * 0.5	28,00	-	1,00	75,00	45,00	18,40	1,26	93,15%

R09	5,83	-	2,50	10,00	20,00	10 * 7 * 0.2	77,00	30,00	-	-	25,00	500,00	0,20	99,96%
R10	7,00	11.71	0,60	2,00	50,00	9 * 5*0.2	37,00	30,00	1,85	50,00	25,00	570,00	5,70	99,00%
R11	3,80	54.20	2,50	2,00	20,00	15 * 7	105,00	3,00	4,20	400,00	360,00	7000,00	69,90	99,70%
R12	4,07	71.91	0,50	2,00	20,00	14.3 * 5 * 0.15	52,00	3,00	3,00	57,70	110,00	2000,00	44,80	97,76%
R13	6,00	23.00	2,50	10,00	7,00	-	45,00	24,00	0,63	14,00	45,00	570,00	0,10	99,98%
R14	4,22	36.05	1,30	6,00	10,00	10 * 7 * 0.1	49,00	10,00	9,00	183,67	45,00	1470,00	5,60	97,72%
R15	3,00	-	0,90	8,00	-	9 * 8.4	75,60	5,00	4,00	30,00	15,00	20,00	0,53	97,44%
R16	7,06	46.00	2,50	6,00	25,00	10 * 6 * 0.2	48,00	20,00	20,00	400,00	15,00	50,00	7,79	84,00%
R17	6,70	-	3,00	10,00	15,00	15 * 15 * 0.167	37,58	20,00	-	-	30,00	50,00	3,55	92,90%

Nota. Los valores no registrados en las publicaciones seleccionadas fueron calculados a partir de las variables relacionables entre sí, en los casos donde la información no fue encontrada ni explícita, ni implícitamente, los valores fueron asignados como “-“indicando el vacío de información y declinación en el análisis individual de la variable correspondiente.

La tabla 6 muestra los valores de las condiciones de electrocoagulación como el pH inicial de la solución, la conductividad inicial de la solución, el volumen de la celda de reacción, la cantidad de electrodos usados, la distancia de separación entre electrodos, las dimensiones de los electrodos, el área de reacción de los electrodos, el voltaje, amperaje y densidad de corriente del sistema de electrocoagulación, el tiempo de contacto ideal y las concentraciones iniciales y finales de la solución tratada.

El análisis de todos los valores tanto cualitativos y cuantitativos se realizó a través de la aplicación de pruebas estadísticas descriptivas e inferenciales, así como el análisis de varianza, la regresión y correlación de variables. La identificación de las condiciones óptimas de operación se realizó bajo el criterio de eficiencia del proceso de electrocoagulación, considerando las dimensiones de porcentaje de remoción de contaminante, eficiencia en el uso de recursos para el proceso de electrocoagulación y el tiempo de tratamiento.

Análisis de las variables cualitativas del diseño de electrocoagulación.

Muestra tratada.

Para determinar qué tipo de muestra fue utilizada en las investigaciones se realizó una prueba de distribución de frecuencia cualitativa como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7.

Distribución de Frecuencia del Tipo de Muestra Tratada.

Tipo de agua	Frecuencia	Porcentaje (%)
Muestra de A.R.I. Curtiembre	13	76,5
Solución de Cr, preparada recreando situación de Curtiembre	4	23,5
Acumulado	17	100,0

Nota. El tipo de agua usada como muestra para los experimentos de remoción por Electrocoagulación, pertenece a muestras de Aguas Residuales Industriales (A.R.I.) y a muestras preparadas a partir de una Solución Madre.

Tabla 8.

Distribución de Frecuencias del tipo y material del reactor.

Tipo de Reactor	Frecuencia	Porcentaje (%)
Batch de plexiglás	12	70,6
Batch de vidrio	2	11,8
Batch de polietileno	2	11,8
Reactor electroquímico termostatizado	1	5,9
Acumulado	17	100.0

Nota. El Reactor tipo batch es un reactor discontinuo por lotes. El reactor termostatizado permite la adecuación de la temperatura de la muestra a libre voluntad del investigador.

De acuerdo con el tipo y material de reactor más utilizado los autores prefieren el reactor de Batch de plexiglás (material acrílico) en un 70,6 % de investigaciones, otros reactores utilizados como Batch de Vidrio, polietileno (Plástico) y reactor electroquímico obtuvieron usos de 2, 2 y 1, respectivamente. De este modo, las muestras solo permiten realizar un análisis de efectividad de variables con 3 a más valores, siendo el único calificado el reactor Batch de plexiglás.

Tabla 9.
Eficiencias de remoción de cromo en reactor tipo batch de plexiglás.

Estadística	Batch de Plexiglás	Otro tipo de reactor
Conteo	12	4
Promedio	0,98234	0,92440
Desviación estándar	0,02580	0,06388
Varianza	0,00067	0,00408
Valor mínimo	0,929	0,84
Valor máximo	1	0,9776
Rango	0,071	0,1376

Nota. Los valores correspondientes a las pruebas estadística se encuentran en valores unitarios, siendo el valor máximo 1 equivalente a 100% de remoción y el valor mínimo 0 equivalente a 0% de remoción.

Dinámica de la solución.

La dinámica de la solución está determinada por el uso de equipos adicionales o diseño del sistema a fin de dar movimiento a la solución de muestra tratada, de este modo puede incorporarse un agitador magnético, un sistema de recirculación, un sistema de paso de circulación continua o el no uso de instrumentos adicionales.

Tabla 10.
Distribución de frecuencia de la dinámica de la solución.

Dinámica de la solución	Frecuencia	Porcentaje (%)
Uso de Agitador Magnético	8	47,1
Recirculación	1	5,9
No	7	41,2
Circulación continua	1	5,9
Acumulativo	17	100,0

Nota. La tabla muestra la cantidad de veces que se repite el uso de cierta dinámica de la solución, donde "No" representa un reactor estático, en estado de reposo.

Los autores encontraron el uso de agitador magnético como ideal para sus tratamientos (47,1 %), seguidamente del no uso de agitador magnético con un 41,2 % de investigadores.

De esta manera, el análisis de estadística descriptiva se realizó en comparación del uso y no uso de agitador magnético como se muestra a continuación.

Tabla 11.

Estadística del Uso y No uso de Agitador Magnético en el Sistema de EC.

Estadísticas	No Uso de Agitador Magnético	Uso de Agitador Magnético
Valores	7	8
Promedio	0,97686	0,97471
Desviación estándar	0,02406	0,03449
Varianza	0,00058	0,00119
Valor mínimo	0,929	0,91
Valor máximo	0,9998	0,9996
Rango	0,0708	0,0896

Nota. Los porcentajes de remoción se encuentran en valores unitarios, siendo el valor máximo 1 equivalente a 100% de remoción y el valor mínimo 0 equivalente a 0% de remoción.

Tipo de conexión.

El tipo de conexión fue la variable más fácil de identificar, a través de la estadística descriptiva el 94,1% de autores aplicaron un modelo de conexión monopolar, sin embargo, un autor realizó una conexión mixta entre monopolar y bipolar en un mismo sistema.

Tabla 12.

Distribución de frecuencias del tipo de conexión de electrodos.

Tipo de conexión de electrodos	Frecuencia	Porcentaje
Monopolar	16	94,1
Monopolar - Bipolar	1	5,9
Acumulativo	17	100,0

Nota. Los tipos de conexión entre electrodos considera aquellas conexiones con mejores resultados, en algunas publicaciones autores usan ambas conexiones (Monopolar – Bipolar).

Naturaleza de Cromo.

El contaminante tratado en todas las investigaciones fue el cromo en su naturaleza de Cr^{+3} , Cr^{+6} y Cr total. Sin embargo, algunos autores refieren naturalezas iniciales y finales de la valencia del cromo, conforme el proceso de electrocoagulación inicia, los iones del contaminante pueden librar electrones y convertirse en su forma base de Cr^{+3} . De este modo se analizaron el uso declarado de Cromo por los autores en una tabla de distribución de frecuencia.

Tabla 13.

Distribución de frecuencias de la naturaleza de Cromo.

Tipo de cromo	Frecuencia	Porcentaje
Cr^{+3}	7	41,2
Cr Total	8	47,1
Cr^{+6}	2	11,8
Acumulativo	17	100,0

Nota. El tipo de Cromo analizado en la investigación no excluye la presencia de más de un solo tipo de Cromo encontrado en muestras a tratar.

Del mismo modo que en la elección del uso y no uso de agitador magnético, se desarrollan estadísticas descriptivas del porcentaje de remoción del cromo según su naturaleza.

Tabla 14.

Estadística de las eficiencias de remoción de cromo según su naturaleza.

Estadísticas	Cromo III	Cromo Total
Valores	7	8
Promedio	0,98191	0,96236
Desviación estándar	0,03262	0,05420
Varianza	0,00106	0,00294
Valor mínimo	0,91	0,84
Valor máximo	0,9996	1
Rango	0,0896	0,16

Nota. Los porcentajes de remoción se encuentran en valores unitarios, siendo el valor máximo 1 equivalente a 100% de remoción y el valor mínimo 0 equivalente a 0% de remoción.

Material del electrodo.

Esta es la variable más discutida por los investigadores, de acuerdo con la naturaleza del electrodo, se liberan iones y electrones de manera que favorecen o perjudican la remoción de ciertos contaminantes, de este modo, se plantean electrodos de Fe – Fe, Al – Al, Al - U4G y AlSi – Al.

Tabla 15.

Distribución de frecuencias del Material de Electrodo.

Material de electrodos	Frecuencia	Porcentaje
Fe - Fe	5	29,4

Al - Al	10	58,8
Al - U4G	1	5,9
AISI - Al	1	5,9
Acumulativo	17	100,0

Nota. Los electrodos se representan con el átomo usado, en el caso de Al – U4G corresponde a una aleación de Aluminio.

De acuerdo con la tabla 15 el par de electrodos más usados es el de Aluminio – Aluminio, con un 58,8 % de sistemas de electrocoagulación, siguiendo la conexión de Hierro – Hierro con un 29,4 % de usos.

Tabla 16.

Eficiencias de remoción de cromo según el material de electrodo

Estadísticas	Al - Al	Fe - Fe
Valores	10	5
Promedio	0,95921	0,99152
Desviación estándar	0,05118	0,01269
Varianza	0,00262	0,00016
Valor mínimo	0,84	0,97
Valor máximo	0,9998	1
Rango	0,1598	0,03

Nota. Los porcentajes de remoción se encuentran en valores unitarios, siendo el valor máximo 1 equivalente a 100% de remoción y el valor mínimo 0 equivalente a 0% de remoción.

Finalmente, la decisión de las condiciones óptimas de diseño y operación de un sistema de electrocoagulación se basó en la obtención de las condiciones con mayores

eficiencias de remoción representadas por el promedio de remoción de cromo, esta información se encuentra resumida en la tabla 17.

Tabla 17.

Variables cualitativas de las condiciones de diseño para un sistema de electrocoagulación.

Tipo de agua	Tipo de agua	Tipo de Reactor	Diseño adicional	Material de electrodos	Tipo de conexión de electrodos	Tipo de cromo
Prueba Estadística	Moda	Moda	Promedio de Remoción	Promedio de Remoción	Moda	Promedio de Remoción
Optimización	A.R.I. Curtiembre	Batch de plexiglás	No uso	Fe - Fe	Monopolar	Cr⁺³
Valor	76,47 %	70,59 %	97,69 %	99,15 %	94,12 %	98,19 %
Optimización		Promedio de Remoción	Uso de Agitador Magnético	Al - Al		Cr Total
Valor		98,23 %	97,47 %	95,92 %		96,24 %

Nota. Se muestran los valores que, según las pruebas estadísticas, presentan mayor optimización de procesos. Los espacios en blanco representan que no existe comparación de uso o de eficiencia para cierta condición de operación.

Análisis de las variables cuantitativas del diseño de electrocoagulación.

Tiempo de contacto.

El tiempo de contacto es una de las variables más importantes para la remoción de contaminantes, la formación de flóculos, la descomposición iónica de los compuestos contaminados y la pasivación de los electrodos, entre otros factores. De este modo, se realizó inicialmente la agrupación de valores con las variables de tiempo inicial, remoción de cromo (%), tiempo de contacto ideal para dicha remoción y agrupación de concentración de cromo. Esta última corresponde a la agrupación de concentraciones de cromo iguales o superiores a 1000 ppm (Agrupación M1) y para los valores de concentraciones iniciales de cromo inferiores a 1000 ppm (Agrupación M), esta distribución de agrupaciones se realizó con el fin de demostrar la hipótesis de que mayores concentraciones iniciales de cromo requieren mayores tiempos de remoción.

Tabla 18.

Datos del análisis del tiempo de contacto en la remoción de cromo.

Código	Cromo (Cr 0) mg/L	Remoción de Cromo (%)	Tiempo de contacto ideal (min)	Agrupación
R01	1000,00	99,8	60,00	M1
R02	12,59	100,0	20,00	M
R03	22,00	97,0	30,00	M
R04	50,00	99,0	30,00	M
R05	200,00	91,0	10,00	M
R06	3596,00	99,8	60,00	M1
R07	2700,00	99,4	90,00	M1
R08	18,40	93,2	45,00	M
R09	500,00	100,0	25,00	M
R10	570,00	99,0	25,00	M
R11	7000,00	99,7	36,00	M1

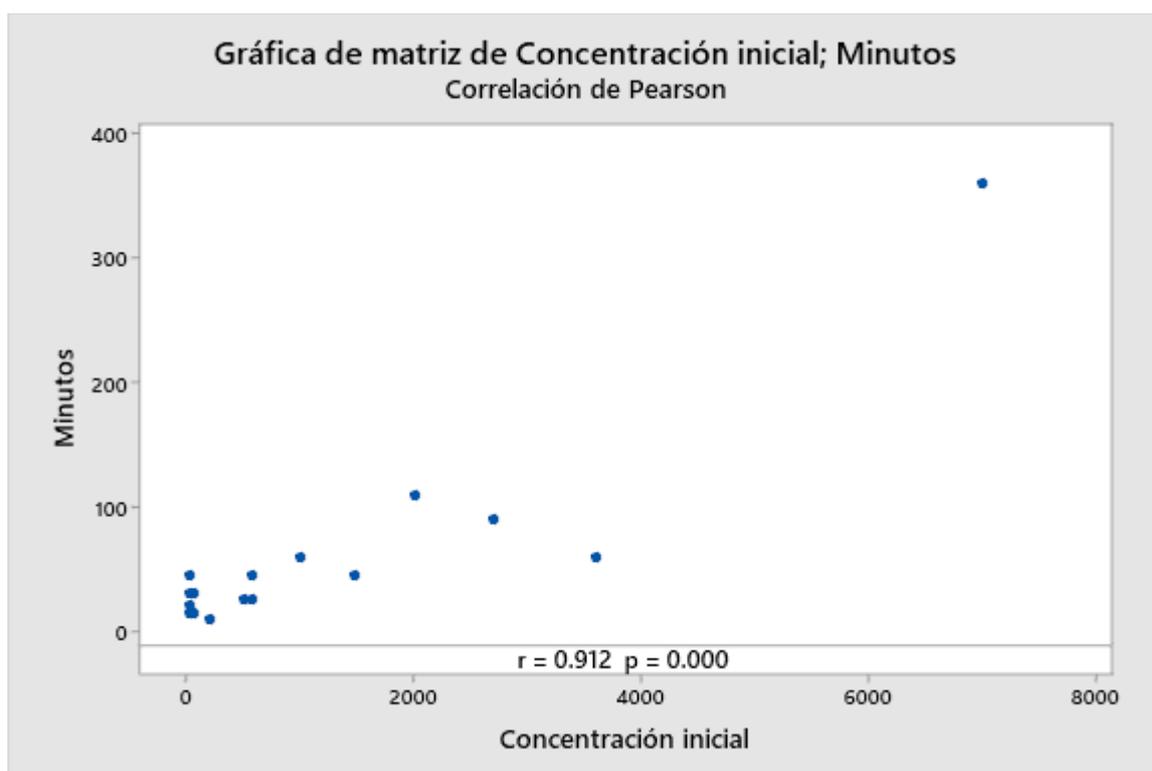
R12	2000,00	97,8	110,00	M1
R13	570,00	100,0	45,00	M
R14	1470,00	97,7	45,00	M1
R15	20,00	97,4	15,00	M
R16	50,00	84,0	15,00	M
R17	50,00	92,9	30,00	M

Nota. La codificación R-#, corresponde a la investigación analizada.

La primera prueba aplicada corresponde a la determinación de la magnitud y relación de la concentración inicial de cromo y su tiempo de remoción. Con la prueba estadística de Correlación de Pearson.

Figura 4.

Correlación de Pearson: Tiempo de contacto y Concentración Inicial.



Nota. Gráfica de Correlación entre Concentración Inicial del Contaminante y el Tiempo en minutos de remoción óptima. El gráfico obtenido en el programa estadístico de Minitab 19.

a. A un nivel de confianza del 95 %, el valor $p < 0,05$, entonces se rechaza la Hipótesis nula y decimos que existe una correlación significativa (H_1).

Un valor de $r = 0,912$ indica una relación muy buena entre las variables, y la magnitud del signo indica su proporcionalidad, de este modo a mayores concentraciones iniciales se requerirá mayores tiempos de electrocoagulación.

Siendo la concentración inicial de cromo una determinante para el tiempo de electrocoagulación utilizado y contando con trabajos de diferentes valores, se plantea agrupar entre aquellas concentraciones elevadas (M1) y concentraciones bajas (M). De este modo, la prueba de Tukey permitirá demostrar si es que los grupos M1 y M difieren en sus promedios de tiempo requerido para la remoción de cromo. Donde la hipótesis nula es que todas las medias son iguales, la hipótesis alternativa es que no todas las medias son iguales a un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$

Tabla 19.

ANOVA de un solo factor: Tiempo de Contacto Vs Agrupación de Concentración Inicial.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Grupo	1	34648	34648	7,15	0,017
Error	15	72725	4848		
Total	16	107374			

Nota. Un valor p menor a 0,05 rechaza la hipótesis nula y aprueba la hipótesis alternativa donde no todas las medias son iguales.

Tabla 20.

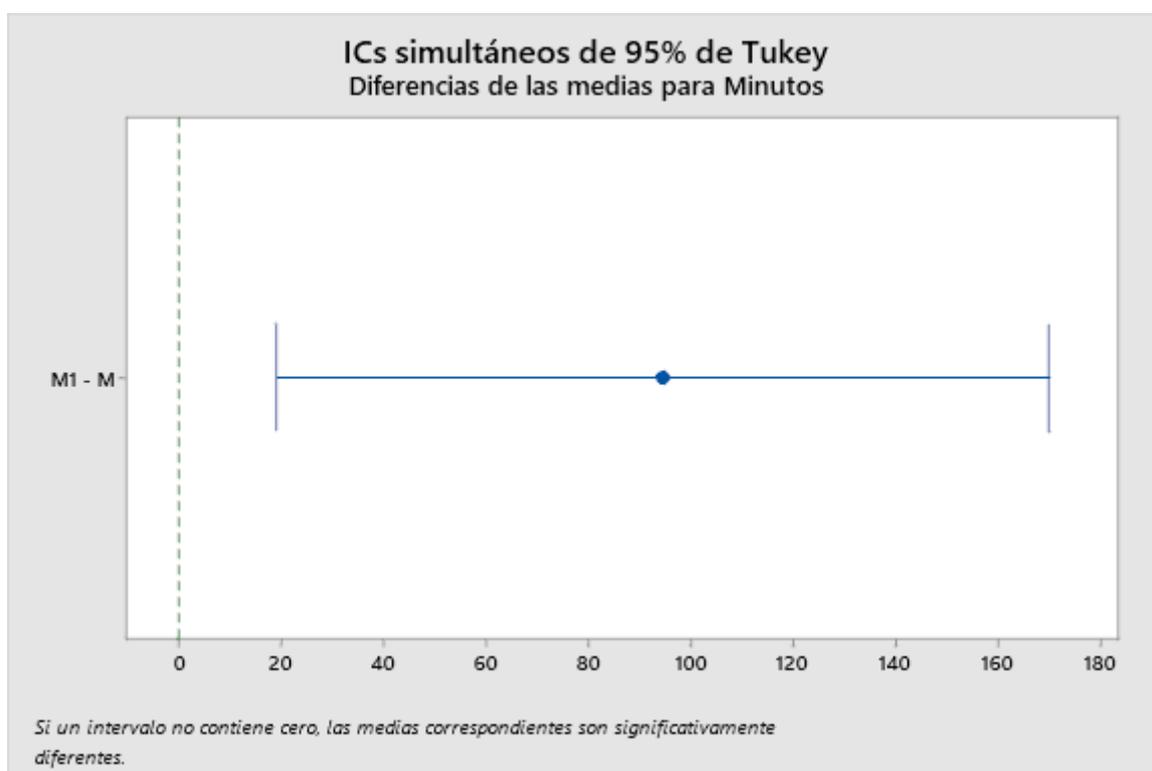
Agrupación de información método Tukey al 95% de confianza: Tiempo de Contacto.

Grupo	N	Media	Agrupación
M1	6	120,8	A
M	11	26,36	B

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 5.

Diferencia de medias del tiempo de contacto.



Nota. Las medias de tiempos de remoción de cada grupo difieren entre sí, por lo que su análisis debe hacerse por grupos separados.

Tabla 21.

Estadística descriptiva del tiempo de contacto según grupo de concentración inicial

Estadísticas	M	M1
Valores	11	6
Promedio	26,3636	120,8333

Desviación estándar	11,4217	119,5164
Varianza	130,4545	14284,16
Valor mínimo	10	45
Valor máximo	45	360
Rango	35	315
1er Cuartil	17,5000	60,0000
Mediana	25,0000	75,0000
3er Cuartil	30,0000	105,0000
Moda	30,0000	60,0000

Nota. Los valores corresponden al tiempo de remoción óptimo expresado en minutos de operación del sistema de Electrocoagulación.

pH inicial ideal.

El pH inicial de la solución tratada determinará los procesos de electrocoagulación, teniendo gran impacto en la interacción con electrodos y los contaminantes de la muestra. De acuerdo con los datos obtenidos en las investigaciones, se identificaron valores de pH ácidos, pH neutros y un valor de pH base. Luego se ordenaron los datos y clasificaron para los análisis correspondientes en la tabla 22.

Tabla 22.

Datos del análisis del pH inicial en la remoción de cromo.

Código	Remoción de Cromo (%)	pH 0	Alcalinidad
R01	99,8	3,40	Ácido
R02	100,0	7	Neutro
R03	97,0	7,42	Neutro
R04	99,0	8,00	Base
R05	91,0	4,23	Ácido
R06	99,8	4,52	Ácido

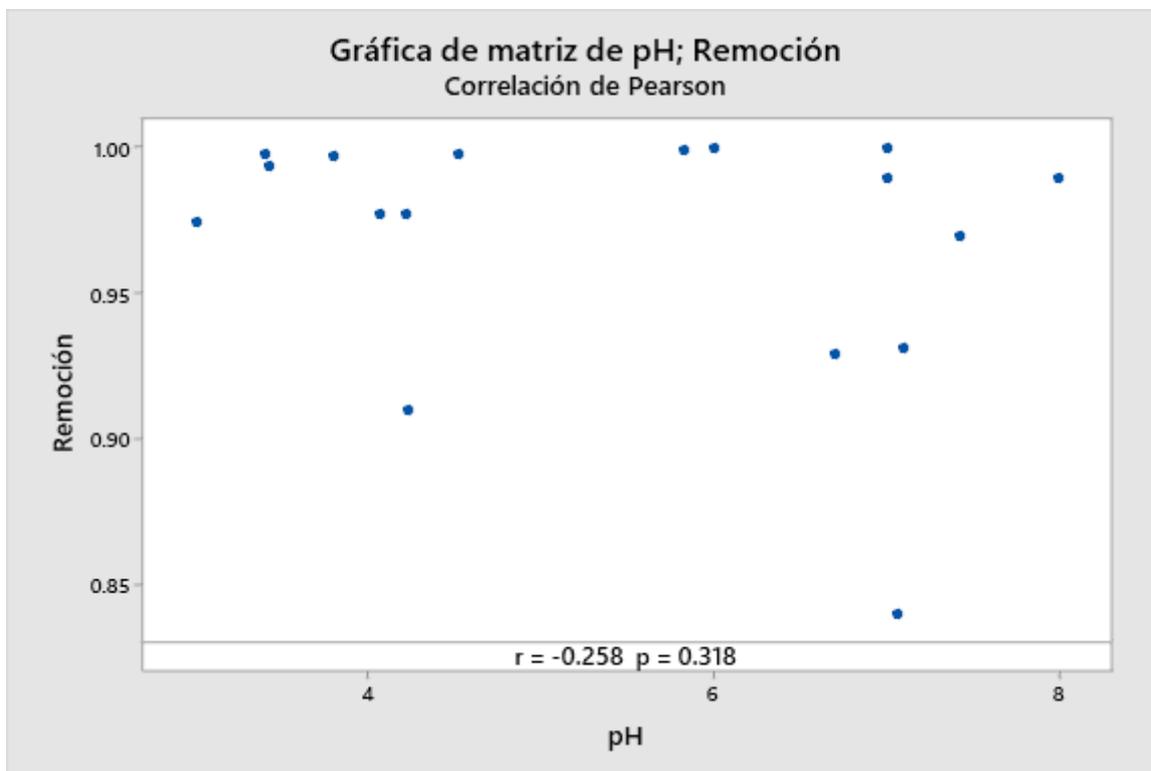
R07	99,4	3,42	Ácido
R08	93,2	7,10	Neutro
R09	100,0	5,83	Ácido
R10	99,0	7,00	Neutro
R11	99,7	3,80	Ácido
R12	97,8	4,07	Ácido
R13	100,0	6,00	Ácido
R14	97,7	4,22	Ácido
R15	97,4	3,00	Ácido
R16	84,0	7,06	Neutro
R17	92,9	6,70	Ácido

Nota. La codificación R-#, corresponde a la investigación analizada.

La primera prueba aplicada corresponde a la determinación de la magnitud y relación de la remoción de cromo y el pH inicial de la solución, Con la prueba estadística de Correlación de Pearson.

Figura 6.

Correlación de Pearson: pH inicial vs Remoción (%)



Nota. Gráfica de Correlación a un nivel de confianza del 95 %, el valor $p < 0,05$, entonces se rechaza la hipótesis alternativa y decimos que no existe una correlación significativa (H_0).

Un valor de $r = -0,258$ indica una relación baja entre las variables y la magnitud del signo indica su proporcionalidad, de este modo a menores pH iniciales se tendrán mayores porcentajes de remoción en la electrocoagulación.

Teniendo el pH inicial de la solución un previsible impacto inversamente proporcional a la remoción obtenida en el proceso de electrocoagulación y contando con trabajos de diferentes valores de pH ácidos, pH neutros y un valor de pH base. Se agruparán en: Ácido, Neutro y Base, con la prueba de Tukey permitirá demostrar si es que los grupos difieren en sus promedios de remoción de cromo. Donde la hipótesis nula es que todas las

medias son iguales, la hipótesis alternativa es que no todas las medias son iguales a un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$

Tabla 23.

ANOVA de un solo factor: porcentaje de remoción de Cromo Vs Agrupación de pH inicial.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo	2	0,003841	0,001920	1,02	0,385
Error	14	0,026254	0,001875		
Total	16	0,030095			

Nota. Un valor p es mayor a 0,05 se aprueba la hipótesis nula y rechaza la hipótesis alternativa, decimos que los promedios de los grupos son similares.

Tabla 24.

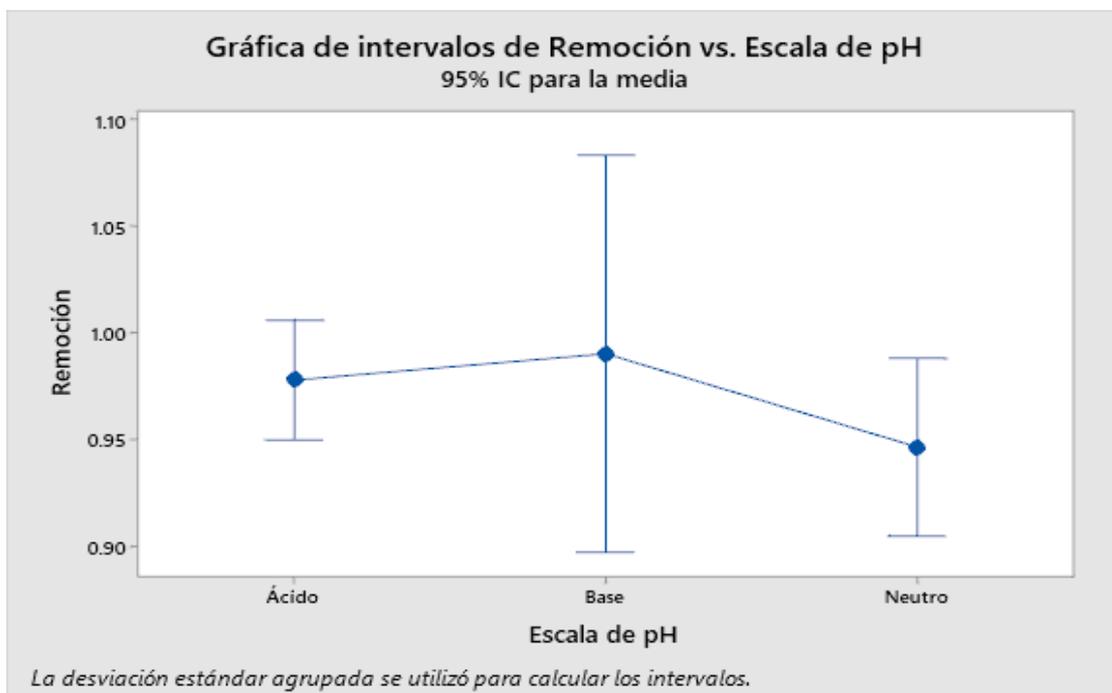
Agrupación de información método Tukey al 95% de confianza: pH inicial de la solución tratada.

Tipo	N	Media	Agrupación
Base	1	0,9900	A
Ácido	11	0,97765	A
Neutro	5	0,9463	A

Nota. Las medias de los porcentajes de remoción están expresadas en valores del 0 al 1, donde los grupos de datos que compartan misma letra no son significativamente diferentes.

Figura 7.

Intervalos de porcentajes de Remoción de Cromo según la escala de pH de la solución.



Nota. Las medias de tiempos de remoción de cada grupo no difieren entre sí.

Tabla 25.

Estadística descriptiva del pH inicial y % de Remoción.

Estadísticas	% Remoción	pH
Valores	16	16
Promedio	96,78	5,2981
Desviación Estándar	4,44	1,6012
Varianza	0,19	2,5640
Valor mínimo	84,00	3
Valor máximo	1,00	7,42
Rango	16,00	4,42

Nota. Los valores registrados corresponden la efectividad del sistema de electrocoagulación y los valores de pH más utilizados.

Análisis de las variables cuantitativas del diseño de electrocoagulación.

Las pruebas estadísticas para la determinación de las condiciones óptimas de diseño y operación del sistema de electrocoagulación se basaron en pruebas de Correlación de Pearson, el análisis ANOVA de un factor, en la prueba de comparación de medias, prueba Tukey, además de la regresión lineal.

Tabla 26.

Resumen de pruebas estadísticas y conclusiones de las variables cuantitativas del diseño de electrocoagulación.

Cromo (Cr 0) mg/L	pH	Conductividad (k 0) mS/cm	Capacidad del reactor (Litros)	Cantidad de electrodos	Densidad de corriente (mA/cm²)	Tiempo de contacto ideal (min)
Variable	pH (Inicial)	Conductividad de la Solución	Volumen del reactor	Cantidad de electrodos	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo de Contacto (Min)
Comparación	% Remoción	% Remoción	Concentración 0(mg/L)	% Remoción	% Remoción	Concentración 0(mg/L)
Prueba Estadística	Correlación de Pearson	Correlación de Pearson	Correlación de Pearson	Correlación de Pearson	Correlación de Pearson	Correlación de Pearson
R	R = -0,258	R = -0,176	R = -0,133	R = -0,438	R = -0,551	R = 0,912
Conclusión	Mayores pH dificultan Remoción de Cromo	Mayores Concentración dificultan Remoción de Cromo	Mayores volúmenes para menores muestras - No relevante	Mayor cantidad de electrodos presentan baja eficiencia de remoción de Cromo	Mayores densidades de corrientes perjudican la eficiencia de remoción de Cromo	Mayores tiempos para mayores concentraciones

Prueba Estadística	ANOVA (Un factor) - Prueba de comparación de medias - Tukey	ANOVA (Un factor) - Prueba de comparación de medias - Tukey	ANOVA (Un factor) - Prueba de comparación de medias - Tukey	ANOVA (Un factor) - Prueba de comparación de medias - Tukey	ANOVA (Un factor) - Prueba de comparación de medias - Tukey	ANOVA (Un factor) - Prueba de comparación de medias - Tukey
R	P valor = 0,133		P valor = 0,144	P valor = 0,667		P valor = 0,001
Conclusión	Ambos grupos no presentan características diferentes (Grupo A = pH neutros (Entre 6 - 8); Grupo B = pH ácidos (entre 1 a 6))	No se encontraron grupos distintos	Ambos grupos no presentan características diferentes (Grupo A = Concentraciones Iniciales Mayores a 1000 mg/L; Grupo B = Concentraciones Iniciales Menores a 1000 mg/L)	Todos los grupos no presentan características diferentes (Grupo A = 2 electrodos; Grupo B = 6 electrodos, Grupo C = 8 electrodos y Grupo D = 10 electrodos)	No se encontraron grupos distintos	Ambos grupos presentan características diferentes (Grupo A = Concentraciones Iniciales Mayores a 1000 mg/L; Grupo B = Concentraciones Iniciales Menores a 1000 mg/L)
Prueba Estadística	Correlación Lineal	Correlación Lineal	Correlación Lineal	Correlación Lineal		
R	P Valor = 6,6	P Valor = 0,58	P Valor = 0,661	P Valor = 0,0041		
Conclusión	No existe una correlación entre pH y % Remoción de Cromo	Se acepta la hipótesis Nula, no hay efecto entre Conductividad y Remoción	Se acepta la hipótesis Nula, no hay efecto entre volumen de reactor y Remoción de Cromo	Se rechaza la hipótesis Nula, por tanto, existe relación entre la remoción de cromo y densidad de corriente aplicada		

Nota. Los espacios en blanco corresponden a pruebas estadísticas dispensables en el proceso de determinación de variables óptimas del proceso de Electrocoagulación.

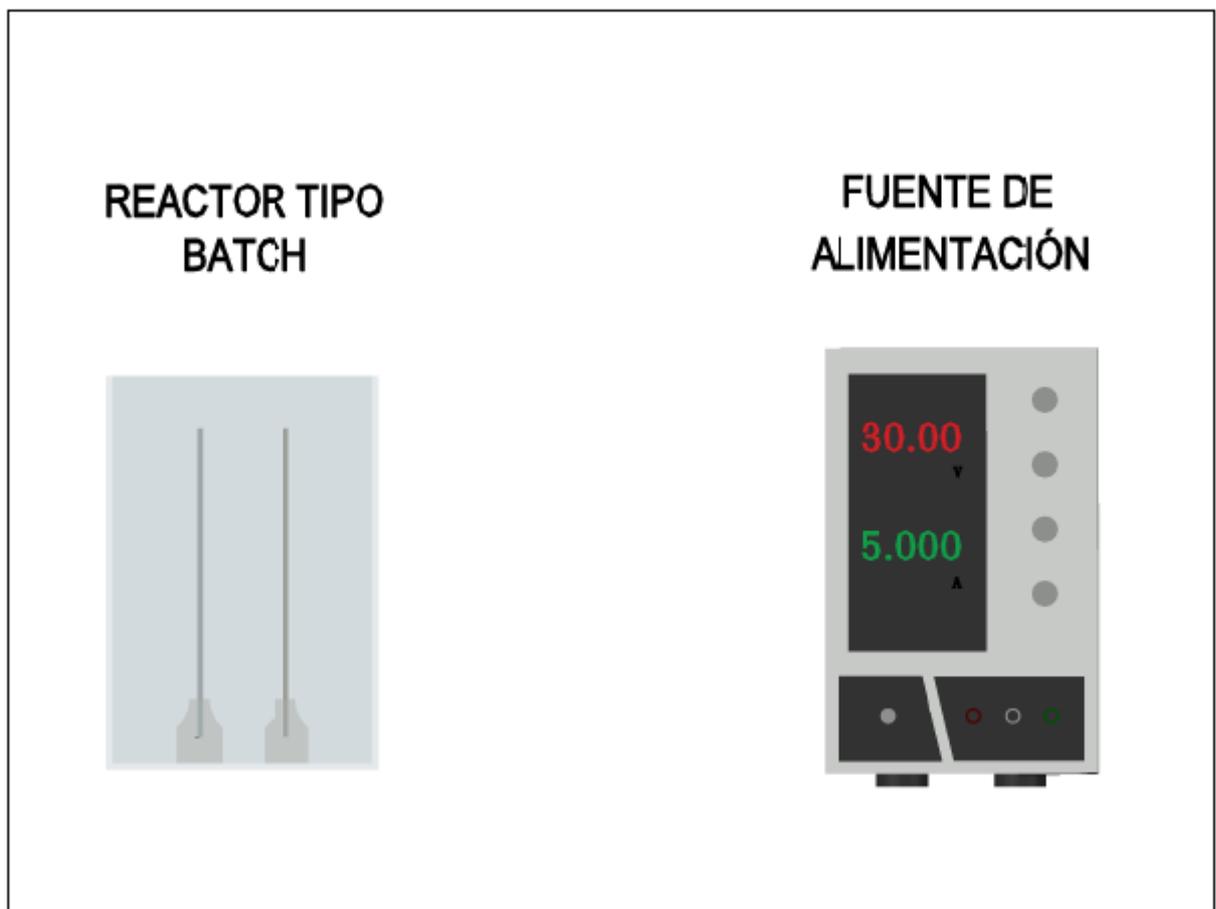
3.3. Elaborar el diseño gráfico del sistema de electrocoagulación en AutoCAD.

La elaboración del diseño se realizó con los datos obtenidos en las investigaciones y de acuerdo con las condiciones óptimas de diseño.

En ese sentido, la capacidad de reactor promedio fue de 1,00 Litros, además, el material preferido fue acrílico. Sobre la cantidad de electrodos la literatura nos indica una cantidad de dos (02) de hierro, sin el uso de agitador magnético. Por último, la capacidad de la fuente de alimentación es de un voltaje entre 0 – 30 V.

Figura 8.

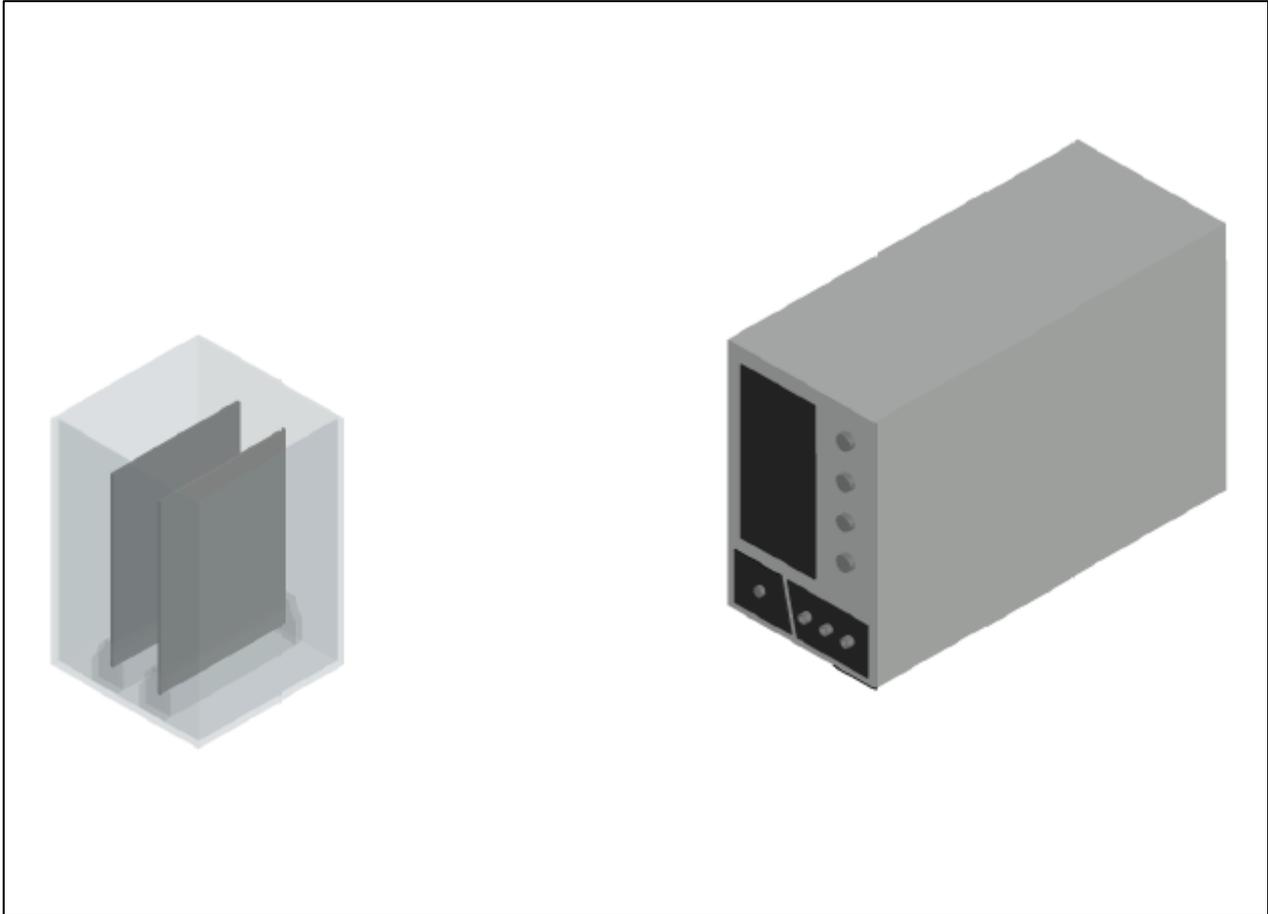
Vista Frontal del diseño de Electrocoagulación.



Nota. Reactor del tipo batch a la izquierda de la imagen y su fuente de alimentación regulable a la derecha.

Figura 9.

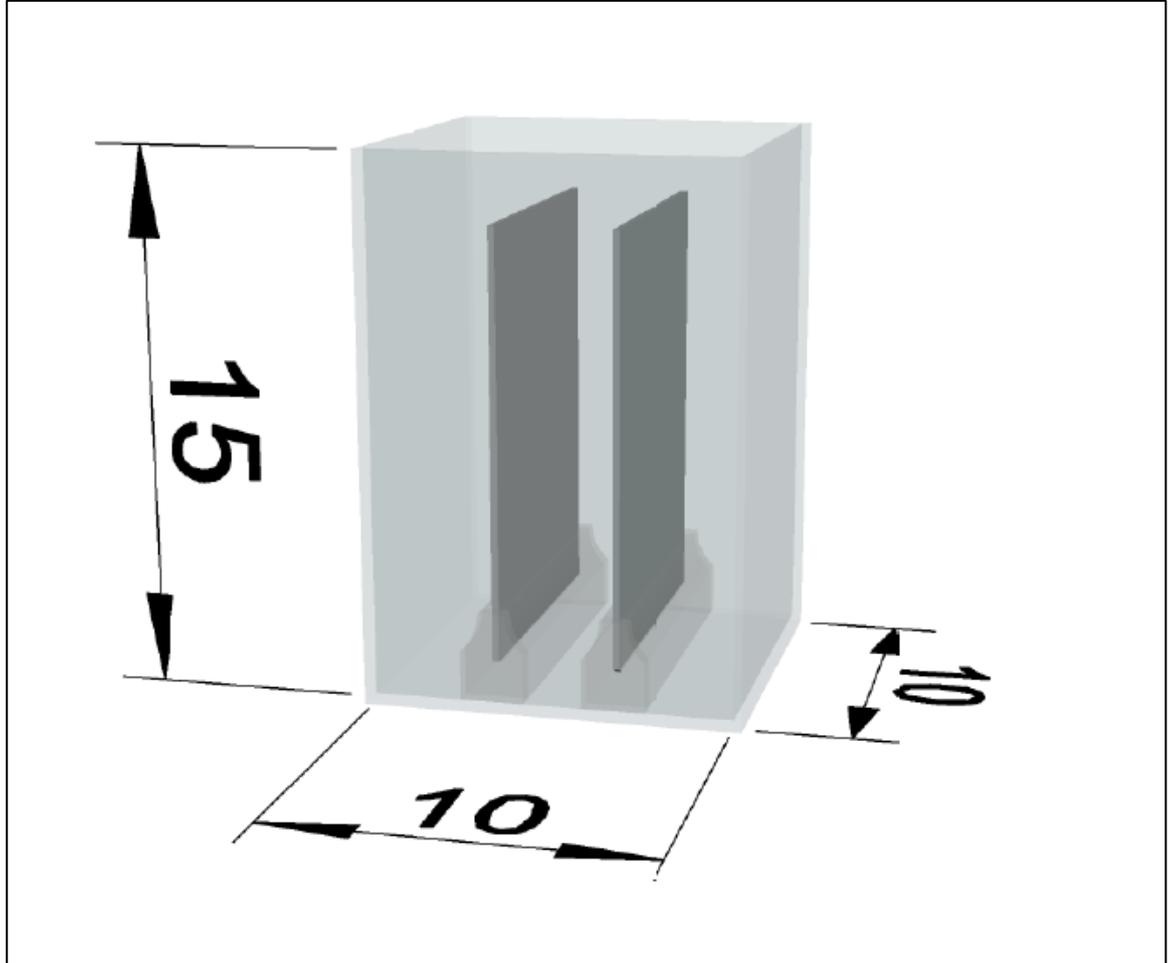
Vista 45° del diseño de Electrocoagulación.



Nota. Vista a perspectiva del reactor Batch y su fuente de alimentación.

Figura 10.

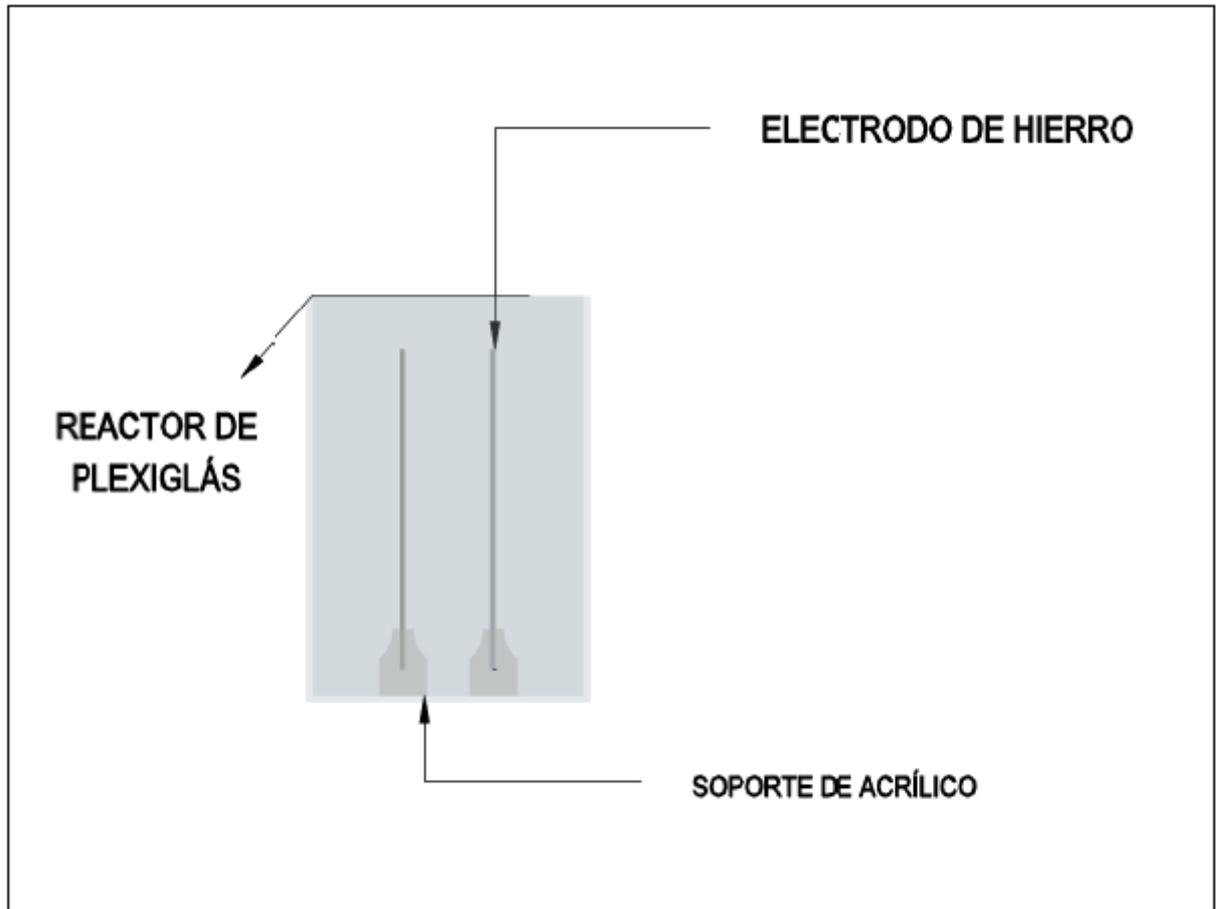
Medidas de la celda de plexiglás escala laboratorio en Reactor tipo Batch (Por Lotes)



Nota. Las medidas corresponden a las caras externas del reactor tipo batch en centímetros.

Figura 11.

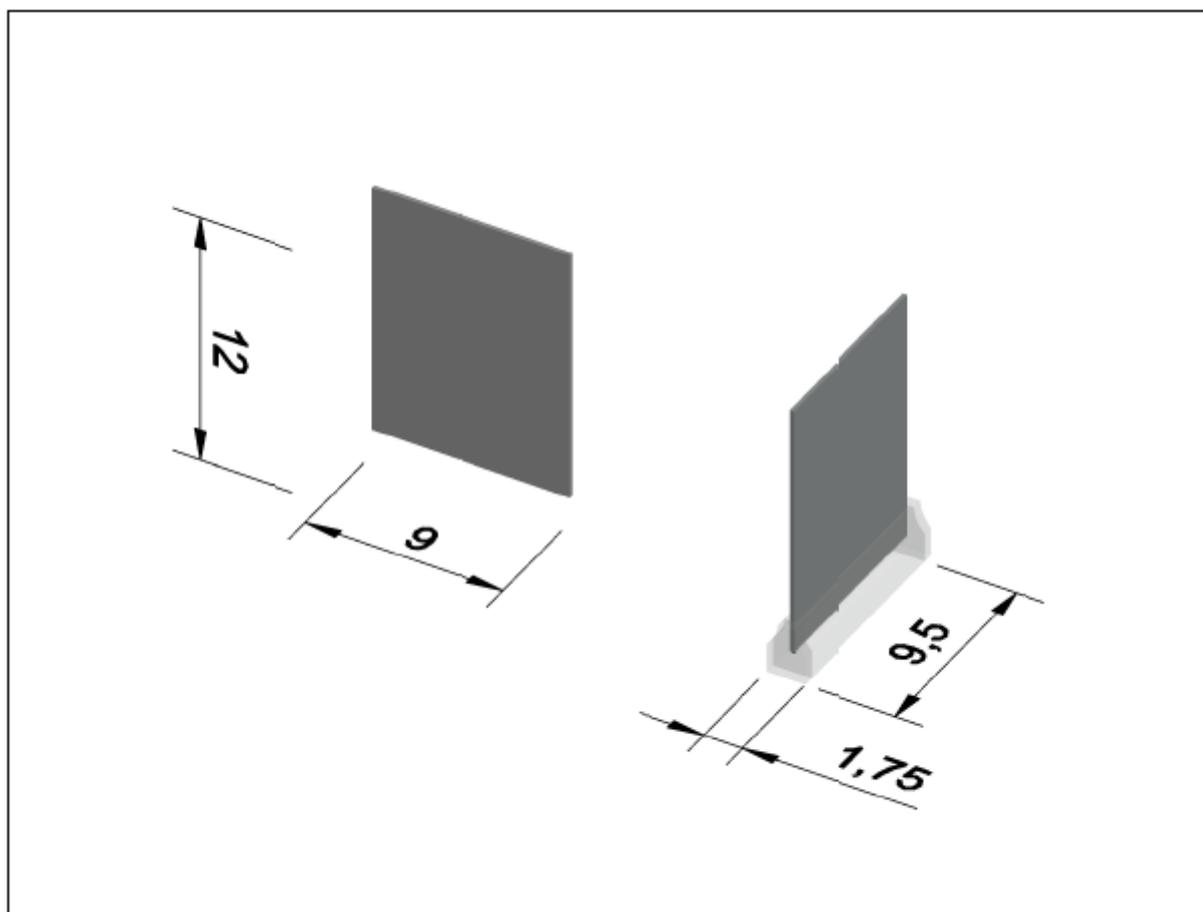
Elementos principales del sistema de electrocoagulación.



Nota. Los símbolos señalados en la figura corresponden a los elementos internos antes de operación del sistema.

Figura 12.

Medidas del electrodo de Hierro y Componentes del Reactor tipo Batch (Por Lotes)



Nota. El gráfico muestra el material de los electrodos, siendo este de Hierro (Fe), el grosor propuesto en el diseño es de 20 mm. Diseño elaborado en AutoCAD.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

Las investigaciones mostraron eficiencias de remoción de Cromo que variaron entre valores de 84%, en la investigación de Apaza et al. (2020) hasta valores de 100% de remoción, como es el caso de Kongjao et al. (2008). Al respecto Cristancho, et al. (2019) identificó una eficiencia del 52,8% para cromo, esto debido a que en su investigación se usaron electrodos mixtos de aluminio y hierro, además, su investigación preciso la remoción de otros contaminantes, principalmente orgánicos. Caso contrario a lo obtenido por Mayta y Mayta (2017) y Bermudez y Salazar (2019) quienes lograron una eficiencia de remoción de cromo de 98% y 99,7%, respectivamente; en estas investigaciones el electrodo usado fue hierro y su objetivo principal era la eliminación de contaminantes metálicos, particularmente, cromo

Agitador magnético: Sobre el estado de agitación de la solución durante el proceso de electrocoagulación, existe igual cantidad de investigaciones quienes priorizan su uso, así como su no uso. Los resultados de las pruebas de remoción mostraron una eficiencia promedio de 97,69% para aquellos investigadores que no usaron este mezclador, en comparación a los 97,47% de remoción obtenida en investigaciones que si usaron agitador magnético a diversas revoluciones por minuto. Por un lado, Beltrán (2015) y Mendocilla (2018) señalan que su uso permite la mezcla homogénea de la muestra, así como una mejor dispersión de los iones desprendidos de los electrodos para facilitar la coagulación, otros investigadores como Perales (2019) y Mayta y Mayta (2017), señalan que su uso no es necesario, por el motivo de que la muestra necesita estar en reposo para poder apreciar si el proceso de electrocoagulación es realmente eficiente, además señalan que eventualmente los iones liberados recorrerán todo el reactor tipo batch, siendo este un sistema discontinuo.

Material del reactor: El reactor tipo batch de plexiglás fue el más utilizado por los investigadores (70,59%), dado a que es más fácil de replicar a nivel laboratorio (Beltrán, 2015), asimismo, el material plexiglás o también conocido acrílico funciona como un aislante ideal, considerando su gran resistencia y que este material permite apreciar sin interferencia los procesos de electrocoagulación (Cristancho et al., 2019).

Material del electrodo: Las investigaciones muestran diversos materiales de electrodos, siendo los principales los electrodos de Hierro y Aluminio, De La Cruz et al. (2017) y Mayta y Mayta (2017), explican que estos electrodos son los más usados por las industrias de curtiembre por su precio y fácil manipulación. Los resultados mostraron una que el uso de los electrodos de aluminio tuvo una remoción promedio de 95,92% valor cercano a los 97,44% alcanzados por Mendocilla (2018). En comparación a la remoción promedio de cromo de 99,15% cuando se usaron electrodos de hierro, similar resultado al obtenido por Bermudez y Salazar (2019), quienes llegaron hasta el 99,7% usaron 2 placas de hierro. Esto se puede explicar debido a que los electrodos de aluminio son más eficientes para la remoción en general de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos (Guerrero, 2017), mientras que los electrodos de hierro son más eficientes para contaminantes metálicos (Perales, 2019), en especial aquellos con valencia Fe^{+3} (Aguilar y Palomino, 2018).

pH: En promedio las investigaciones usaron un pH inicial en la solución con un valor de 5,45, además luego del análisis de correlación se obtuvo una relación inversamente poco significativa, donde pH ácidos mejoraban la remoción de cromo. Esto concuerda con lo señalado por Mendocilla (2018), quien muestra que el pH de 3 logró las mayores eficiencias de remoción, al respecto, Beltrán (2015) explica que el pH influye en la eficiencia de la corriente en el proceso de la solubilidad del metal para formar el hidróxido y que los rangos del pH donde la remoción tiene una mayor eficiencia es son valores entre 5 a 8. Esta

estabilización del proceso de electrocoagulación tiene relación con otras variables como la conductividad pues se sabe que durante el proceso de electrocoagulación el pH tiende a subir, de ocurrir esto de manera descontrolada el pH superaría el valor de 8 con lo que dificultaría la capacidad de conducir iones en la solución y por ende retardar el proceso de electrocoagulación (Carhuancho y Salazar, 2015).

Tiempo: El tiempo de contacto ideal varía de acuerdo a la concentración del contaminante a tratar, de acuerdo a la investigación se encuentran diferencias entre concentraciones de cromo menores a 1000 mg/L y concentraciones mayores a 1000 mg/L. La correlación de Pearson arroja un valor R de 0,912, lo que indica que los mayores tiempos de remoción están directamente relacionados con las concentraciones más elevadas de contaminante. Además, para valores bajo se determinó que un tiempo de 25 minutos sería el más óptimo, mientras que para concentraciones elevadas se requiere de un tiempo de 75 min. Mendocilla (2018) señala que los valores máximos de remoción se alcanzaron a un tiempo de 15 minutos, en donde los valores experimentales se ajustan a una cinética de pseudo primer orden. Mientras que De La Cruz et al. (2017) alcanza esos valores con 35 minutos. En ambos casos la variable que se diferencia fue la concentración, en la investigación de Mendocilla se trabajó con una concentración de 24 mg/L, mientras que para la investigación de De La Cruz, trabajó con una concentración inicial de 57 mg/L. Esto se explica debido a que para lograr remociones eficientes se necesita que los iones liberados en el electrodo puedan formar los compuestos que permitan la coagulación de contaminantes, por lo que este efecto se nota en concentraciones significativamente medibles (Aguilar y Palomino, 2018). Además, luego de los 10 minutos la formación de burbujas de O₂ y H₂ son suficientes para alcanzar cargas de contaminantes inferiores a 10 mg/L, con lo que esta cinética de adsorción va relacionada para cargar mayores (Mayta y Mayta, 2017).

Cantidad de electrodos: La cantidad de electrodos guarda una relación inversamente proporcional a la remoción de cromo, además el uso mayoritario de electrodos es de la cantidad de dos, esto coincide con Bermudez y Salazar (2019), quienes llegaron hasta el 99,7% usaron 2 placas de hierro, mientras que Cristancho, et al. (2019) solo llega a un 54% usando 10 placas. Pero la eficiencia del uso de electrodos depende del volumen del reactor, para De La Cruz et al (2017) la cantidad de electrodos usados dependerá proporcionalmente de la capacidad del reactor, mientras mayor sea la capacidad del reactor mayor será la cantidad de electrodos usados. Mientras que Mayta y Mayta (2017) utilizaron 6 electrodos para un volumen de 1,3 litros, mientras que para un reactor de 3,5 litros se utilizaron 8 electrodos (Aguilar y Palomino, 2018).

Conductividad: La conductividad de la solución cumple papel principal en la remoción de cromo puesto a que permitirá el paso de los iones en toda la solución y así facilitará las reacciones químicas que generan los coagulantes, de este modo Mendocilla (2018) explica que controlar la concentración de electrolitos es importante para favorecer la remoción de contaminantes. La investigación muestra que el aumento de concentración no siempre conlleva a una buena remoción de cromo, además se concluye un promedio eficiente de remoción en valores de 27,5 y 30 mS/cm, resultado que coincide con lo señalado por Mayta y Mayta (2017), quienes lograron una remoción del 99% con una conductividad de 36 mS/cm. Sobre este último se observa la reducción de la conductividad durante el proceso de Electrocoagulación, al respecto Carhuancho y Salazar (2015) señalan a que esto es debido a que los electrodos de hierro tienden a reducir la conductividad de la solución con la generación de compuestos que atrapan iones libres.

Densidad de corriente: La densidad de corriente muestra una relación medianamente significativa (-0,55), con lo que se puede apreciar que el aumento de densidad

de corriente permite una mejor remoción hasta cierta cantidad, luego el aumento de la densidad provocará deficiencias en la remoción de cromo, siendo el valor óptimo de 25 mA/cm². Esto discrepa con lo expresado por Carhuancho y Alcántara (2015) quienes afirman que mayores remociones fueron alcanzadas con mayores densidades de corrientes, esto se puede explicar a que su investigación no trabajó con la remoción de contaminantes metálicos. Al respecto, De La Cruz et al. (2018) explica que una densidad de corriente demasiado grande producirá una disminución significativa en la eficiencia. Este parámetro asegura la liberación de iones de Fe⁺² y con esta cantidad se podrá remover los contaminantes de Cromo Mayta y Mayta (2017).

Finalmente, el diseño alcanzado en el software Autocad cumple con los requerimientos mínimos para una remoción eficiente de cromo, contando con áreas y volúmenes suficientemente amplios para el proceso de electrocoagulación, contando con un volumen de 1 litro, en un cubo de acrílico de 10 x 10 cm. Diseño que es similar al de Beltrán (2015) donde utilizó un reactor cúbico rectangular para optimizar sus procesos. La selección de electrodos, así como el soporte permiten la distribución uniforme de los iones desprendidos del proceso de electrocoagulación, contando con dos electrodos separados entre sí por 5 cm, De La Cruz et al. (2018) señala que esta cantidad de electrodos es la adecuada para una capacidad de reactor baja, además coincide en el uso de soportes estabilizadores pegados en la placa inferior, a diferencia de Carhuancho y Salazar (2015) quienes usaron soportes horizontales.

4.2. Conclusiones

Se identificaron las eficiencias de remoción de los diversos estudios de sistemas de electrocoagulación para la remoción de Cromo variando entre eficiencias de 84% hasta eficiencias cercanas al 100%.

Se determinaron que las condiciones de operación óptimas para la remoción de cromo son una solución con un pH ácido en el rango de 5 y 8, y una conductividad entre 27,5 mS/cm y 30 mS/cm. Además, la energía proporcionada debe tener una densidad de corriente promedio alrededor de 25 mA/cm², además de un tiempo de remoción variable de acuerdo a la concentración inicial de contaminante que en promedio es de 25 – 30 minutos. Sobre el diseño del sistema se prioriza el uso de electrodos de hierro para remoción de contaminantes metálicos, especialmente el cromo, además del uso de un reactor tipo batch de acrílico por sus propiedades y precio, la cantidad de electrodos para un volumen bajo es de dos, mientras que se recomienda el no uso de un sistema de agitación.

Se diseñó un sistema de electrocoagulación en Autocad, donde se puede observar el volumen y dimensiones del reactor, así como de sus compuestos internos, además de contar con una capacidad de 1 litro, y del espacio para dos electrodos. El sistema de voltaje va conectado en cercanía hacia los electrodos con una conexión monopolar.

REFERENCIAS

- Acosta Niño, G. E., Coy Barrera, C. A., Bourdón García, A., & Cuervo Lumbaqué, E. (2013). La Electrocoagulación como un Tratamiento Eficiente para la Remoción de Metales Pesados Presentes en Aguas Residuales. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 9(2), Art. 2. <https://doi.org/10.18359/rfcb.389>
- Aguilar, E. (2015). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 18(35), Art. 35. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v18i35.11843>
- Aguilar Mancco, F. R., & Palomino Cartolin, A. (2018). *Evaluación de un Sistema de Electrocoagulación de Flujo Continuo para la Remoción de Cromo (VI) y DQO de Curtiembre-Huachipa-2018*. [Thesis, Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/27948>
- Arias Cepeda, W. G. (2013). *Remoción de Cromo (III) y DQO a través de electrocoagulación en aguas residuales de la industria curtiembre haciendo uso racional de la energía* [Master's Thesis, Universidad Libre]. <http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/7834>
- Beltrán González, K. E. (2016). *Diseño conceptual y construcción de un electrocoagulador controlado por Labview* [Thesis, Universidad Santo Tomas]. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2959>
- Bermudez-Colina, Y., Mejías-Acosta, A. A., Bermudez-Colina, Y., & Mejías-Acosta, A. A. (2018). Medición de la responsabilidad social empresarial: Casos en pequeñas

- empresas Latinoamericanas. *Ingeniería Industrial*, 39(3), 315-325.
<http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/45457>
- Bolaños Díaz, R., & Calderón Cahua, M. (2014). Introducción al meta-análisis tradicional. *Revista de Gastroenterología del Perú*, 34(1), 45-51.
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1022-51292014000100007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Campos Cuenca, V. J. J. (2013). *Análisis y mejora de procesos de una curtiembre ubicada en la ciudad de Trujillo* [Thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú].
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/4898>
- Carhuancho Alcantara, H. M., & Salazar Escobar, J. L. (2015). *Estudio del efecto de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales a nivel de laboratorio en la planta de tratamiento de aguas residuales convicorti en la ciudad de trujillo—La libertad*. [Thesis, Universidad Nacional de Trujillo].
<http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/3590>
- Carreño Sayago, U. F. (2016). Diseño y evaluación de un biosistema de tratamiento a escala piloto de aguas de curtiembres a través de la *Eichhornia crassipes*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(2), 74-81.
<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n2.52271>
- Chávez Porras, Á. (2010). Descripción de la nocividad del cromo proveniente de la industria curtiembre y de las posibles formas de removerlo. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17), 41-49.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1692-33242010000200004&lng=en&nrm=iso&tlng=es

- Gómez-Luna, E., Fernando-Navas, D., Aponte-Mayor, G., & Betancurt Buitrago, L. A. (2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *DYNA*, 81(184), 158-163. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.37066>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta edición). McGraw-Hill Education. <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2005). *Políticas e instrumentos para mejorar la gestión ambiental en las PYMES y promover la oferta de bienes y servicios: el caso mexicano* (Serie N°95). Naciones Unidas. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/5633>
- Cristancho, D., Pinto, L. y Tique J. (2019). Evaluación de la eficiencia de un sistema de electrocoagulación en los vertimientos de curtiembres en el sector de Villapinzón (Cundinamarca). *Revista Mutis*, 9(2), 34-48. <https://doi.org/10.21789/22561498.1590>
- Cuberos, E., Rodriguez, A. y Prieto, E. (2009) Niveles de cromo y alteraciones de salud en una población expuesta a las actividades de curtiembres en Bogotá, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 11 (2), 278-289. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-523820>
- De la cruz, J., Silva, E. e Inca, J. (2017). *Tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembre mediante el método de electrocoagulación para la reducción de la Demanda Química de Oxígeno y Cromo*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Callao] <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/3594>

- Ferro, D., Castiblanco, J., Agudelo, R. y Ruiz, L. (2021). Evaluación de un sistema de centrifugación para el secado de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales en la curtiembre El Escorpión del municipio de Villapinzón, Cundinamarca. *Revista vínculos*, 16(2), 242–251.
<https://doi.org/10.14483/2322939X.15188>
- Frecia, G. (2017). *Gestión del medio ambiente, el futuro de las curtiembres de la cuenca matanza riachuelo: Estudio comparado Argentina – Japón*. [Tesis de Doctorado, Universidad De Buenos Aires]. http://bibliotecadigital.econ.uba.ar/econ/collection/tesis/document/1501-1262_FreciaGD
- Guerrero, A. (2017). *Influencia del tiempo y voltaje en la disminución de la carga orgánica por electrocoagulación del agua residual de la curtiembre Cuenca S.A.C.* [Tesis de Pregrado, Universidad Privada Cesar Vallejo].
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/26426>
- Hernández M., Ruiz L. y Wilches M. (2007). *Bioingeniería VI. Fundamentos de instrumentación para la química clínica y las radiaciones ionizantes*. Editorial Universidad de Antioquia. http://www.sancristoballibros.com/libro/bioingenieria-vi-fundamentos-de-instrumentacion-para-la-quimica-clinica-y-las-radiaciones-ionizantes_5081
- Hernández, R. y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la Investigación. Las rutas cuantitativas, cualitativas y mixtas*. McGraw-Hill.
<https://virtual.cuautitlan.unam.mx/rudics/?p=2612>
- Lazo, E. (2017). *Evaluación de la contaminación ambiental generado por efluentes Industriales en el proceso productivo de una curtiembre de mediana capacidad del*

- parque industrial de Rio Seco, Arequipa*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2413>
- Lorezon, E. (2020). *Sistemas y organizaciones*. (primera edición). Editorial de la Universidad de La Plata. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/99629>
- Martínez, S. y Romero, J. (2018). Revisión del estado actual de la industria de las curtiembres en sus procesos y productos: un análisis de su competitividad. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 26(1), 113-124. <https://doi.org/10.18359/rfce.2357>
- Mayta, R. y Mayta, J. (2017). Remoción de Cromo y Demanda Química de Oxígeno de aguas residuales de Curtiembre por Electrocoagulación. *Revista Sociedad Química del Perú*, 48(3), 333-340. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2017000300008&script=sci_abstract
- Mendocilla, C. (2018). *Influencia del PH y el tiempo en la remoción de cromo hexavalente presente en soluciones acuosas utilizando la electrocoagulación*. [Tesis de Pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/25059>
- Mendoza, J. (2019). *Influencia de la intensidad de luz y pH en la remoción de materia orgánica (DBO₅), de efluentes de remojo de curtiembre, utilizando microalga chlorella vulgaris, a nivel laboratorio*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/UNJFSC/2985>
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (2021). *Informe Anual de la ONUDI 2020*. Sección de Servicios en inglés, Publicaciones y Biblioteca, Oficina

de las Naciones Unidas en Viena.

https://www.unido.org/sites/default/files/files/2021-04/UNIDO_AR2020_SP_Rev1.pdf

Organización Panamericana de la Salud (2000). *La salud y el ambiente en el desarrollo sostenible* (Publicación Científica No. 572). Oficina Sanitaria Panamericana. <https://www1.paho.org/hq/dmdocuments/salud-ambiente-desarrollo-sostenible2000.pdf>

Orozco L. (2004). *Planificación de manejo diversificado de bosque Latifoliados Húmedos Tropicales*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), https://books.google.com.pe/books/about/Planificaci%C3%B3n_del_manejo_diversificado.html?hl=es&id=OAGzpkp6wJS4C&redir_esc=y

Palomino, G. y Ramos, C. (2021). *Revisión sistemática sobre la aplicación de electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea*. [Tesis de Pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/70597>

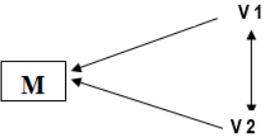
Perales, J. (2019). *Influencia del proceso de electrocoagulación en la remoción de cromo hexavalente (Cr+6) en soluciones acuosas a nivel de laboratorio en la Universidad Continental, 2019*. [Tesis de Pregrado, Universidad Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/7711>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2006). *Estado de la producción sostenible en el Mediterráneo* (Informe N° 165). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente / Plan de Acción para el Mediterráneo (PNUMA/PAM). <https://digitallibrary.un.org/record/597212/files/mts165spa.pdf>

- Ramírez, J. Martínez, O. y Fernández, L. (2013). Remoción de contaminantes en aguas residuales industriales empleando carbón activado de pino pátula. *Revista Avances investigación en ingeniería*. 10(1), 42-49.
<https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/avances/article/view/2725/2145>
- Rey de Castro, A. (2013). *Recuperación de cromo (III) de efluentes de curtido para control ambiental y optimización del proceso productivo*. [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica Del Perú].
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/5123>
- Rizo J. (2015). *Técnicas de investigación documental*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua. <https://repositorio.unan.edu.ni/12168/1/100795.pdf>
- Rosas, Y. (2019). *Caracterización y remoción de Cromo (III) de aguas residuales de curtiembres del parque industrial de rio seco utilizando hueso de olivo (Olea europea) procesado como biosorbente*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Agustín De Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/9250>

ANEXOS

ANEXO N.º1: Matriz de consistencia, operacionalización de variables e instrumentos.

TÍTULO: DISEÑO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE CROMO MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN PARA CURTIEMBRES, TRUJILLO-2022					
PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES	METODOLOGÍA	POBLACIÓN
<p>¿Qué diseño de un sistema de electrocoagulación será el más eficiente para la remoción de cromo de aguas residuales de curtiembres en la ciudad de Trujillo en el año 2022?</p>	<p>General: Será posible diseñar un sistema de electrocoagulación para la remoción eficiente de cromo de aguas residuales de curtiembres en la ciudad de Trujillo.</p>	<p>General: Diseñar un sistema de Electrocoagulación para la remoción eficiente de Cromo para aguas residuales de curtiembre en la ciudad de Trujillo.</p> <p>Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Identificar las eficiencias de remoción de los diversos estudios de sistemas de electrocoagulación para la remoción de Cromo. - Determinar las condiciones de diseño más eficientes para la remoción de Cromo en aguas residuales de curtiembre. - Elaborar el diseño gráfico del sistema de electrocoagulación en AutoCAD 	<p>Variable 1: Eficiencia de Remoción de Cromo</p> <p>Variable 2: Sistema de Electrocoagulación</p>	<p>Tipo de investigación: No experimental</p> <p>Diseño: Descriptiva explicativo</p>  <p>Donde: M: Estudios de diseños de sistemas de Electrocoagulación. V1 = Eficiencia de remoción del Cromo V2 = Sistema de electrocoagulación</p> <p>Técnica: Análisis Documental</p> <p>Instrumento: Matriz de Homogenización Matriz de Búsqueda de Información</p> <p>Método de análisis de datos: Mixto (cuantitativo/cualitativo)</p>	<p>Población: La población de la investigación corresponde al total de las investigaciones de electrocoagulación aplicadas en el tratamiento de A.R. de curtiembre</p> <p>Muestra Técnica de muestreo: En esta presente investigación la muestra está constituida por toda la población objetivo, es decir 17 investigaciones.</p>

ANEXO N.º2: Matriz de operacionalización de variables

TÍTULO: DISEÑO DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN DE CROMO MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN PARA CURTIEMBRES, TRUJILLO-2022						
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN	DE
Eficiencia de Remoción de Cromo	La remoción de un metal como el cromo, es el comportamiento del material en la remoción de cada metal de interés, lo cual les permite establecer las isotermas de adsorción de cada caso; pero deja un vacío en cuanto a la interacción que tienen los contaminantes en sistemas reales, donde existirán más de un tipo de moléculas a ser adsorbidas (Ramírez et. al, 2013).	Porcentaje de remoción de Cromo obtenido como proceso final del tratamiento propuesto para su eliminación, ya sea por absorción, adsorción o filtración.	Porcentaje de Remoción	% de Remoción = (Concentración inicial de Cromo – Concentración Final de Cromo) / Concentración inicial de Cromo	Ordinal	
			Variables cualitativas	Valores de las condiciones técnicas de operación con resultado numérico (material de electrodo, tipo de reactor)		
Sistema de Electrocoagulación	Un sistema de electrocoagulación es el conjunto de elementos constantes que abarcan electrodos, corriente, reactor y demás componentes. Parte de la disolución, los ánodos que han desapareciendo a medida que transcurre el tratamiento, llegando un momento en el que es necesaria su reposición (ánodos de sacrificio). Necesitando también una carga de corriente según las necesidades de electrocoagulación (Aguilar, 2015).	Diseño visual del sistema de electrocoagulación, así como las condiciones técnicas para su operación y uso como tratamiento para aguas residuales de curtiembre.	Variables cuantitativas	Valores de las condiciones técnicas de operación con resultado numérico (pH, conductividad, temperatura, tiempo)	Ordinal	
			Diseño visual	Modelamiento 3D en AutoCAD		