



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria

**EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO POR MEDIO
DE UN PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN UTILIZANDO UN
PROTOTIPO DE CELDA ELECTROQUÍMICA TIPO BATCH**

Ing. Alexander Aldemaro Ramírez Ortiz

Asesorado por el Ing. Félix Allan Douglas Aguilar Carrera

Guatemala, noviembre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO POR MEDIO
DE UN PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN UTILIZANDO UN
PROTOTIPO DE CELDA ELECTROQUÍMICA TIPO BATCH**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. ALEXANDER ALDEMARO RAMÍREZ ORTIZ
ASESORADO POR EL ING. FÉLIX AGUILAR CARRERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA SANITARIA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

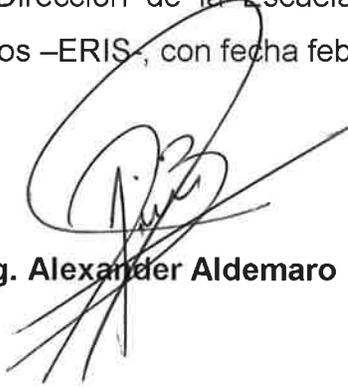
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Adán Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	Ing. Félix Aguilar Carrera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EFICIENCIA DE LA REMOCIÓN DE HIERRO Y MANGANESO POR MEDIO DE UN PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN UTILIZANDO UN PROTOTIPO DE CELDA ELECTROQUÍMICA TIPO BATCH

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y de Recursos Hídricos –ERIS–, con fecha febrero de 2012.



Ing. Alexander Aldemaro Ramirez Ortiz

Guatemala, 15 de noviembre del 2012

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hídricos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de Prefabricados, CII
Ciudad universitaria Zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C..A.

Tel. (502) 24188000,
Ext.86212 y 86213
(502) 24189138
(502) 24189140

Telfax (502) 24189124

www.ingenieria-usac.edu.gt

MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos "ERIS"
Facultad de Ingeniería, USAC

Habiendo revisado el documento titulado:

"Eficiencia de la remoción de hierro y manganeso por medio de un proceso de electrocoagulación utilizando un prototipo de celda electroquímica tipo Batch".

Elaborado por el Ing. Civil Alexander Aldemaro Ramírez Ortiz, como parte de su Estudio Especial, y como requisito para optar al grado académico de Maestro en Ingeniería Sanitaria; mediante la presente me permito informarle mi satisfacción con su contenido y por lo tanto, le comunico que dicho documento cuenta con mi aprobación.

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

Atentamente.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS".

Msc. Ing. Félix Allan Douglas Aguilar Carrera
Asesor del estudio

Guatemala, 16 de noviembre del 2012

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hídricos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de Prefabricados,
CII
Ciudad universitaria Zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 24188000,
Ext.86212 y 86213
(502) 24189138
(502) 24189140

Telfax (502) 24189124

www.ingenieria-usac.edu.gt

Señores
Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos "ERIS"
Facultad de ingeniería, USAC

Respetuosamente les comunico que he revisado, en mi
calidad de Coordinador de la Maestría de Ingeniería Sanitaria,
el trabajo de Estudio Especial titulado:

**"Eficiencia de la remoción de hierro y manganeso por
medio de un proceso de electrocoagulación utilizando un
prototipo de celda electroquímica tipo Batch".**

Presentado por el estudiante,

Ingeniero Civil Alexander Aldemaro Ramirez Ortiz

En tal virtud, manifiesto que el estudiante cumplió con los
requisitos exigidos por la Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) y la Universidad de
San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio, en
forma satisfactoria.

Agradeciéndoles la atención a la presente, se suscribe de
ustedes,

Atentamente.

Msc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría de Ingeniería Sanitaria

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hídricos

Edificio de ERIS,
Instalaciones de Prefabricados, CII
Ciudad Universitaria Zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel (502) 24188000,
Ext. 86212 y 86213
(502) 24189138
(502) 24189140

Telefax (502) 24189124

www.ingenieria-usac.edu.gt

El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los siguientes profesores: MSc. Ing. Félix Allan Douglas Aguilar Carrera, MSc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, MSc. Ing. Zenón Much Santos, así como el visto bueno del coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria, Msc. Ing Adán Ernesto Pocasangre Collazos, y la revisión de lingüística efectuada por la Licenciada Magister en Literatura Hispanoamericana y Posgrado de Lingüística del Español Aura Mayorga Salguero, colegiada No. 2702; del trabajo del estudiante: **Ingeniero Civil Alexander Aldemaro Ramírez Ortiz**, Titulado:

“Eficiencia de la remoción de hierro y manganeso por medio de un proceso de electrocoagulación utilizando un prototipo de celda electroquímica tipo Batch”.

En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo.

IMPRÍMASE

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos.

Guatemala, 19 de noviembre del 2012.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Mi fortaleza
El Salvador	Mi cuna, mi niñez, mi país
Mi familia	Mi motivación
USAC	Mi casa
ERIS	Mi escuela
Guatemala	Mi oportunidad de vida

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Porque Él supo elegir este momento para alcanzar la meta propuesta.
Mi esposa, mi madre, mis hijos y hermanos	Por la paciencia y motivación.
Mi familia política, sobre todo a mis suegros y mis cuñados Juan y Carlos	Por la ayuda en el tramo final del presente documento.
Mi asesor Félix	Por el apoyo y ayuda en el desarrollo de la investigación.
Mis amigos	Manuel José y Edgar, por darme el espacio y la oportunidad de finalizar la investigación.
Todos aquellos que me ayudaron	Por creer que podía llegar a alcanzar esta meta.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. ASPECTOS TEÓRICOS	1
1.1. Aplicaciones de la electrocoagulación	1
1.2. Principios del proceso de electrocoagulación.....	4
1.2.1. Potencial en una celda de electrocoagulación.....	8
1.2.2. Tipos de reactores para electrocoagulación	9
1.3. Presencia de Fe ⁺² y Mn ⁺² en concentraciones no deseables	10
1.3.1. Comentarios sobre las concentraciones de Fe y Mn, según publicaciones de la OMS/OPS.....	11
1.4. Teoría de diseño de experimentos	13
2. CASO DE ESTUDIO	17
2.1. Planteamiento del estudio y desarrollo experimental.....	17
2.1.1. Factores controlables	17
2.1.1.1. Voltajes	18
2.1.1.2. Consumo de electrodos	18
2.1.1.3. Densidad de corriente	18
2.1.1.4. Distancia entre electrodos.....	18
2.1.1.5. Materiales de electrodos	18
2.1.2. Variables de respuesta	19

2.1.2.1.	Porcentaje de remoción de hierro y manganeso	19
2.1.2.2.	pH	19
2.1.2.3.	Conductividad	20
2.1.3.	Costos	20
2.1.3.1.	Consumo de energía eléctrica	20
2.1.3.2.	Análisis preliminar de costos generales	21
2.2.	Análisis estadístico y económico	22
2.2.1.	Muestreo y tabulación	22
2.2.2.	Análisis de datos de los resultados del proceso de tratamiento	23
2.2.2.1.	Productos esperados del análisis de datos	25
2.2.2.2.	Análisis de costos	25
3.	METODOLOGÍA	27
3.1.	Desarrollo experimental	27
3.1.1.	Descripción de la construcción del proceso	27
3.1.2.	Componentes	28
3.1.2.1.	Fuente de poder	28
3.1.2.2.	Circuito eléctrico	29
3.1.2.3.	Celda electroquímica	29
3.1.2.3.1.	Diseño de celda	29
3.1.2.3.2.	Soporte de electrodos	32
3.1.2.3.3.	Electrodos	32
3.1.3.	Variaciones al planteamiento original	33
3.1.3.1.	Placas de electrodos	33
3.1.3.1.1.	Material del ánodo	33
3.1.3.1.2.	Dimensionamiento, número y distancia entre placas	35

3.1.3.2.	Variación del planteamiento estadístico derivado de los cambios en las placas.....	36
3.1.3.2.1.	Tiempo de retención.....	36
3.1.3.2.2.	Voltaje.....	36
3.1.3.2.3.	Planteamiento estadístico final.....	37
3.2.	Procedimiento en condiciones aleatorias con muestras controladas en laboratorio	37
3.3.	Proceso con condiciones no controladas en laboratorio.....	39
4.	RESULTADOS	41
4.1.	Resultados de las corridas realizadas	41
4.2.	Principales observaciones del proceso experimental de remoción de Fe y Mn	47
5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	49
5.1.	Análisis del diseño de experimentos.....	50
5.1.1.	ANOVA de pH.....	50
5.1.1.1.	Análisis de varianza	51
5.1.1.2.	Análisis de gráfico de datos	53
5.1.2.	ANOVA de Fe	54
5.1.2.1.	Análisis de varianza	54
5.1.2.2.	Análisis de gráfico de datos	56
5.1.3.	ANOVA de Mn	58
5.1.3.1.	Análisis de varianza	58
5.1.3.2.	Análisis de gráfico de datos	61
5.1.4.	ANOVA de conductividad.....	62
5.1.4.1.	Análisis de varianza.....	62
5.1.4.2.	Análisis de gráfico de datos.....	65

5.2.	Análisis de costos.....	66
5.2.1.	Costos de materiales de construcción de la celda optimizada.....	66
5.2.1.1.	Costos de operación.....	68
5.2.1.1.1.	Energía eléctrica.....	68
5.2.1.2.	Desgaste de placas	70
5.2.1.3.	Mantenimiento.....	70
5.2.2.	Análisis de factibilidad financiera.....	71
	CONCLUSIONES.....	73
	RECOMENDACIONES	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Sistema de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro	XIII
2.	Clasificación de sistemas de reactores de electrocoagulación.....	10
3.	Diagrama de estructura del prototipo.....	28
4.	Dimensionamiento de la celda.....	30
5.	Equipo que integra el prototipo.....	32
6.	Presentación de placas de puestas de pararrayos en terrenos de alta resistividad.....	34
7.	Ubicación de los puntos de muestreo en condominio Terravista.....	47
8.	Diagrama de Pareto estandarizado para aumento del pH.....	52
9.	Gráfica de efectos principales para aumento del pH.....	53
10.	Diagrama de Pareto estandarizado para remoción de Fe.....	56
11.	Gráfica de efectos principales para remoción de Fe.....	57
12.	Diagrama de Pareto estandarizado para remoción de Mn.....	60
13.	Gráfica de efectos principales para remoción de Mn.....	61
14.	Diagrama de Pareto estandarizado para reducción de conductividad.....	64
15.	Gráfica de efectos principales para reducción de conductividad.....	65

TABLAS

I.	Límites especificados en la norma COGUANOR 29001, para Fe y Mn.....	XIX
II.	Resultados de experimentos desarrollados alrededor de los procesos de electrocoagulación.....	3
III.	Datos a ser considerados en el análisis de costos.....	21
IV.	Factores controlables y variables de respuesta definidos para el análisis de los datos.....	23
V.	Planteamiento de la Anova.....	24
VI.	Planteamiento final para el análisis estadístico del experimento....	40
VII.	Distribución de los ensayos realizados.....	42
VIII.	Resultados de los ensayos en cuanto a pH.....	43
IX.	Resultados de los ensayos en cuanto a variación de conductividad...	44
X.	Resultados de los ensayos en cuanto a Fe y Mn.....	45
XI.	Resultados en cuanto a Fe y Mn del pozo No. 1 del condominio Terravista.....	46
XII.	Resultados en cuanto a Fe y Mn del pozo No. 2 del condominio Terravista.....	46
XIII.	Anova del pH.....	51
XIV.	Anova del Fe.....	55
XV.	Anova del Mn.....	59
XVI.	Anova de la conductividad.....	63
XVII.	Costos de construcción del prototipo final.....	67
XVIII.	Materiales y herramientas adicionales utilizadas en la inversión original para construcción del prototipo.....	68
XIX.	Análisis de factibilidad financiera.....	71

GLOSARIO

Electrofloculación	Proceso de tratamiento de aguas que aprovecha la desestabilización de las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, disgregadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales.
Norma COGUANOR 98001	Norma guatemalteca acreditada en el Ministerio de Economía, especificada para el agua para consumo humano.
ANOVA	Abreviatura de análisis de varianza, llamado así porque utiliza coeficientes de varianzas para probar hipótesis en igualdad de medidas.
Diagrama de Pareto	Representa la realidad observada de los efectos de manera descriptiva, sin considerar supuestos distribucionales.

RESUMEN

La presencia de hierro y manganeso en el agua, fuera de los estándares de calidad para consumo humano, es un problema que en los últimos años ha adquirido una notoria relevancia, debido principalmente a la necesidad de tener que captar fuentes de agua que presentan altas concentraciones, a fin de poder atender la demanda creciente de agua para consumo humano.

Ante esta situación, la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria –ERIS- de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se ha trazado como una línea de investigación, el desarrollar estudios que generen conocimientos sobre tecnologías que permitan suministrar agua que cumpla los estándares de calidad exigidos por las normativas nacionales y de referencia, como las guías de la Organización Panamericana de la Salud; siendo el presente documento, uno de estos estudios, en el cual se realizará el análisis de la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de hierro y manganeso presente en el agua, pretendiendo su implementación en filtros domiciliarios.

Para el desarrollo de la investigación, se estableció como variables, el porcentaje de remoción de hierro y manganeso, pH y conductividad y las limitaciones siguientes: voltaje, distancia entre las placas, tiempo de retención, material de placas y número de placas.

Para el diseño experimental, se adoptó el diseño experimental fraccional fraccionado, en el que se definió un total de 32 análisis de laboratorio. Este diseño experimental fue escogido porque somete a estudio los efectos producidos por más de dos factores en cada ensayo completo o réplica, lo cual

garantiza un ahorro en términos de recursos estadísticos, pues permite alcanzar los mismos resultados con la mitad de las repeticiones que se implementarían con otros métodos. En esta parte se auxilió del software estadístico Statgraphics¹.

La investigación se desarrolló sobre la creación de un prototipo de una celda tipo Batch, con condiciones inicialmente aleatorias sobre la creación de soluciones madre. Entendiendo que la metodología propuesta debía de contemplar un análisis aproximado de las condiciones reales, se realizó, entre otros aspectos, un análisis financiero que da una idea conforme a la eficiencia de remoción de Fe y Mn.

Al haber obtenido las condiciones óptimas de funcionamiento del prototipo luego del proceso estadístico, se presentó una nueva serie de análisis que generaron un grupo de datos que expresan los valores de eficiencia del sistema bajo las condiciones específicas del experimento; en esta última fase las corridas realizadas con agua de una fuente subterránea, en el municipio de Fraijanes.

Del análisis de los datos obtenidos se definieron varias conclusiones, de las cuales se consideran más relevantes: la eficiencia de remoción de Fe es del orden promedio de 45.97 %, lo cual puede ser considerado muy bueno; la eficiencia de remoción de Mn es de 24.27 %, que puede verse como muy eficiente; el análisis financiero definió que la implementación de este modelo requiere un alto costo de mantenimiento sobre todo por el desgaste de placas.

¹ Statgraphics, Centurion XVI.I; Statpoint Technologies Inc.

INTRODUCCIÓN

El presente documento trata sobre la investigación del tratamiento de agua por medio de electrofloculación, que es un tipo de tecnología que involucra procesos electroquímicos, concepto que por sí solo implica una transformación de energía, aprovechando las condiciones conductivas de los materiales.

La variación energética indicada es aprovechada para lograr una modificación de las condiciones de la calidad fisicoquímica del agua a tratar, para este caso son las concentraciones de hierro y manganeso.

Se ha pretendido realizar reducciones que permitan llevar diversas concentraciones dentro y fuera de la norma COGUANOR 29001, que rige las condiciones de calidad de agua para consumo humano en Guatemala, a niveles que permitan visualizar el nivel de reducción. Aunque el procedimiento seguido para la investigación es experimental y los resultados definen datos en condiciones controladas, se puede decir que estos podrán ser utilizados en el futuro, para condiciones diversas en la línea de esta misma tecnología.

Dentro de los alcances de la investigación se implementó un diseño estadístico factorial fraccionado 2^{K-P} y la utilización del software Statgraphics para el desarrollo de experimentos, lo cual permitió tomar un proceso aleatorio que le da un alcance adicional sobre el nivel de certeza de los resultados. Igualmente, debe de indicarse que a pesar de las condiciones particulares del proceso llevado, se han tomado consideraciones de tipo financiero para identificar montos estimados de la implementación del mismo.

Las conclusiones con que la investigación finaliza pueden considerarse alentadoras, pero será necesario cambiar el enfoque y las condiciones de tratamiento si se hacen nuevos estudios, como se describe a detalle en la investigación.

OBJETIVOS

General

Estudiar el efecto de la aplicación de electrocoagulación sobre la remoción de hierro y manganeso que no excedan 3 mg/l y 21 mg/l sus concentraciones en agua potable, respectivamente; a fin de llevarlos a los límites máximos exigibles en la Norma COGUANOR 290001, en un prototipo experimental de celda tipo batch.

Específicos

1. Dimensionar una celda electroquímica destinada a la remoción de hierro y manganeso dentro de un prototipo experimental de reactor tipo Batch.
2. Determinar los valores de pH, densidad de corriente y conductividad, en los que una celda electroquímica puede trabajar de forma óptima para remover hierro y manganeso, siempre que sus concentraciones no superen los 3 mg/l y 21 mg/l, respectivamente, a fin de llevarlos a los límites máximos permisibles de la Norma COGUANOR 290001.
3. Determinar el porcentaje de remoción de hierro y manganeso en aguas que no superen valores de 3 mg/l y 21 mg/l, respectivamente.

HIPÓTESIS

Por medio del uso de un prototipo de celda electroquímica (proceso de electrocoagulación) es posible reducir las concentraciones de hierro de 3 mg/l a 1 mg/l, así como la concentración de manganeso de 21 mg/l a 0.50 mg/l, en agua para suministro humano, para que esta cumpla con la Norma guatemalteca COGUANOR 29001.

ANTECEDENTES

La electrocoagulación es una tecnología emergente que es conocida desde principios del siglo veinte, sin embargo, ha sido en los últimos cuarenta años introducida en procesos de tratamiento de aguas residuales industriales y con menor frecuencia en agua para consumo humano, entre otros en remoción de flúor y arsénico; pero también como complemento para potabilización de aguas superficiales con alta presencia de color, turbiedad y materia orgánica en plantas para atención de emergencias.

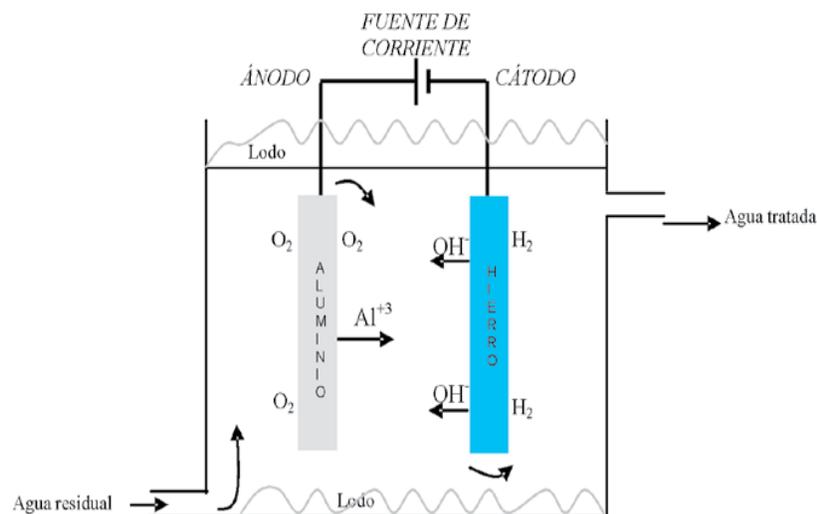
De las investigaciones realizadas que dan pie al presente documento, se ha podido identificar que este método de remoción puede tener bondades relacionadas con la disminución costos, en cuanto a superficie, tiempo de residencia de reacción e infraestructura. A pesar de lo anterior, en todos los casos, el nivel de investigación no permite establecer la amplitud de aplicaciones que este sistema podría tener.

Los contaminantes de muy diversos efluentes son removidos aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se hace uso de un coagulante químico cuya función es llevada a cabo por corriente eléctrica que es aplicada al medio líquido contaminado, como se muestra en la figura 1.

Es importante aclarar que en las diferentes publicaciones que se han venido haciendo sobre el tema, se encuentra una serie de diseños a escalas de laboratorio y piloto, pero no hay diseños de reactores prototipos en uso hoy en día. La literatura disponible básicamente se limita a comparar los trabajos reportados.

Esto se ha dado en parte por la reputación que ha adquirido la electrocoagulación como tecnología demandante de electricidad, la que puede ser costosa en muchos lugares, obligando a que se abandonen sus estudios sin un análisis más detenido, y, por otra parte, a que esta tecnología se ha aplicado de manera empírica en muchos casos y como tratamiento puntual sobre un contaminante específico.

Figura 1. **Sistema de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro**



ARANGO RUÍZ, Álvaro; Garcés Giraldo, Luis Fernando y Restrepo, Ana Patricia. La Electrocoagulación retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Revista Producción + Limpia. Julio-diciembre, 2006.

En los últimos años, y debido a la imperante necesidad de investigar, adaptar e implementar tecnologías eficientes en la remoción de contaminantes, se considera a la electrocoagulación como alternativa viable en el tratamiento de los efluentes líquidos, cobrando un importante interés científico e industrial,

lo cual permitirá avanzar sobre los obstáculos que han dejado a esta tecnología rezagada durante varias décadas.

Es así como se enfrenta al reto de investigar los parámetros que controlan el proceso de electrocoagulación de manera organizada y sistemática, de una forma que permita diseñar el proceso en su totalidad, desde su requerimiento de energía hasta su reactor, para así optimizarlo, adaptarlo y aplicarlo, ubicando dicho proceso como una tecnología de punta que brinde sus ventajas en la protección y conservación del recurso hídrico.

JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Muchos metales como el hierro y el manganeso pueden encontrarse de manera natural disueltos o asociados a partículas en suspensión, en su mayoría se presentan en forma de sales. En Guatemala, es común encontrar fuentes de abastecimiento con presencia de ambos materiales. De igual manera, la norma COGUANOR 29001, clasifica al hierro (Fe) y manganeso (Mn), como “sustancias no deseadas”, especificando Limite Máximo Aceptable y Límites Máximos Permisibles como se muestra a continuación.

Tabla I. **Límites especificados en la norma COGUANOR 29001, para Fe y Mn**

	Hierro (Fe)	Manganeso (Mn)
Límite Máximo Aceptable	0.10 mg/l	0.05 mg/l
Límite Máximo Permisible	1.00 mg/l	0.50 mg/l

Fuente: elaboración propia.

La existencia de Fe y Mn, en los sistemas de agua potable, puede causar incrustaciones que al reducir la sección interna provocan pérdidas de carga de presión en las redes, y pueden propiciar la presencia de microorganismos, aumentando el gasto en procesos de desinfección (purificación). De la misma manera, el agua puede tornarse amarillenta o incluso negro y con un sabor metálico, lo que causa rechazo, afectando algunos procesos industriales o comerciales.

En el caso de pozos mecánicos, las incrustaciones producto de Fe y Mn, pueden permeabilizar los sustratos a su alrededor, disminuyendo el flujo de agua y mermando su capacidad.

En cuanto a antecedentes en Guatemala, se han podido identificar investigaciones realizadas en pozos perforados en los municipios de Mixco², Santa Catarina y Villa Canales³; todas del departamento de Guatemala; de la cabecera departamental de Huehuetenango⁴; de la cuenca del río Quiscab⁵, en el departamento de Sololá; informe de la calidad de agua de ríos 2006, de la República de Guatemala⁶; en donde se expresa la presencia de Fe y Mn hasta tres veces superior de los límites máximos permisibles según la norma COGUANOR 29001, en el caso de los pozos; y para el caso de los ríos hasta 15 veces mayor.

La presente investigación busca explorar una alternativa de tratamiento de aguas cuya implementación en la remoción de materiales se vuelve internacionalmente cada vez más recomendada, en cuanto a ser una tecnología limpia y financieramente más barata que las que tradicionalmente se utilizan en nuestro medio para la remoción de materiales, como el hierro y el manganeso.

²CORDÓN Y AVENDAÑO. Investigación presentada en el XXI Congreso Centroamericano y Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2006.

³CASTAÑEDA CASTRO, Reducción de hierro manganeso y detergente en el agua, por medio de arena verde de manganeso y carbón activado. 2004

⁴DE LEÓN HERNÁNDEZ. "Disponibilidad y características del agua potable en el área urbana del municipio de Huehuetenango". 2008

⁵PADILLA, GARCÍA Y PÉREZ, Caracterización fisicoquímica e bacteriológica, en dos épocas del año, de la subcuenca del río Quiscab, Guatemala. Artículo de Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 2010.

⁶INSIVUMEH. Informe de calidad de agua de ríos de Guatemala, año 2006.

En este sentido, los beneficios sobre la determinación de las condiciones técnicas y económicas en las que este método de tratamiento pudiera considerar óptimas para su aplicación en aguas con presencia de hierro y manganeso, abrirían un campo de oportunidades para potencializar soluciones más adaptables a la conservación de recurso hídrico bajo las condiciones socioeconómicas de Guatemala.

Como se ha mencionado, la aplicación de la electrocoagulación en la remoción de arsénico y flúor, ha dejado abierta la posibilidad de que este se pueda aplicar en aguas con presencia de hierro y manganeso, lo cual podría ser una solución al problema de remoción de estos materiales en aguas subterráneas en pozos mecánicos.

1. ASPECTOS TEÓRICOS

1.1. Aplicaciones de la electrocoagulación

Se ha aplicado la electrocoagulación para la remoción de diversas sustancias en aguas residuales. En muchos casos se hace una combinación de esta técnica con flotación promovida también por electrólisis (electrocoagulación), cuya finalidad es aumentar la eficiencia de remoción del contaminante. Esto se realiza en un proceso en la misma celda, o en celdas consecutivas. Una de las aplicaciones más conocidas ha sido el tratamiento de aguas residuales de la industria de galvanoplastia y electroplateado metálico, proceso que busca remover la carga de metales solubles en las descargas de una industria por demás contaminante.

La electrocoagulación también ha sido probada en la potabilización de aguas debido a que el paso de la corriente eléctrica a través del agua a tratar tiene efecto desinfectante en cuanto a que destruye en porcentajes por encima del 99%, los microorganismos presentes en el agua; en esta misma aplicación se ha venido estudiando la electrocoagulación con buenos resultados en el tratamiento de aguas para consumo humano, contaminadas con arsénico, contaminación que puede afectar la salud de la población y que puede ocurrir en cualquier región o país.

Otras posibles aplicaciones de la electrocoagulación están dadas en la remoción de nitratos en aguas superficiales y subterráneas contaminadas por nitratos lixiviados, procedentes de los fertilizantes artificiales usados en los cultivos.

En función de lo anterior, en la tabla II se hace referencia a algunos de los resultados recopilados en una serie de investigaciones realizadas en Colombia a nivel experimental o en prototipos⁷. De la misma manera se tienen antecedentes de investigaciones realizadas en el IMTA⁸ de México y diversas Universidades en México⁹ y España¹⁰.

⁷ RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia; Álvaro ARANGO RUIZ, Álvaro y Garcés Giraldo, Fernando. La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. 2006.

⁸ RIVERA HUERTA, Domínguez, Piña Soberanis, Pérez Castrejón, y García Espinoza. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de agua contaminada con arsénico, 2008.

⁹ VÁSQUEZ ARRISTIZÁBAL, Almazán Ruíz, Cruz Díaz y Delgadillo Gómez. Estudio de una celda de electrocoagulación mediante de herramientas computacionales y distribución de tiempos de residencia (DTR). Facultad de Ingeniería, Universidad de San Luis Potosí (2010)

¹⁰ HERNÁNDEZ LEHMANN; Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento de las aguas mediante electrocoagulación. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. Universidad Politécnica de Madrid, 2011.

Tabla II. Resultados de experimentos desarrollados alrededor de los procesos de electrocoagulación

Agua residual	Corriente	Anodo / cátodo	Parámetro eléctrico	Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	Contaminante	Remoción %	Tiempo (min)	Referencia
Colorantes textiles	CD	Al/Fe	$\geq 150 \text{ A}/\text{m}^2$	1000-4000	3- 6	Turbiedad	98	15	33
						DQO	61-65		
		Fe/Al	80-100 A/m ²	1000-4000	3-7	Turbiedad	75-98	10	
						DQO	47-77		
Electroplateado, industria del Cr, fertilizantes e industria de los metales.	--	Fe/Fe	30 A/m ²	1500	5-6	Turbiedad	87	--	20
						DQO	26		
Restaurantes	CD	Al/Al	1,8-6,8V	1290	6,94	DQO	67	15	14
						Grasas y aceites	>97		
						SS	90		
Alimentos(gelatinas)	CD	Fe/Al	6,26 A/m ²	1,2Mhos	10,86	Grasas y aceites	Agua cruda 1195ppm	15	16
							Agua tratada 115ppm		
						DQO	Agua cruda 3104ppm		
							Agua tratada 931,2ppm		
Lavandería	CA	Al/	32V/30A	--	5-9	DQO	70	5	28
						Turbiedad P-fosfato surfactante	90		
Agua consumo humano		Fe/	1,53 A/m ²	--	6-9	As	>99	20	36
		Al/					37		
		Ti/					>58		
Industria del boro	CD	Al/	1,2-6 mA/cm ²	bajos	8	B	97	--	41
Suspensión de látex	CD	Fe/Fe	1,1 A/Dm ²	0,6-1 S/m	6,5-7	estireno	Remanente 7%	26	38
						vinilo	Remanente 8%		
Industria semiconductores (pulido mecánico químico)	CD	Al/Fe	93 A/m ²	450-470	7,3	color	96	< 30	19
						Cu	99		
						DQO	88,7		
						DQO	76		
Producción aceite de oliva	CD	Al/	75 mA/cm ²	--	4-6	polifenoles	91	25	22
						color	65		

Fuente: elaboración propia.

1.2. Principios del proceso de electrocoagulación

La electrocoagulación, es un proceso de tratamiento de aguas que aprovecha la desestabilización de las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, disgregadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales.

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Por lo general, este estado produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados.

En función de lo descrito y lo observado en la práctica y definido en referencias bibliográficas previas¹¹, se han identificado tres etapas sucesivas:

- Formación de los coagulantes por oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio.
- Desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y rompimiento de la emulsión.
- Agregación de las fases desestabilizadas para formar flóculos.

¹¹ ARISTIZÁBAL CASTRILLÓN, Adriana; y María Catalina Bermúdez Agudelo Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso, 2007.

El mecanismo de desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y del rompimiento de emulsión se describe a continuación:

- Compresión de la doble capa difusiva alrededor de las especies cargadas por la interacción de los iones, generados por la oxidación del ánodo de sacrificio.
- Neutralización de las cargas de las especies iónicas presentes en el agua ocasionada por los iones coagulantes producidos por disolución electroquímica del ánodo de sacrificio. Estos iones coagulantes reducen la repulsión electrostática entre partículas, lo que causa la coagulación y de este proceso resulta una carga neta igual a cero.
- Los flóculos que se forman como resultado de la coagulación crean una capa de lodos que atrapa y conducen las partículas coloidales que permanecen en el medio acuoso.

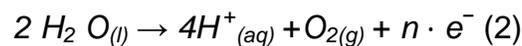
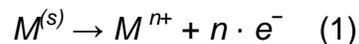
Las siguientes reacciones fisicoquímicas tienen lugar en una celda de electrocoagulación¹⁰:

- Reducción catódica de las impurezas presentes en el agua
- Descarga y coagulación de las partículas coloidales
- Migración electroforética de iones en solución
- Electroflotación de las partículas coaguladas, ocasionada por las burbujas de hidrógeno y oxígeno producidas por los electrodos
- Reducción de los iones metálicos en el cátodo
- Otros procesos químicos y electroquímicos

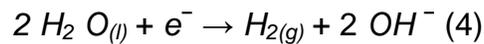
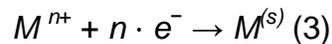
Cuando un potencial es aplicado por una fuente externa de energía, en el ánodo se lleva a cabo una oxidación, mientras que en el cátodo se lleva a cabo una reducción.

La reacción electroquímica con el metal (M) como ánodo, se puede resumir como se muestra a continuación:

En el ánodo:



En el cátodo:



En el ánodo metálico se llevan a cabo dos reacciones de separación. Inicialmente el ánodo se disuelve y produce de manera continua hidróxidos poliméricos metálicos que son excelentes agentes coagulantes. La coagulación ocurre cuando los cationes combinados con las partículas negativas son llevados cerca del ánodo por movimiento electroforético.

También se da la electrolisis del agua en una reacción paralela, produciendo pequeñas burbujas de oxígeno en el ánodo y de hidrógeno en el cátodo. Estas burbujas atraen las partículas floculadas y las hace flotar hasta la superficie, y es por esto que el proceso de electrocoagulación está asociado de manera intrínseca a la electroflotación. Los contaminantes presentes en el agua residual son tratados por reacción química y por precipitación o adición física o química a materiales coloidales que se generan por la erosión del electrodo.

Estos son removidos posteriormente por electroflotación o por sedimentación y filtración. El éxito de un proceso de electrocoagulación está determinado por el tamaño de burbuja y la mezcla adecuada de estas con el agua. Las pequeñas burbujas proveen mayor área superficial para que las partículas se adhieran en el lodo acuoso, resultando así una separación eficiente.

En un proceso de electrocoagulación el electrodo es usualmente conectado a una fuente de corriente directa. La cantidad de metal disuelto o depositado depende de la cantidad de electricidad que pase a través de la solución electrolítica. Una relación simple entre la densidad de corriente y la cantidad de sustancia disuelta se puede derivar de la Ley de Faraday:

$$\text{—————} \quad (5)$$

Donde:

W: es la cantidad de material de electrodo disuelto (gr de Metal cm.⁻²)

i: densidad de corriente (A cm.⁻²)

t: tiempo (s)

M: peso molecular del electrodo concerniente

n: número de electrones en la reacción de óxido reducción

F: constante de Faraday (96,500 C mol⁻¹)

Se espera que la cantidad calculada de material disuelto concuerde con los resultados experimentales. Se puede introducir un error significativo en este cálculo si no se tiene en cuenta la geometría del electrodo y las condiciones óptimas de operación del electrocoagulador.

1.2.1. Potencial en una celda de electrocoagulación

El potencial medido es la suma de tres componentes:

$$\eta_{AP} = \eta_K + \eta_{Mt} + \eta_{IR} \quad (6)$$

Donde:

η_{AP} : Sobrepotencial aplicado (V)

η_K : Sobrepotencial cinético (V)

η_{Mt} : Sobrepotencial de concentración (V)

η_{IR} : Sobrepotencial causado por la resistencia de la solución (V)

El sobrepotencial causado por la resistencia de la solución está relacionado con la distancia entre los electrodos (d en cm.), el área superficial del cátodo (A en m^2), la conductividad específica de la solución (k en $mS\ m^{-1}$) y la corriente (I en A), por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{— (7)}$$

Este sobrepotencial puede ser fácilmente minimizado, decreciendo la distancia entre electrodos e incrementando el área de sección transversal de los electrodos y la conductividad específica de la solución.

El sobrepotencial de concentración también conocido como sobrepotencial de difusión o de transferencia de masa, es causado por la diferencia de concentración de las especies electroactivas entre la solución y la superficie del electrodo, debido a la reacción del electrodo.

El sobrepotencial de concentración es despreciable cuando la constante de velocidad de reacción es mucho menor que el coeficiente de transferencia de masa. El sobrepotencial de transporte de masa puede ser reducido incrementando el flujo de los iones metálicos transportados desde la superficie del ánodo hasta la solución, aumentando la turbulencia de la solución.

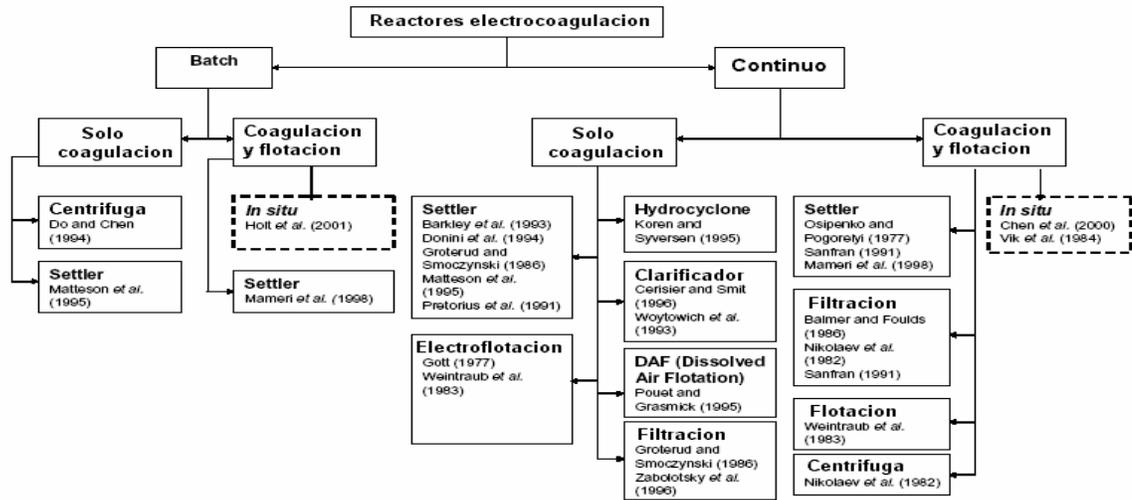
El sobrepotencial cinético también llamado potencial de activación es causado por la barrera de la energía de activación a las reacciones de transferencia de electrones. El sobrepotencial de activación es particularmente alto por la generación de gases en los electrodos. Ambos, el sobrepotencial cinético y de concentración, incrementan al aumentar la corriente. De cualquier manera, el efecto de estos cambios debe ser investigado para tipos específicos de especies químicas y físicas en soluciones acuosas.

1.2.2. Tipos de reactores para electrocoagulación

Los reactores empleados para el proceso de electrocoagulación se pueden clasificar como se muestra en la figura 2.

La mayor cantidad de aplicaciones de la electrocoagulación son en continuo y trabajan en condiciones de estado estable o pseudoestable. La aplicación de la electrocoagulación en Batch opera típicamente con un volumen constante de agua por ciclo de tratamiento y tiene una desventaja frente a los reactores en continuo desde el punto de vista de operación y diseño, ya que las condiciones dentro del tanque cambian con el tiempo, es decir, tiene un comportamiento dinámico. Una diferencia importante entre los reactores se debe a si en el reactor se lleva a cabo o no el proceso de flotación.

Figura 2. Clasificación de sistemas de reactores de electrocoagulación



Fuente: HOLT, Peter K.; BARTON, Geoffrey W. and MITCHELL, Cynthia A. The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. p. 358.

1.3. Presencia de Fe⁺² y Mn⁺² en concentraciones no deseables

La presencia de Fe⁺² y Mn⁺² en aguas subterráneas se atribuye a la existencia de mantos rocosos y minerales, de silicatos en rocas ígneas o de óxidos en caso del hierro; aunque, en el caso del manganeso más en compuestos más solubles.

La soluciones identificadas de estos minerales son resultado de la acción del dióxido de carbono (CO₂), posiblemente, presente por la filtración de descomposición de materia orgánica de en el subsuelo. Todo el proceso se da en condiciones anaeróbicas.

Estas combinaciones químicas se vuelven insolubles al llegar a la superficie y entrar en contacto con el aire, creando condiciones de oxidación, liberando CO₂ y H₂S; provocando que se vuelvan en presencia estables (Fe⁺³ y Mn⁺³). La rapidez con que se dé la oxidación dependerá de las condiciones del agente oxidante, pH, alcalinidad, contenido orgánico y agentes catalíticos.

Los efectos del Fe y el Mn, se pueden resumir en dos: presencia de color y taponamiento de tuberías en las redes de distribución.

La presencia de color se da por la precipitación de los metales creando manchas con tonos que van de amarillo, café, hasta negro. Esta condición genera rechazo visual pues mancha los artefactos sanitarios y la ropa. Igualmente, puede existir la condición de mal olor y sabor.

En cuanto a taponamientos, se pueden dar por la acumulación de microorganismos al punto reducir el diámetro de las tuberías u obstaculizar el ingreso de micromedidores.

1.3.1. Comentarios sobre las concentraciones de Fe y Mn según publicaciones de la OMS/OPS ⁽²⁾

Presencia de Fe:

- El rango de las concentraciones del Fe, en aguas superficiales naturales es de entre 0.5 a 50 mg/l.
- El requerimiento del cuerpo humano está en el intervalo de entre 10 a 50 mg diarios, dependiendo la edad y peso de la persona, sin embargo, la

OPS conjuntamente con la FAO determinó en 1983 una ingesta diaria tolerable máxima provisional (IDTMO) de 0.8 mg/kg de peso corporal.

- La asignación del 10% de este IDTMP al agua potable proporciona un valor de unos 2 mg/L, que no representa un riesgo para la salud, aunque concentraciones aún menores causan rechazo por la presencia de color y sabor.
- Las concentraciones mayores a 0.3 mg/l, puede causar manchas en ropa y artefactos sanitarios, menores a este valor no podría ser perceptible; aunque la ingesta de agua subterránea con niveles de hasta 3 mg/l, podría ser considerada aceptable.

Presencia de Mn:

- A diferencia del caso del Fe, en el caso del Mn, no se cuenta con estudios que definan un método para calcular un valor guía; sin embargo se ha podido establecer que hasta una ingesta diaria de 20 mg/l, no tiene efectos nocivos para la salud.
- Existen estudios de laboratorio que apoyan la idea de que un valor de guía de consumo, podría ser el de 0.5 mg/l, para poder proteger la salud pública. Sin embargo 0.1 mg/l, es un valor que por condiciones de apariencia, genera quejas por aparición de manchas en la ropa o en los artefactos sanitarios. Aún así, valores 0.02 mg/l son suficientes para que se presenten revestimientos en las tuberías.

1.4. Teoría de diseño de experimentos¹²

El diseño de experimentos es una técnica estadística que ayuda a identificar qué factores o variables afectan el comportamiento de un proceso y de esta manera mejorarlo, o bien, es una serie de pruebas en la que se le inducen cambios de manera deliberada en las variables en la entrada, a fin de observar o identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

Durante el desarrollo del experimento se espera realizar un proceso robusto o consistente, es decir uno que no esté afectado por fuentes de variabilidad externas o ruido.

Los métodos de diseño de experimentos son utilizados en el diseño de productos, como es en el caso de la celda electrocoagulación, de la manera siguiente:

- Evaluación y comparación de conceptos de diseños básicos.
- Evaluación de materiales alternativos.
- Selección de parámetros de diseño, de modo que el producto funcione bien desde una amplia variedad de condiciones de uso real; esto es que el producto sea consistente (robusto).

El uso de esta metodología puede dar por resultado productos con mayor confiabilidad y mejor funcionamiento en el campo, menores costos y menor tiempo de diseño y desarrollo del producto. Se busca entonces crear un proceso para obtener datos apropiados, que pueden ser analizados mediante métodos estadísticos, con el objeto de obtener conclusiones validas y objetivas.

¹² HURTADO MÁRQUEZ, Julio y Roberto Gómez Fernández. Diseño Experimental. Notas de Clase. Universidad Tecnológica de Colombia.

Los principios básicos para poder dar validez estadística al experimento son:

- Reproducción: es decir, poder llevar a cabo el experimento repetidamente bajo las mismas condiciones en más de una ocasión, con lo cual se cuantifica el error aleatorio inherente del proceso y permite una mejor estimación de los parámetros.
- Aleatoriedad: lo que logra confusión del efecto de los factores no controlables y valida las pruebas al hacer que los errores experimentales sean estadísticamente independientes.
- Análisis en bloques, que es una técnica que se usa para incrementar la precisión del experimento. Un bloque es una porción del material experimental que es más homogénea que el total o cuando las condiciones son más homogéneas.

Para la realización del experimento se pueden identificar dos tipos de variables que intervienen: los dependientes y los independientes.

Las primeras son aquellas son conocidas como variables de respuesta y son las características que se quiere conocer, para este caso: la conductividad, el pH, la concentración de Fe y de Mn.

Por otra parte, las variables independientes o factores, son las causas o factores cuyo efecto sobre las variables dependientes es lo que se desea analizar. Para el presente caso, la variación de tiempo de retención, separación de placas, material de placas y voltaje.

De manera generalizada los diseños de experimentos se pueden clasificar como de la siguiente forma:

- Diseños para comparar dos o más tratamientos:
 - Diseño completamente al azar
 - Diseños de bloques completos al azar
 - Diseños de cuadros latinos y grecolatinos

- Diseños para estudiar el efecto de varios factores sobre una o más variables de respuesta:
 - Diseños factoriales 2^K
 - Diseños factoriales 3^K
 - Diseños factoriales 2^{K-P}

- Diseños para la optimización de procesos:
 - Diseños modelo de primer orden
 - ✓ Diseños factoriales 2^K y 2^{K-P}
 - ✓ Diseño Plackett-Burman
 - ✓ Diseño Simplex

 - Diseños modelo de segundo orden
 - ✓ Diseño central compuesto
 - ✓ Diseño de Box – Behken
 - ✓ Diseños factoriales 3^K y 3^{K-P}

 - Diseños robustos
 - ✓ Arreglos ortogonales (diseños factoriales)
 - ✓ Diseños con arreglos externos e internos

- Diseños de mezclas
 - ✓ Diseño latín o simplex
 - ✓ Diseños simplex o con centroide
 - ✓ Diseño con restricciones
 - ✓ Diseño axial

Para el presente caso se ha identificado el diseño factorial fraccionado 2^{K-P} como el más adecuado para la investigación, debido a que se busca estudiar los efectos producidos por más de dos factores, pues en él se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica, que para interés propio se les llamará ensayos, y al ser del tipo fraccionado se garantiza un ahorro en términos de recursos estadísticos pues permiten alcanzar los mismos resultados con la mitad de replicas

2. CASO DE ESTUDIO

2.1. Planteamiento del estudio y desarrollo experimental

El proceso de electrocoagulación es aún muy empírico y dado a que su desarrollo no es del todo comprendido o difundido, aún así, se pudo identificar en la bibliografía consultada algunos factores controlables y variables de respuesta, a ser considerados en la operación de equipos de electrocoagulación, los cuales se detallan a continuación.

2.1.1. Factores controlables

A continuación se hace un listado de los factores sobre los cuales se ejercerá control, tales como: voltaje, consumo y materiales de electrodos, densidad de voltaje y distancia entre electrodos.

2.1.1.1. Voltaje

Es un factor que guarda una amplia relación con la densidad de corriente, la conductividad del agua, el estado de los electrodos y la distancia de separación de estos¹³. Respecto del pH, dependerá de cuán cercana se encuentre de 7, entre más cercano, habrá menos incidencia¹⁴. El voltaje será menor a medida de la cercanía de los electrodos y el incremento del área de contacto y la conductividad¹⁵. El voltaje, será medido a través del uso del multímetro (Tester).

¹³ CHEN, Guohua; CHEN, Xueming y YUE, Po Lock. Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. En: Chemical Engineering Science. (Jul. 2002).

¹⁴ MERCADO MARTÍNEZ, Iván Darío. La electrocoagulación, una nueva alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Medellín, 2005. Universidad Pontificia Bolivariana.

¹⁵ MOLLAH, Mohammad et al. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. En: Journal of Hazardous Materials. (oct. 2004).

2.1.1.2. Consumo de electrodos

Dado que este es un proceso de intercambio iónico, existe un desgaste de los electrodos, los antecedentes indican que este dependerá de la corriente aplicada y el tiempo de residencia hidráulico del medio acuoso⁴.

2.1.1.3. Densidad de corriente

Según los antecedentes encontrados, las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante en el agua y están ligados a factores económicos. Atendiendo a los antecedentes, se ha identificado que entre mayor es esta, se tiende a consumir mayor cantidad de corriente.

En tal sentido se buscará realizar ensayos con por lo menos dos niveles diferentes de voltajes en tres de intervalos de tiempo.

2.1.1.4. Distancia entre electrodos

Muchos autores coinciden en indicar que la distancia es directamente proporcional al consumo de energía.

2.1.1.5. Materiales de electrodos

Deben de tener condiciones de resistencia química y electroquímicas, sobre todo para que el cátodo tenga suficiente sobrepotenciales que favorezcan las reacciones de descomposición del agua tratada y permitan altos rendimientos electroquímicos. De la bibliografía consultada se han identificado los materiales más usados en el aluminio, hierro, cobre, acero y titanio (ver tabla # 1).

2.1.2. Variables de respuesta

Es conveniente conocer todas las posibles variables en relación con los experimentos para la remoción del hierro y manganeso.

2.1.2.1. Porcentaje de remoción de hierro y manganeso

Se prevé considerar los porcentajes de remoción de hierro y manganeso, cuyo cálculo se realizará en función de los niveles previo y posterior a la aplicación en las muestras en método de remoción, para lo cual se utilizará la siguiente ecuación:

$$\text{---} \quad (8)$$

Donde:

$\%R$ = Porcentaje de remoción

C_i = Concentración inicial

C_f =Concentración final

2.1.2.2. pH

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido, se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. Algunos autores estiman que los rangos más óptimos se encuentran entre 4 a 9.

2.1.2.3. Conductividad

Es la capacidad para conducir la electricidad del agua, por lo tanto es un indicativo del material ionizable presente. Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Para este caso se buscará realizar un análisis comparativo con diferente tipo de materiales de electrodos.

2.1.3. Costos

A continuación se describen los costos en que se incurrirá para la ejecución del presente estudio.

2.1.3.1. Consumo de energía de eléctrica

El proceso de electrocoagulación permite la remoción de una alta cantidad de contaminante en una sola operación, situación que convierte a esta tecnología en una opción económica para el tratamiento de las aguas; en función de esto se hará un inventario de costos de los materiales utilizados durante el tratamiento, incluyendo una relación de la energía consumida, basándose en una relación entre la potencia consumida por metro cúbico, tratado en cada una de las condiciones modificadas, para lo cual se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{—————} \quad (9)$$

Donde:

E = Energía consumida por metro cubico de agua tratada. (KW.h/m³)

P = Potencia en Watt (W)

t = Tiempo de tratamiento en horas

Nota: el factor 1000 es para conversión de W a KW

Una vez se cuente con los datos, se hará una relación por KW/h del precio vigente en el mercado nacional para obtener el costo de energía.

2.1.3.2. Análisis preliminar de costos generales

A fin de poder ponderar la conveniencia o no de la utilización de la electrocoagulación será necesario estimar el costo por metro cúbico de agua tratada contra el de procesos actualmente utilizados en el medio guatemalteco.

Para poder estimar los costos del proceso de electrocoagulación se tomara en cuenta los siguientes datos:

Tabla III. Datos a ser considerados en el análisis de costos

DATO	UNIDAD
OTROS MÉTODOS	
Tratamiento de agua por otros métodos por mes	Q
Caudal tratado por mes	m ³
Costo de inversión de tratamiento	Q
ELECTROCOAGULACIÓN	
OPERACIÓN	
Costo de energía por mes	Q/Kwh
Costo de placa de 2 mm	Q/m ²
Salario mínimo legal vigente por mes	Q
INVERSIÓN	
Volumen del sistema	m ³
Costo del reactor	Q
Fuente	Q
Costo de ánodo de 2 mm	Q/m ²

Fuente: elaboración propia.

2.2. Análisis estadístico y económico

A continuación se describe el análisis realizado.

2.2.1. Muestreo y tabulación

Como es necesario estudiar varios factores del proceso de electrocoagulación, se seleccionó el diseño experimental factorial fraccionado 2^{5-1} , ya que este diseño permite investigar el efecto individual principal y de interacción de los diferentes factores sobre las variables respuestas.

Los diseños factoriales fraccionados sacrifican información poco importante (interacciones de alto orden), en aras de un número de tratamientos manejable y de obtener información de los efectos relevantes; en este caso se considera verdad el principio de jerarquía de los efectos (son más importantes los efectos principales, seguidos por interacciones dobles, luego las triples, cuádruples, etc.); además, cuando se elige correr una fracción se busca poder estimar los efectos relevantes.

Las variables respuestas que se consideraron son remoción de Fe, remoción de Mn y pH, y los factores controlables: voltaje, distancia entre placas, material del ánodo, número de placas y tiempo de retención, estos factores fueron elegidos de acuerdo con la posible influencia que tienen sobre las variables respuestas. Para el análisis de los datos experimentales se empleó el software especializado Statgraphics, donde se desarrolló un diseño factorial fraccionado 2^{5-1} que estudia el efecto de 5 factores en 32 experimentos realizados en dos réplicas y cada factor en dos niveles, para evaluar la influencia de los factores sobre las variables respuesta.

2.2.2. Análisis de datos de los resultados del proceso de tratamiento

Una vez se hayan determinado las condiciones, los factores especificados en el apartado de Diseño y método estadístico, se procederá a realizar un análisis de los resultados. Los datos básicos determinados en función de los factores y variables definidos en la sección 2.1, se presentan en las siguientes tabulaciones:

Tabla IV. Factores controlables y variables de respuesta definidos para el análisis de datos

FACTORES CONTROLABLES	UNIDAD	NIVELES DE MEDICIÓN
Voltaje	Voltio	2
Distancia entre placas	mm	1
Material del Ánodo	Adimensional	2
Tiempo de retención	Minutos	1
Número de placas	Adimensional	1
VARIABLES DE RESPUESTA	UNIDAD	
Ph	Unidades de pH	
Conductividad	mS/cm	
% de remoción de hierro	%	
% de remoción de manganeso	%	

Fuente: elaboración propia.

El análisis de los resultados se utilizó en sistema Statgraphics, definiendo inicialmente la varianza para un modelo de efectos fijos por cada variable de respuesta, puesto que todos los factores controlables afectan mutuamente de alguna manera, como fue descrito en la sección 2.3; el modelo de varianza propuesto sería el que a continuación se presenta.

Tabla V. **Planteamiento de la Anova**

FUENTE	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	-Ratio	P-Value
A:Voltaje					
B:Distancia entre places					
C:Material del ánodo					
D:Tiempo de retención					
E:Número de places					
AD					
AE					
BD					
CD					
CE					
Bloques					
Error total					
Total					

Fuente: elaboración propia.

Igualmente, estos resultados serán presentados en una gráfica, proponiéndose inicialmente el uso de un diagrama de Pareto o de desambiguación, ya que es adaptable a un sistema con muchos distractores y pocos aspectos vitales, como es este caso. Cabe resaltar que este tipo de diagrama es utilizado tanto en la industria o comercio, como para la descripción de fenómenos naturales o sociales.

Obtenidos los resultados de la varianza, se procederá a definir el coeficiente de correlación con ayuda del software y un análisis de gráficas de cada variable, contra cada uno de los factores, lo cual identificará el tipo y nivel de relación de cada uno de resultados obtenidos en los ensayos.

2.2.2.1. Productos esperados del análisis de datos

De los análisis estadísticos propuestos se estima obtener: Los porcentajes de remoción de hierro y manganeso, los niveles de conductividad y pH a diferentes condiciones de funcionamiento del prototipo.

2.2.2.2. Análisis de costos

Contando con los datos obtenidos según lo indicado en la sección 2.3, es decir los montos totales de inversión traducidos por unidad de volumen y de operación del sistema de electrocoagulación, se podrá estimar la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN), con lo cual se hará una comparación final de este método con otro utilizados en el medio guatemalteco.

3. METODOLOGIA

3.1. Desarrollo experimental

El proceso de electrocoagulación es un proceso empírico que realizará su análisis sobre la base de la creación de soluciones madre de cada una de las sustancias.

3.1.1. Descripción de la construcción del proceso

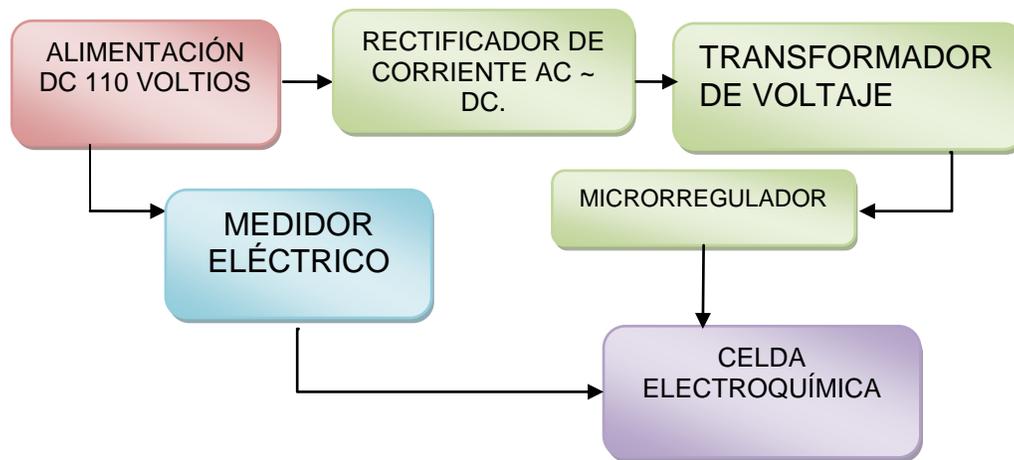
Dado que una de las desventajas que tiene la tecnología de la electrocoagulación es la acumulación de una película de hidróxidos insolubles se puedan acumular en el ánodo, se deberá de utilizar un mecanismo agitador a fin de propiciar el desprendimiento.

En el mercado de materiales en la República de Guatemala, no se pudo encontrar materiales para los electrodos en la presentación o con el nivel de pureza que puedan ser respaldados con certificados al respecto, lo cual obligó a la utilización de componentes destinados para procesos industriales no relacionados con el tema de la electrofloculación, que hace que los costos para su adquisición sean altos, lo que limitó el alcance de la investigación.

Los modelos de celdas de electrocoagulación identificados obedecen a diversas formas y consideraciones técnicas, no se ubicó una metodología estándar para su diseño, aunque existe una serie de recomendaciones que han sido incorporadas en la presente investigación.

Los modelos de prototipo tipo Bach, siguen básicamente el siguiente esquema:

Figura 3. Diagrama de estructura del prototipo



Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Componentes

A continuación se describen los diversos componentes del modelo seleccionado.

3.1.2.1. Fuente de poder

En la investigación bibliográfica previa se identificó el uso de fuentes reguladoras de voltaje y el uso de un equipo rectificador de corriente, ubicando en el mercado local un adaptador universal AC/DC, marca N.A., con un microrregulador de voltajes puntuales de 3, 4.5, 6, 7.5, 9, 12 y 15 voltios; para un alcance máximo de 2000 mA en DC.

3.1.2.2. Circuito eléctrico

Se construyó un pequeño circuito eléctrico en paralelo, con 10 terminales, las cuales se conectan a la celda electroquímica por igual número de cables tipo AWG, calibre 14.

3.1.2.3. Celda electroquímica

La celda está en función del volumen a ser tratado, tomando en cuenta los antecedentes bibliográficos y las dimensiones con el equipo de agitación disponible, esta tendrá un volumen de 3.5 litros, considerando que el peso del agua y resto del equipo. El equipo de agitación marca Hacth disponible tiene dimensiones aproximadas de 15 x 30 centímetros de base.

3.1.2.3.1. Diseño de celda

El dimensionamiento de la base de la celda se consideraría de 14 x 24 centímetros, tomando en cuenta el espacio para manejo de la estructura y la base del mecanismo agitador.

El material escogido para la construcción es de vidrio, considerando las propiedades aislantes al calor y de baja conducción eléctrica, que sería superior a otros como la fibra de vidrio, baquelita, teflón y acrílico, que son materiales de uso común para la creación de recipientes.

A fin de dimensionar correctamente la celda para la adecuada distribución espacial de los electrodos, se toma en cuenta lo indicado en la

investigación realizada por Arango y Garcés¹⁶, sobre la recomendación de que las placas de los electrodos en las celdas no deben de ser menores a 1 centímetro; y lo argumentado por Papaleo y Rodríguez¹⁷, en su documento de tesis: “las distancias de separación entre placas menores a 1 cm no son recomendables porque aumentan el tiempo del tratamiento”.

Además de lo indicado, se ha podido establecer en estos como otros antecedentes, que debe considerarse una zona libre para que flote una potencial presencia de espuma y de flóculos de baja densidad; también para aquellos de alta densidad que se precipiten al fondo, se consideran espacios de 4 centímetros por sobre y bajo las placas.

Los electrodos, estarán definidos a través de la siguiente ecuación:

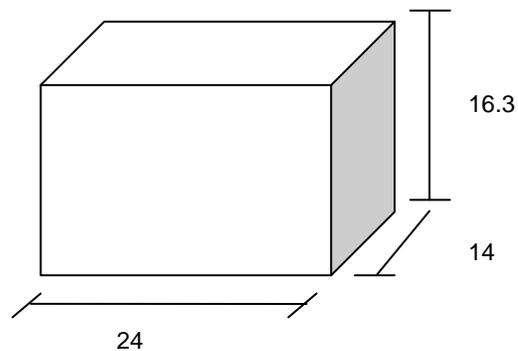
Tomando en consideración los elementos indicados en párrafo anterior tendría:

¹⁶ Diseño de una celda electroquímica para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. Investigación y artículo de Revista de Universidad EPAFIT. Medellín, Colombia, 2007.

¹⁷ Diseño y construcción del prototipo de un sistema de electrocoagulación de tratamiento de aguas residuales. Santiago de Cali, Colombia. 2011.

Entonces, los electrodos tendrían: 8.3 x 10 centímetros; y el de la celda sería de: 14 x 24 x 16.3 centímetros. Según como se ve a continuación:

Figura 4. **Dimensionamiento de la celda**



Fuente: elaboración propia.

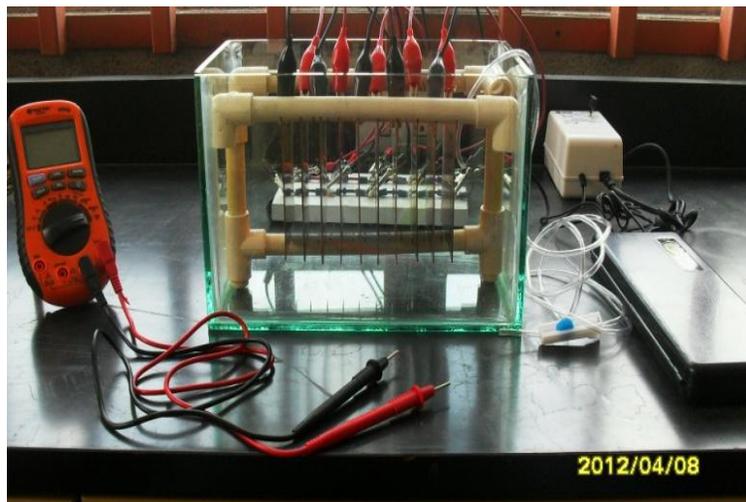
En cuanto al material, para su determinación se basa en tres criterios iniciales:

- Disponibilidad de materiales en el mercado
- Costo
- Referencias bibliográficas sobre el desempeño de los materiales en procesos similares

Se han identificado en el mercado nacional tres de los materiales más utilizados para la elaboración de placas según la investigación bibliográfica, los cuales son: cobre, aluminio y hierro; sin embargo, hace falta verificar el nivel de pureza de las presentaciones comerciales.

El dispositivo utilizado, se elaboró de vidrio de 5 milímetros, cuyas dimensiones son de 14 x 24 x 16.3 centímetros, buscando tener un volumen efectivo de trabajo de 3.5 litros.

Figura 5. **Equipo que integra el prototipo**



Fuente: elaboración propia.

3.1.2.3.2. Soporte de electrodos

En función de lo argumentado en el anterior párrafo se diseñó un soporte de tubería CPVC, de 100 PSI, para separar las celdas en función de las distancias a las paredes y el fondo de la celda.

3.1.2.3.3. Electrodo

Inicialmente este sistema se había considerado para trabajarse con dos tipos de materiales, sin embargo, solo se encontró en el mercado un material con la pureza necesaria para el desarrollo adecuado del experimento.

La primera opción considerada fue el aluminio, pero se encontraron dos tipos de presentaciones, la primera el duraluminio, que es una aleación con cobre y manganeso y otro cuya presentación obedece a la nomenclatura ASTM B-209 (AA 3003 H 14); cuya composición es una aleación con hierro, manganeso, cobre, zinc y sílice. Para el presente caso, la presencia adicional de uno de los elementos a ser analizados podría afectar los resultados.

En cuanto a la elección de cobre, se ubicó la utilización de planchas con el 99 % de pureza en cobre, siendo el 0.01 % oxígeno.

3.1.3. Variaciones al planteamiento original

En el planteamiento original se esperaba encontrar en el mercado suficientes opciones para poder realizar por lo menos 2 comparaciones de materiales para ver el funcionamiento de la celda, pero como se indicó, solo se pudo identificar en el mercado local planchas de Cobre (Cu).

3.1.3.1. Placas de electrodos

Se describe a continuación la estructura y elaboración de las placas.

3.1.3.1.1. Material del ánodo

La presentación encontrada obedece a un diseño que considera como factor clave el volumen más que el área; es por eso que bajo la norma que rige el material de contacto para pararrayos, esta debe tener un volumen de 1000 cm³, habiendo en ese sentido dos presentaciones una placa de 50 x 50 cm y 2 mm de espesor (a) y otra de 100 x 100 y 1 mm de espesor (b).

Figura 6. **Presentación de placas de puestas de pararrayos en terrenos de alta resistividad**

Ref. 251011
(Cobre)



(a) *Placa con ranuras. 50x50 cms y 2 mm de espesor*



(b) *Placa sin ranura. 100x100 cms y 1 mm de espesor*

Fuente: elaboración propia.

En la figura anterior se puede ver la presentación encontrada en el mercado, visualizando que la presentación de 100 x 100 x 1 mm, cuenta con mayor de área aprovechable, por lo que se optó por utilizarla; siendo el factor inicial de variación donde se estimó contar con una plancha de 2 mm de espesor, pero se visualiza en la presentación que no permite un aprovechamiento total del área.

3.1.3.1.2. Dimensionamiento, número y distancia entre placas

Inicialmente se estimó la utilización de 6 placas, de 8.5 por 10 cm lo cual sería igual a un planteamiento de 510 cm², con base en los cálculos iniciales y en una estimación de que el material podría encontrarse en presentaciones adecuadas; sin embargo, la presentación era una plancha de 1 metro por 1 metro, que debió llevarse a un taller para lograr los cortes; a fin de lograr cortes efectivos de la plancha que representaran menores errores, se optó por una medida que presentara menor dificultad al operario de la cortadora y a su vez permitiera un mayor aprovechamiento del material.

En cuanto al número de placas, se detectó un error en la fórmula con que fue estimado, según la bibliografía, el cual radicaba en la denominación de uno de los datos como ancho de celda, cuando era el largo; en tal sentido la fórmula estimada finalmente debió ser de la siguiente forma:

$$\frac{\text{Área de contacto nominal}}{\text{Área de una placa}} = \text{Número de placas}$$

En este sentido, el área de contacto nominal sería aumentada a 800 cm², aunque en la práctica esta se reduce, debido a que las placas no se sumergen completamente en el agua, por lo que contó con un área de 565 cm².

3.1.3.2. Variación del planteamiento estadístico derivado de los cambios en las placas

El método estadístico realiza un análisis en el que se mezclan todos los factores, definiendo diferentes niveles; en este caso se determinaron dos niveles para el material del ánodo, es decir el uso de dos materiales, y para distancia de placas un nivel.

Para suplir los niveles que no se podría realizar por el uso de un solo material para el ánodo; se optó por añadir un nivel más en la distancia entre placas, optándose por una separación de 1.5 cm, por lo que se volvió a plantear de la siguiente manera:

Con lo que se contó con un área efectiva de contacto de 682 cm².

3.1.3.2.1. Tiempo de retención

A fin de tener mayores elementos para el análisis, y en función de la información clave bibliográfica identificada, se optó por utilizar dos niveles para este factor, de 15 y 10 minutos.

3.1.3.2.2. Voltaje

Los dos niveles considerados para el análisis fueron 9 y 6 voltios.

3.1.3.2.3. Planteamiento estadístico final

En consideración de las variaciones identificadas se presenta en la tabla V el planteamiento estadístico final, en el cual se puede ver el planteamiento estadístico utilizado.

3.2. Procedimiento en condiciones aleatorias con muestras controladas en laboratorio

El procedimiento del experimento a nivel de laboratorio que es descrito a continuación, hace una relación entre el utilizado en un ambiente controlado por medio de la creación de soluciones férricas y sales de manganeso, combinándola con los procedimientos de la Casa Hach, para la determinación de hierro y manganeso, debido a que el equipo de laboratorio a disposición es de esta firma. Se aclara que a pesar de que los procedimientos se describen por separado, estos se llevaron simultáneamente y con una misma muestra.

- Procedimiento para determinación de Fe:
 - Se muele en un matraz, piedra férrica con un poco de agua.
 - Se vierte en un depósito de un galón con agua, una solución de manera aleatoria a fin de contar en cada análisis, una concentración diferente.
 - Aleatoriamente se agrega sulfato de manganeso ($MnSO_4$).
 - Luego de mezclarlo, se mide la temperatura, el pH y la conductividad.

- Utilizando probeta graduada de 10 ml, se toman muestras en dos tubos de ensayo.
- A una de las probetas se le vierte un reactivo, se agita fuertemente y se espera a que repose 3 minutos.
- Se conecta el espectrofotómetro y se espera a que el equipo cargue.
- Una vez el equipo esté listo, se configura el programa 265 del sistema del espectrofotómetro, se coloca el tubo de ensayo sin reactivo marca blanco y se define el nivel base de la medición.
- Una vez definido el blanco, se extrae el primer tubo de ensayo y se coloca el segundo que contiene el reactivo, que debe haber tornado de un tono naranja, y se espera la lectura de la concentración de hierro. Entre más naranja mayor es la concentración.
- Procedimiento para determinación de Mn:
 - Se vierte en un depósito de un galón con agua sulfato de manganeso (MnSO_4), de manera aleatoria, a fin de contar con cada análisis una concentración diferente.
 - Luego de mezclarlo, se mide la temperatura, el pH y la conductividad.
 - Utilizando probeta graduada de 25 ml, se toman muestras en dos tubos de ensayo.

- A una de las probetas se le vierte un reactivo, se agita fuertemente y se espera a que repose 2 minutos.
- Se conecta el espectrofotómetro y se espera a que el equipo cargue.
- Una vez el equipo esté listo se configura el programa 295 del sistema del espectrofotómetro, se coloca el tubo de ensayo sin reactivo marca Blanco y se define el nivel base de la medición.
- Una vez definido el blanco, se extrae el primer tubo de ensayo y se coloca el segundo que contiene el reactivo, que debió adquirir un tono rosado, y se espera la lectura de la concentración de manganeso. Entre más rosado, mayor es la concentración.

Para ambos procesos de identificación de la concentración se toman datos de voltaje (V) y de intensidad (A) de corriente con el multímetro, que sirven para medir el potencial eléctrico de la celda. Después de cada corrida se vacía el recipiente y se lavan todos los componentes de la celda limpiando con un paño la acumulación de óxido en el cátodo. Al iniciar la siguiente corrida es necesario cambiar la polaridad de los electrodos para aprovechar un poco más la vida útil de la celda.

3.3. Proceso con condiciones no controladas en laboratorio

Este procedimiento fue desarrollado en un esquema que utilizó un modelo modificado desarrollado sobre la base del programa Staticgraphics; para este cálculo se identificó el nuevo modelo: uso de 9 placas en un tiempo de 12.5 minutos.

Se utilizaron los mismos procedimientos para la determinación de las concentraciones, por lo que en la descripción presentada en el numeral anterior, el lugar de muestreo es el condominio Terravista, Km 19.5; carretera a Pavón.

Las ubicaciones exactas de los puntos fueron: la oficina de agua del condominio ($14^{\circ}31'52.87''$ N; $90^{\circ}26'49.15''$ O; elev.1909 msnm), que corresponde al agua que proveniente del pozo # 1; una toma de agua en una zona verde frente a lote 6, manzana A, sector 2, ($14^{\circ}31'49.65''$ N; $90^{\circ}26.89''$; elev.1892 msnm), que corresponde al pozo # 2. Es importante indicar que las condiciones de la toma de muestra se realizan sobre las que la población beneficiada consume el agua; que difieren de las originales del pozo, pues la empresa de agua del condominio hace un tratamiento con cloro y posterior precipitación.

Tabla VI. **Planteamiento final para el análisis estadístico del experimento**

FACTORES CONTROLABLES	UNIDAD	NIVELES DE MEDICIÓN	NIVEL ALTO	NIVEL BAJO
Voltaje	Voltio	2	9	6
Distancia entre placas	Cm	2	2	1.5
Material del ánodo	Adimensional	1	Cu	Cu
Tiempo de retención	Minutos	2	15	10
Número de placas	Adimensional	2	10	8
VARIABLES DE RESPUESTA	UNIDAD			
pH	Unidades de pH			
Conductividad	mS/cm			
% de remoción de hierro	%			
% de remoción de manganeso	%			

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados de las corridas realizadas

En función de lo descrito en la sección 3, en cuanto a la selección del método estadístico y cómo se define el número de ensayos a realizar, se hicieron 32 corridas en condiciones controladas en laboratorio, las cuales se muestran en la tabla VII, los cuales representan 16 combinaciones de condiciones entre las variables y factores, definidos en esta misma sección.

De la misma forma en la tabla VIII se pueden apreciar los resultados relativos al % pH; como en la número IX, los de conductividad; y en la X, los propios de la reducción de hierro y manganeso.

Como un complemento de lo descrito, para las dos muestras recolectadas en los pozos del condominio Terravista se presentan en las tablas XI y XII.

Tabla VII. **Distribución de los ensayos realizados**

ORDEN	REPLICA	VOLTAJE (voltio)	DISTANCIA ENTRE PLACAS (cm)	NUMERO DE CELDAS	TIEMPO DE RETENCION (min)	MATERIAL DEL ANODO
1	1	9	1.5	10	15	Cu
2	1	9	1	10	15	Cu
3	1	9	1.5	10	10	Cu
4	1	9	1	10	10	Cu
5	1	6	1.5	10	15	Cu
6	1	6	1	10	15	Cu
7	1	6	1.5	10	10	Cu
8	1	6	1	10	10	Cu
9	2	9	1.5	10	15	Cu
10	2	9	1	10	15	Cu
11	2	9	1.5	10	10	Cu
12	2	9	1	10	10	Cu
13	2	6	1.5	10	15	Cu
14	2	6	1	10	15	Cu
15	2	6	1.5	10	10	Cu
16	2	6	1	10	10	Cu
17	1	9	1.5	8	15	Cu
18	1	9	1	8	15	Cu
19	1	9	1.5	8	10	Cu
20	1	9	1	8	10	Cu
21	1	6	1.5	8	15	Cu
22	1	6	1	8	15	Cu
23	1	6	1.5	8	10	Cu
24	1	6	1	8	10	Cu
25	2	9	1.5	8	15	Cu
26	2	9	1	8	15	Cu
27	2	9	1.5	8	10	Cu
28	2	9	1	8	10	Cu
29	2	6	1.5	8	15	Cu
30	2	6	1	8	15	Cu
31	2	6	1.5	8	10	Cu
32	2	6	1	8	10	Cu

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Resultados de los ensayos en cuanto a pH**

ORDEN	RÉPLICA	pH inicial	pH final	% pH
1	1	6.7	9.14	26.70
2	1	6.61	8.9	25.73
3	1	6.65	9.55	30.37
4	1	6.13	6.23	1.61
5	1	6.44	8.89	27.56
6	1	6.64	8.44	21.33
7	1	6.47	7.23	10.51
8	1	6.78	8.8	22.95
9	2	6.4	6.52	1.84
10	2	6.73	8.9	24.38
11	2	6.47	6.5	0.46
12	2	6.77	9.18	26.25
13	2	6.51	6.66	2.25
14	2	6.74	8.78	23.23
15	2	6.52	7.29	10.56
16	2	6.63	7.14	7.14
17	1	6.59	8.59	23.28
18	1	6.62	9	26.44
19	1	6.57	7.59	13.44
20	1	6.59	8.4	21.55
21	1	6.55	8.6	23.84
22	1	6.8	8.59	20.84
23	1	6.63	6.88	3.63
24	1	6.84	7.94	13.85
25	2	6.6	8.4	21.43
26	2	6.6	9.2	28.26
27	2	6.68	6.78	1.47
28	2	6.61	7.9	16.33
29	2	6.57	7.86	16.41
30	2	6.74	7.22	6.65
31	2	6.62	8.06	17.87
32	2	6.8	8.43	19.34

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Resultados de los ensayos en cuanto variación de conductividad**

ORDEN	RÉPLICA	CONDUCTIVIDAD inicial	CONDUCTIVIDAD final	% Conductividad
1	1	433	385	-12.47
2	1	435	384	-13.28
3	1	435	410	-6.10
4	1	426	386	-10.36
5	1	445	410	-8.54
6	1	424	398	-6.53
7	1	442	455	2.86
8	1	437	419	-4.30
9	2	514	518	0.77
10	2	437	353	-23.80
11	2	466	460	-1.30
12	2	429	384	-11.72
13	2	545	491	-11.00
14	2	437	407	-7.37
15	2	423	420	-0.71
16	2	441	418	-5.50
17	1	449	393	-14.25
18	1	436	400	-9.00
19	1	436	426	-2.35
20	1	442	358	-23.46
21	1	450	448	-0.45
22	1	433	416	-4.09
23	1	437	404	-8.17
24	1	443	432	-2.55
25	2	440	415	-6.02
26	2	435	360	-20.83
27	2	443	443	0.00
28	2	450	416	-8.17
29	2	430	401	-7.23
30	2	444	415	-6.99
31	2	442	399	-10.78
32	2	433	418	-3.59

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Resultados de los ensayos en cuanto remoción de Fe y Mn**

ORDEN	RÉPLICA	% HIERRO	% MANGANESO	Fe inicial	Mn inicial	Fe final	Mn final	%Fe/Mn inicial	%Fe/Mn final
1	1	18.46	43.48	0.65	6.9	0.53	3.9	0.094	0.136
2	1	22.70	46.67	1.41	4.5	1.09	2.4	0.313	0.454
3	1	20.83	71.43	0.72	5.6	0.57	1.6	0.129	0.356
4	1	31.29	70.59	1.47	1.7	1.01	0.5	0.865	2.020
5	1	3.97	6.25	1.26	8	1.21	7.5	0.158	0.161
6	1	70.83	20.83	0.72	2.4	0.21	1.9	0.300	0.111
7	1	86.43	9.21	1.99	7.6	0.27	6.9	0.262	0.039
8	1	61.87	14.89	2.57	4.7	0.98	4	0.547	0.245
9	2	53.65	2.74	2.74	21.9	1.27	21.3	0.125	0.060
10	2	44.12	81.82	0.34	2.2	0.19	0.4	0.155	0.475
11	2	72.00	6.20	0.75	12.9	0.21	12.1	0.058	0.017
12	2	19.87	24.14	1.51	2.9	1.21	2.2	0.521	0.550
13	2	50.92	21.59	1.63	44	0.8	34.5	0.037	0.023
14	2	52.94	25.62	1.87	4.06	0.88	3.02	0.461	0.291
15	2	7.59	11.54	0.79	2.6	0.73	2.3	0.304	0.317
16	2	54.23	20.51	2.84	3.9	1.3	3.1	0.728	0.419
17	1	41.88	20.65	2.34	9.2	1.36	7.3	0.254	0.186
18	1	40.66	37.10	0.91	6.2	0.54	3.9	0.147	0.138
19	1	2.38	6.90	0.84	5.8	0.82	5.4	0.145	0.152
20	1	85.10	21.31	2.55	6.1	0.38	4.8	0.418	0.079
21	1	81.37	8.79	1.02	9.1	0.19	8.3	0.112	0.023
22	1	50.00	23.53	0.64	5.1	0.32	3.9	0.125	0.082
23	1	71.43	17.24	1.82	5.8	0.52	4.8	0.314	0.108
24	1	87.59	23.53	1.37	1.7	0.17	1.3	0.806	0.131
25	2	71.43	13.11	2.59	6.1	0.74	5.3	0.425	0.140
26	2	51.22	20.59	2.46	3.4	1.2	2.7	0.724	0.444
27	2	12.09	10.81	0.91	3.7	0.8	3.3	0.246	0.242
28	2	51.76	41.35	1.7	10.4	0.82	6.1	0.163	0.134
29	2	11.40	16.13	1.14	3.1	1.01	2.6	0.368	0.388
30	2	48.65	24.53	1.85	5.3	0.95	4	0.349	0.238
31	2	19.78	2.86	0.91	7	0.73	6.8	0.130	0.107
32	2	72.73	10.71	2.86	2.8	0.78	2.5	1.021	0.312

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resultados de los ensayos en cuanto a Fe y Mn del pozo No. 1, condominio Terravista**

Muestra # 1	Inicial	Final
Ubicación	Oficina de agua	
Hora	8:35 am	
Temperatura	19°C	
pH	6.61	6.51
Conductividad	149.6 uS/cm	157.6 uS/cm
Hierro (Fe)	1.60 mg/l	0.62 mg/l
Manganeso (Mn)	0.50 mg/l	0.20 mg/l

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Resultados de los ensayos en cuanto a Fe y Mn del pozo No. 2, condominio Terravista**

Muestra # 2.	Inicial	Final
Ubicación	Zona verde (parque) ubicada frente a lote 6, manzana A, sector 2	
Hora	8:47 am	
Temperatura	18.5°C	
pH	6.15	6.74
Conductividad	150.6uS/cm	151.4 uS/cm
Hierro (Fe)	0.66 mg/l	0.55 mg/l
Manganeso (Mn)	0.40 mg/l	0.10 mg/l

Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Ubicación de los puntos de muestreo en Condominio Terravista**



Fuente: Google earth. Consulta: octubre de 2012.

4.2. Principales observaciones del proceso experimental de remoción de Fe Y Mn

Sobre el proceso experimental de características aleatorias donde, sobre todo en la primera fase, se crearon soluciones para proceder con los ensayos, se describen observaciones sobre su desarrollo.

De las 32 ensayos realizadas, respecto del hierro, en 21 casos la concentración inicial fue menor al límite máximo permisible (1 mg/l); pero en todos los casos fue superior al límite máximo aceptable (0.1 mg/l), siendo el rango de 0.36 a 2.86 mg/l.

En el caso del manganeso, las concentraciones fueron siempre superiores al límite máximo permisible (0.5 mg/l), siendo la menor de las concentraciones 1.7 y la mayor de 44 mg/l.

Respecto de la eficiencia de remoción de hierro, el promedio expresado en porcentaje fue de 45.97 %, y del manganeso fue de 24.27 %.

A pesar de los datos de remoción anteriores, hubo condiciones de otros factores de control que igualmente deben de ser considerados a la hora de optar por esta tecnología para remoción de materiales. El pH aumentó en un promedio de 16.80 %, y la conductividad disminuyó en promedio en 7.73 %.

Luego de los ensayos, el ánodo se tornaba de color negro, mientras que en el cátodo se realizaba una acumulación de un sarro de color verde. Si la placa se dejaba secar sin ser limpiada, el lodo se volvía como una capa endurecida. Estas reacciones son parte de la reacción electroquímica de intercambio iónico entre las placas.

Una condición que se dio no importando las concentraciones de Fe y Mn, fue la generación de color por la presencia de sólidos creados posteriormente al intercambio iónico que crea desgaste en el ánodo. Se observó que cuando la concentración de la mezcla era mayor en Mn, se tornaba de color turquesa y al ser el Fe el predominante, se tornaba en color óxido.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este análisis debe hacerse bajo la consideración de dos puntos de vista: el primero respecto de la eficiencia del prototipo para remover Fe y Mn; luego, de las condiciones propias de la muestra tanto previa como posterior al procesamiento dentro del prototipo.

Del análisis específico de la eficiencia del equipo optimizado, se observa una eficiencia en remoción de hierro (Fe) en la primera muestra del 61.25 %; mientras que en la segunda, de 16.67 %; luego, en el caso del manganeso (Mn) en la primera es de 60 % y en la segunda de 75 %; lo cual podría considerarse muy eficiente.

De una manera muy particular, se observó que en este caso, el comportamiento del pH y la conductividad no fue similar a las condiciones de las muestras trabajadas sobre la base de soluciones creadas en laboratorio.

Si bien, en las muestras generadas en laboratorio existió una marcada relación de aumento del pH y disminución de la conductividad, en las muestras tomadas en campo no fue así.

Para la muestra de la red suministrada por el pozo #1, el pH bajo y la conductividad subió, mientras que la muestra tomada de la red del segundo pozo, la tendencia fue similar a la de las soluciones consideradas de manera controlada.

El segundo tipo de análisis se orienta directamente a las condiciones del agua tratada, lo valores a los que el sistema llega luego del tratamiento indican que para este caso específico, considerando las observaciones a la experiencia de OPS, identificado en este documento en el numeral 1.3.1., valores que pueden causar problemas de aceptación por generación de manchas en ropa y artefactos sanitarios y de alguna presencia de revestimientos en tuberías.

5.1. Análisis del diseño de experimentos

El análisis que se presenta, muestra una Anova para cada serie de respuesta, mostrando el diagrama de Pareto, y la relación con los factores, como la influencia individual sobre la variable de respuesta, graficando los efectos, uniendo los puntos correspondientes de la media de la variable respuesta en el nivel alto de cada factor y la media de la variable en el nivel bajo. Igualmente se exponen los efectos de la interacción y dependencia con otros factores. Se advierte que los datos que se presentan son estadísticas aplicables al experimento presente de manera muy particular, la extrapolación o la consideración de este para explicar el proceso como tal, no sería aconsejable.

5.1.1. Anova de pH

Según la normativa COGUANOR 29001, el pH debe estar entre los rangos de 6.5 a 8.5, en sus límites máximos; lo cual era lo esperado en las pruebas de laboratorio con la aplicación del proceso; sin embargo, si se visualiza en la tabla VIII, de 14 ensayos donde el aumento sobrepasó el 20 % en 11, el valor de pH superó el límite máximo superior luego de la aplicación del proceso. En ese sentido, el análisis de laboratorio en términos estadísticos se realizó en función del porcentaje de aumento del pH.

5.1.1.1. Análisis de varianza

El Anova divide la variabilidad en pH en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos. Como se observa en la tabla siguiente, en este caso que ninguno de los efectos tiene valores menores de “valor .P” (significancia prefijada) menores a 0.05, lo cual significa que el efecto del factor o de su interacción no es significativo sobre el pH.

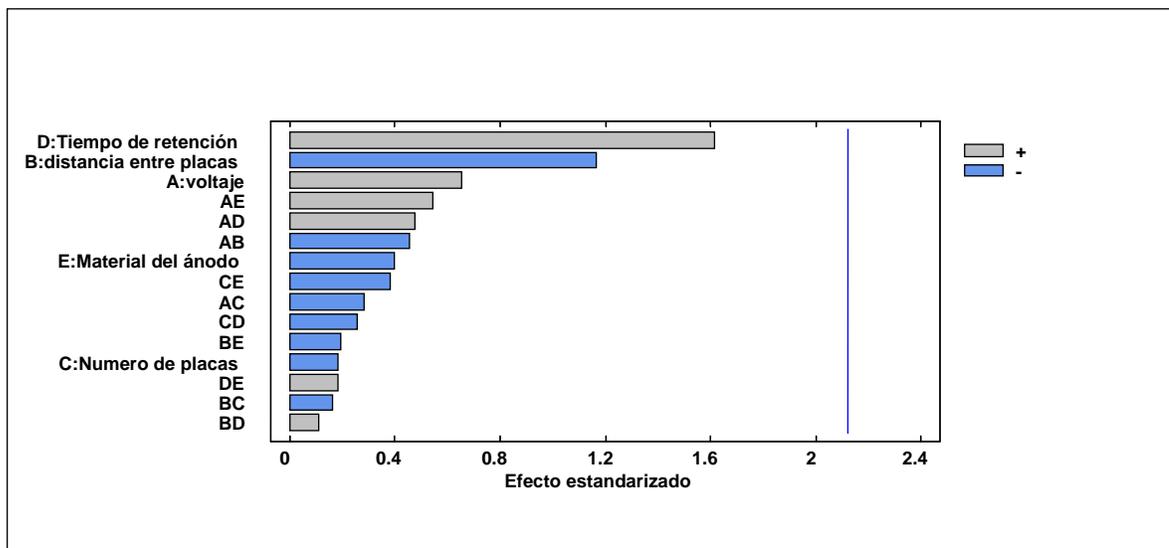
Tabla XIII. Anova del pH

Fuente	Suma de cuadrados	Grado de libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:voltaje	54.028	1	54.028	0.43	0.5223
B:distancia entre placas	172.33	1	172.33	1.36	0.2598
C:Número de placas	4.3218	1	4.3218	0.03	0.8556
D:Tiempo de retención	330.502	1	330.502	2.62	0.1252
E:Material del ánodo	19.9712	1	19.9712	0.16	0.6961
AB	26.0281	1	26.0281	0.21	0.6559
AC	10.0801	1	10.0801	0.08	0.7812
AD	28.7282	1	28.7282	0.23	0.6398
AE	37.6712	1	37.6712	0.30	0.5925
BC	3.4322	1	3.4322	0.03	0.8711
BD	1.60205	1	1.60205	0.01	0.9117
BE	4.6818	1	4.6818	0.04	0.8497
CD	8.50781	1	8.50781	0.07	0.7985
CE	18.271	1	18.271	0.14	0.7087
DE	4.27781	1	4.27781	0.03	0.8563
Error total	2020.32	16	126.27		
Total (corr.)	2744.75	31			

Fuente: elaboración propia.

El modelo tiene valores R^2 ajustados al 26.3934% de la variabilidad en aumento del pH(SD). El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0.0%.

Figura 6. **Diagrama de Pareto estandarizada para aumento del pH**



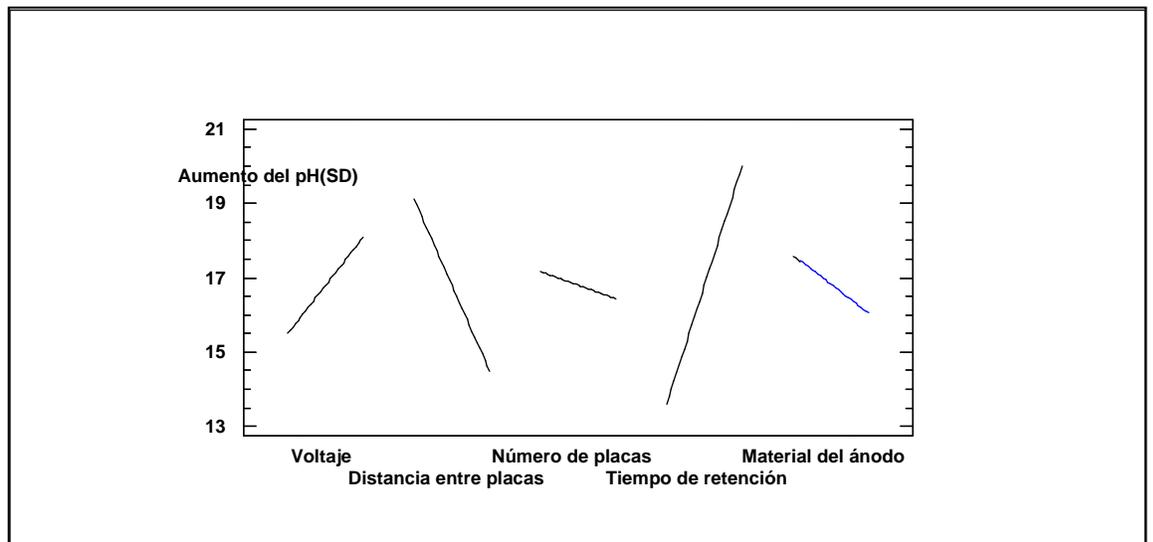
Fuente: elaboración propia.

En la figura # 8, se presenta el diagrama de Pareto correspondiente al aumento del pH; en este se visualiza de manera decreciente el grado de efecto de los factores, siendo los más significativos, el tiempo de retención y la distancia entre las placas y el voltaje; sin embargo, al visualizar que en la línea vertical no serían cortas ninguna de las barras, por lo que se puede decir que estadísticamente ninguno de los efectos son estadísticamente significativos.

5.1.1.2. Análisis de gráfico de datos

A continuación se presenta el gráfico de datos para el aumento de pH y su análisis de los efectos de las interacciones con los otros factores.

Figura 9. Gráfica de efectos principales para aumento del pH



Fuente: elaboración propia.

La figura 9 muestra sobre el eje de la "x", los factores controlables escogidos en el planteamiento original; para cada uno de ellos la línea está definida sobre los dos niveles de trabajo, por ejemplo, para el voltaje serían 9 y 6 voltios.

Las gráficas que crecen son las que causan un efecto significativo en el aumento del pH.

De lo definido, se observa que el voltaje y el tiempo de retención son los factores que afectan significativamente el aumento del pH.

Con el aumento del voltaje de 6 a 9 voltios y tiempos de retención, se da la tendencia de aumento en el porcentaje de pH; por otro lado, la distancia entre las placas crearía una condición contraria. Observando los resultados de la tabla IX, se observa que en los aumentos superiores al 20 %, se dio por lo menos uno de los factores en su nivel superior.

5.1.2. Anova de Fe

Según la normativa COGUANOR 29001, el Fe tiene límite máximo aceptable de 0.1 mg/l y el máximo permisible de 1 mg/l; sin embargo, si se visualiza en la tabla # 10, el porcentaje de remoción promedio fue de 45.97 %; en 21 ensayos se superó o se llegó cerca del promedio, luego de la aplicación del proceso. En ese sentido, el análisis de laboratorio en términos estadísticos se realizó en función del porcentaje de remoción de Fe.

5.1.2.1. Análisis de varianza

El Anova divide la variabilidad en Fe en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos. Como se observa en la tabla siguiente, en este caso ninguno de los efectos tiene valores menores de “Valor .P” (significancia prefijada) menores a 0.05, lo cual significa que el efecto del factor o de su interacción no es significativo sobre el Fe.

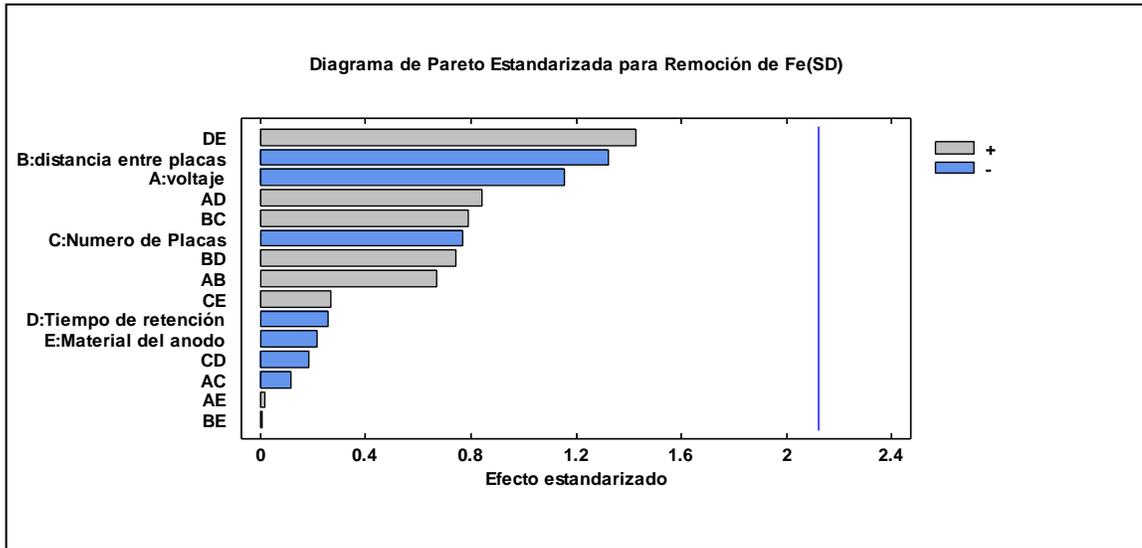
Tabla XIV. Anova de Fe

Fuente	Suma de cuadrados	Grado de libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:voltaje	1155.48	1	1155.48	1.33	0.2652
B:distancia entre places	1511.81	1	1511.81	1.74	0.2052
C:Numero de placas	510.162	1	510.162	0.59	0.4541
D:Tiempo de retención	57.1648	1	57.1648	0.07	0.8006
E:Material del ánodo	40.8834	1	40.8834	0.05	0.8308
AB	391.65	1	391.65	0.45	0.5110
AC	11.7977	1	11.7977	0.01	0.9086
AD	615.742	1	615.742	0.71	0.4117
AE	0.261003	1	0.261003	0.00	0.9864
BC	544.088	1	544.088	0.63	0.4398
BD	479.493	1	479.493	0.55	0.4678
BE	0.0536281	1	0.0536281	0.00	0.9938
CD	28.6335	1	28.6335	0.03	0.8581
CE	62.8601	1	62.8601	0.07	0.7911
DE	1763.73	1	1763.73	2.04	0.1729
Error total	13866.8	16	866.674		
Total (corr.)	21040.6	31			

Fuente: elaboración propia.

El modelo tiene valores R^2 ajustado 34.0951% de la variabilidad en aumento del pH(SD). El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 0.0%.

Figura 7. Diagrama de Pareto estandarizada para remoción de Fe



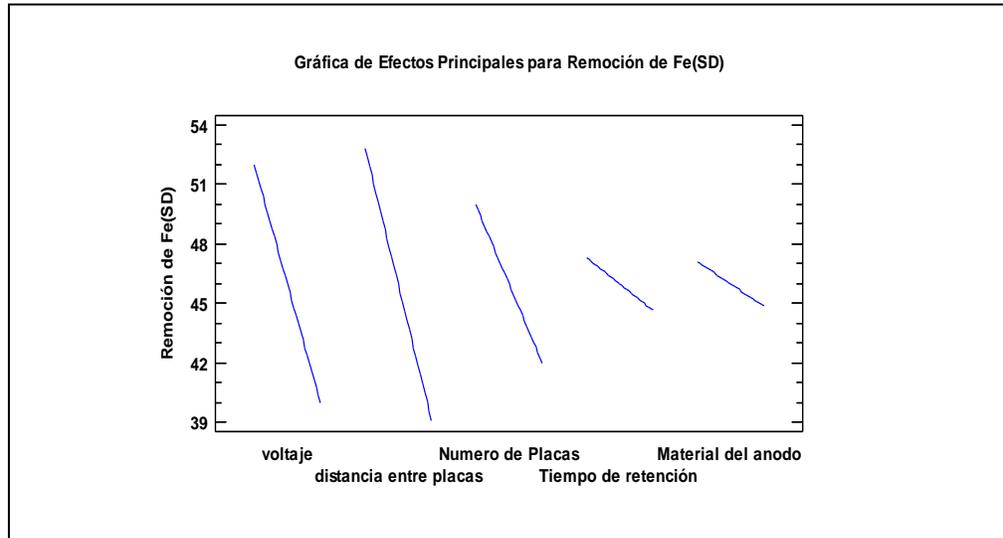
Fuente: elaboración propia.

En la figura 10, se presenta el diagrama de Pareto correspondiente al aumento del Fe; en este se visualiza de manera decreciente el grado de efecto de los factores, siendo igual de significativos el tiempo de retención, la distancia entre las placas y el voltaje todos los factores; sin embargo, al visualizar que la línea vertical no corta ninguna de las barras, se puede decir que ninguno de los efectos son estadísticamente significativos.

5.1.2.2. Análisis de gráfico de datos

A continuación se presenta el gráfico de datos para la remoción de Fe y su análisis de los efectos de las interacciones con los otros factores.

Figura 8. **Gráfica de efectos principales para remoción de Fe**



Fuente: elaboración propia.

La figura 11 muestra sobre el eje de la “x”, los cinco factores controlables escogidos en el planteamiento original; para cada uno de ellos la línea está definida sobre los dos niveles de trabajo, por ejemplo, para el voltaje serían 9 y 6 voltios.

Las gráficas que crecen son las que causan un efecto significativo en el aumento del la remoción de Fe.

De lo definido, se observa que el voltaje, la distancia y número de placas afectan significativamente la remoción de Fe, mientras que el tiempo de retención lo hace pero en menor medida.

5.1.3. Anova de Mn

Según la normativa COGUANOR 29001, el Fe tiene límite máximo aceptable de 0.050 mg/l y el máximo permisible de 0.50 mg/l; sin embargo, si se visualiza en la tabla X, el porcentaje de remoción promedio fue de 24.27 %; en 18 ensayos se superó o se acercó al promedio luego de la aplicación del proceso.

En ese sentido, el análisis de laboratorio en términos estadísticos se realizó en función del porcentaje de remoción de Mn.

5.1.3.1. Análisis de varianza

El Anova divide la variabilidad en Mn en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos.

Como se observa en la tabla siguiente, en este caso dos de los efectos tiene valores menores de “valor .P” (significancia prefijada) menores a 0.05, lo cual significa que el efecto del voltaje y de la distancia entre placas son significativos sobre el Mn.

Tabla XV. **Anova de Mn**

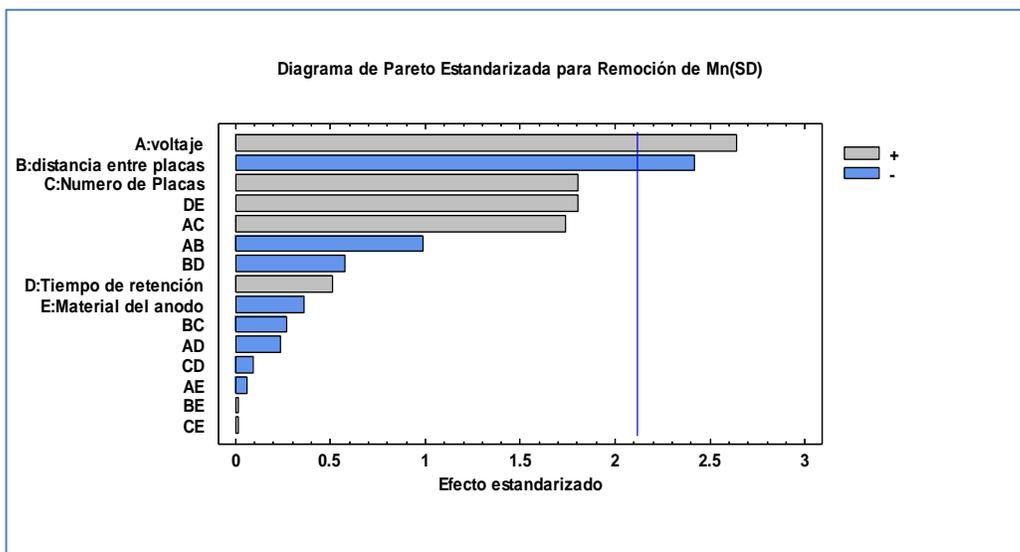
Fuente	Suma de cuadrados	Grado de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:voltaje	2130.9	1	2130.9	6.97	0.0178
B:distancia entre places	1781.9	1	1781.9	5.83	0.0281
C:Número de places	994.246	1	994.246	3.25	0.0902
D:Tiempo de retención	78.7826	1	78.7826	0.26	0.6186
E:Material del ánodo	40.1632	1	40.1632	0.13	0.7217
AB	298.351	1	298.351	0.98	0.3379
AC	925.898	1	925.898	3.03	0.1010
AD	17.0382	1	17.0382	0.06	0.8164
AE	1.0404	1	1.0404	0.00	0.9542
BC	21.8957	1	21.8957	0.07	0.7924
BD	101.924	1	101.924	0.33	0.5717
BE	0.0871531	1	0.0871531	0.00	0.9867
CD	2.66228	1	2.66228	0.01	0.9268
CE	0.0504031	1	0.0504031	0.00	0.9899
DE	991.349	1	991.349	3.24	0.0906
Error total	4890.64	16	305.665		
Total (corr.)	12276.9	31			

Fuente: elaboración propia.

En este caso, dos efectos tienen una valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%.

El modelo tiene valores R^2 ajustado 60.164% de la variabilidad en aumento del Mn. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 22.8177%.

Figura 9. **Diagrama de Pareto estandarizada para remoción de Mn**



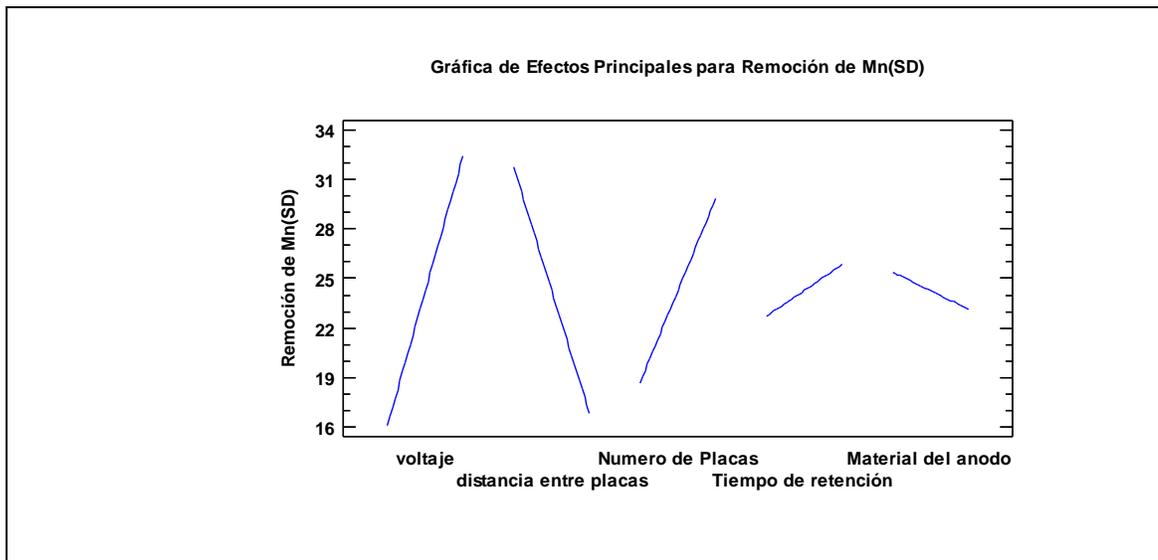
Fuente: elaboración propia.

En la figura 12, se presenta el diagrama de Pareto correspondiente al aumento del Mn; en este se visualiza de manera decreciente el grado de efecto de los factores, la distancia entre las placas y el voltaje todos los factores, y de menor manera el número de placas. Se visualiza que la línea vertical corta las barras de voltaje y distancia entre placas, siendo estos dos los estadísticamente significativos.

5.1.3.2. Análisis de gráfico de datos

A continuación se presenta el gráfico de datos para la remoción de Mn y su análisis de los efectos de las interacciones con los otros factores.

Figura 10. Gráfica de efectos principales para remoción de Mn



Fuente: elaboración propia.

La figura 13 muestra sobre el eje de la "x", los cinco valores de respuesta escogidos en el planteamiento original, para cada uno de ellos la línea está definida sobre los dos niveles de trabajo; por ejemplo, para el voltaje serían 9 y 6 voltios. Las gráficas que crecen son las que causan un efecto significativo en el aumento de la remoción de Mn.

De lo definido, se observa que el voltaje y la distancia entre placas afectan significativamente la remoción de Mn, mientras que el número de placas lo hace pero en menor medida.

A diferencia del Fe, la manera en que son afectadas las condiciones, son proporcionalmente inversas entre el voltaje y la distancia entre placas, mientras el voltaje favorecería a la remoción, la distancia la disminuye; es así que a más cercanía menor porcentaje. Observando los resultados de la tabla X, se visualiza que en los aumentos superiores o cercanos al promedio se dio por lo menos uno de los factores en los niveles ya especificados, pero en este caso se debe considerar que hubo cambios extremos en esta remoción, habiendo un rango de entre 2 a 71 %.

5.1.4. Anova de conductividad

Según la normativa COGUANOR 29001, el Fe tiene límite máximo aceptable menor a 1,500 us/cm, se visualiza en la tabla II, que el porcentaje de reducción promedio fue de 7.73 %; en 16 ensayos se superó o se acercó al promedio luego de la aplicación del proceso. En ese sentido, el análisis de laboratorio en términos estadísticos se realizó en función del porcentaje de reducción de la conductividad.

5.1.4.1. Análisis de varianza

El Anova divide la variabilidad en conductividad en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos. Como se observa en la tabla siguiente, en este caso que ninguno de los efectos tiene valores menores de “valor .P” (significancia prefijada) menores a 0.05, lo cual significa que el efecto del factor o de su interacción no es significativo sobre la conductividad.

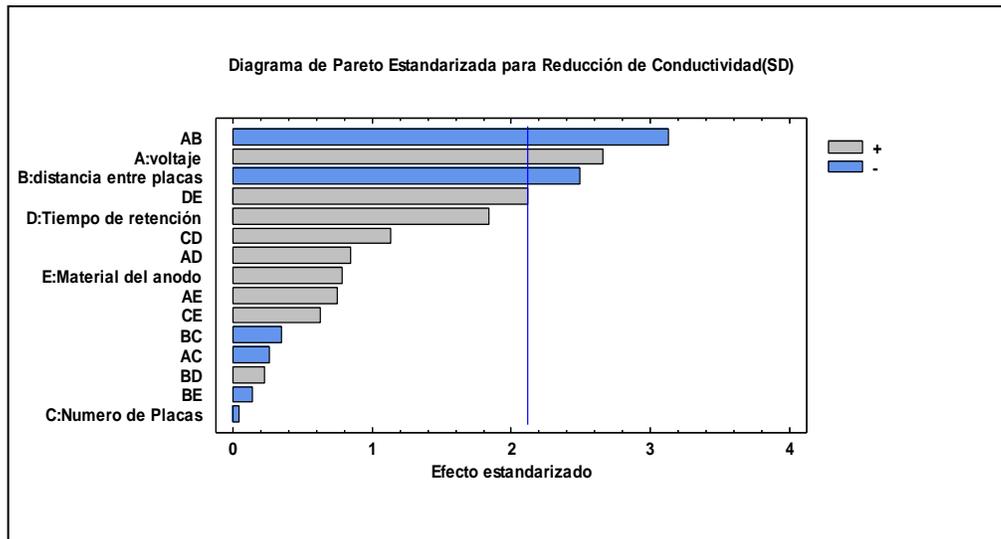
Tabla XVI. **Anova de la conductividad**

Fuente	Suma de cuadrados	Grado de libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:voltaje	167.537	1	167.537	7.07	0.0172
B:distancia entre placas	146.804	1	146.804	6.19	0.0242
C:Número de placas	0.05445	1	0.05445	0.00	0.9624
D:Tiempo de retención	80.3278	1	80.3278	3.39	0.0842
E:Material del ánodo	14.6341	1	14.6341	0.62	0.4435
AB	232.094	1	232.094	9.79	0.0065
AC	1.63805	1	1.63805	0.07	0.7960
AD	16.849	1	16.849	0.71	0.4116
AE	13.4681	1	13.4681	0.57	0.4619
BC	2.9282	1	2.9282	0.12	0.7298
BD	1.20901	1	1.20901	0.05	0.8242
BE	0.45125	1	0.45125	0.02	0.8920
CD	30.2642	1	30.2642	1.28	0.2751
CE	9.30961	1	9.30961	0.39	0.5397
DE	106.58	1	106.58	4.50	0.0499
Error total	379.185	16	23.6991		
Total (corr.)	1203.33	31			

Fuente: elaboración propia.

En este caso, cuatro efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%. El modelo tiene valores R^2 ajustado de 68.4888% de la variabilidad en reducción de la conductividad. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 38.947%.

Figura 14. **Diagrama de Pareto estandarizada para reducción de conductividad**



Fuente: elaboración propia.

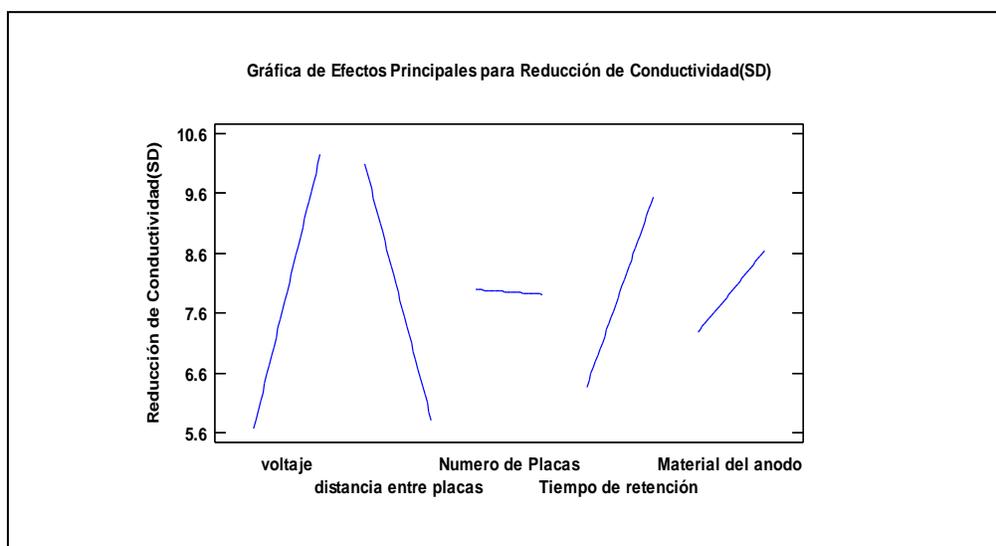
En la figura 14 se presenta el diagrama de Pareto correspondiente a la reducción de la conductividad; en este se visualiza de manera decreciente el grado de efecto de los factores, la distancia entre las placas y el voltaje de todos los factores; y de menor manera, el número de placas.

Se visualiza que la línea vertical corta las barras de voltaje y distancia entre placas, siendo estos dos los estadísticamente significativos, pero de igual manera el efecto combinado de ambos es un factor determinante aún mayor.

5.1.4.2. Análisis gráfico de datos

A continuación se presenta el gráfico de datos para la reducción de conductividad y su análisis de los efectos de las interacciones con los otros factores.

Figura 11. **Gráfica de efectos principales para reducción de conductividad**



Fuente: elaboración propia.

La figura 15 muestra sobre el eje de la "x", los cinco valores de respuesta escogidos en el planteamiento original, para cada uno de ellos la línea está definida sobre los dos niveles de trabajo; por ejemplo, para el voltaje serían 9 y 6 voltios. Las gráficas que crecen son las que causan un efecto significativo en la reducción de la conductividad.

De lo definido, se observa que el voltaje y la distancia entre placas afectan significativamente la reducción de conductividad, mientras que el número de placas lo hace pero en menor medida.

La manera en que son afectadas las condiciones, es cuando son proporcionalmente inversas entre el voltaje y la distancia entre placas; mientras el voltaje favorecería a la remoción, la distancia la disminuye, es así que a más cercanía menor porcentaje.

El tiempo de retención es un factor que aumentaría la reducción pero de una manera menos significativa. Observando los resultados de la tabla IX, se visualiza que en los aumentos superiores o cercanos al promedio se dio por lo menos uno de los factores en los niveles ya especificados, pero en este caso se debe considerar que hubo cambios menores que los otros factores, habiendo un rango de entre 0 a 23 %.

5.2. Análisis de costos

A continuación se presenta el análisis de costos con base en los materiales utilizados, para la construcción de la celda optimizada.

5.2.1. Costos de materiales de construcción de la celda optimizada

El listado de materiales y equipos utilizados para la elaboración del prototipo optimizado por el sistema estadístico, se presenta en la tabla siguiente.

Tabla XVII. **Costos de construcción de prototipo final**

Material	Unidad	Precio unitario (Q)	Cantidad	Total
Pecera de vidrio	Unidad	125.00	1	125.00
Placa de Cu (10x10x0.2 cm).	Placa	21.60	9	194.40
Tubo de CPVC ½"	Metro	11.40	0.50	5.70
Codo CPVC ½" x 90°	Unidad	3.30	8	26.40
Tee CPVC ½"	Unidad	3.60	4	14.40
Pegamento CPVC (50 g.)	Unidad	15.95	1	15.95
Cable eléctrico AWG cal.14	Metro	2.65	3	7.95
Espiga hembra plana	Unidad	1.50	20	30.00
Espiga tipo tenaza	Unidad	3.10	18	55.80
Adaptador eléctrico universal	Unidad	145.00	1	145.00
Total				620.20

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, se utilizaron materiales y herramientas que no responderían directamente al modelo final, aunque sí en el momento del montaje del prototipo o para la recolección de datos, que corresponden también a la inversión original para el desarrollo del experimento.

Tabla XVIII. **Materiales y herramientas adicionales utilizadas en la inversión original para construcción del prototipo**

Equipo	Unidad	Costo unitario (Q)	Cantidad	Total
Multímetro eléctrico	Unidad	245.00	1	245.00
Martillo de hule	Unidad	32.00	1	32.00
Placa de Cu sobrante (10x10x0.2 cm).	Placa	21.60	91	1,965.60
Tenazas eléctricas	Unidad	21.00	1	21.00
Navaja para electricista	Unidad	49.50	1	49.50
Sierra para metal	Unidad	23.00	1	23.00
TOTAL				2,336.10

Fuente: elaboración propia.

5.2.1.1. Costos de operación

A continuación se hace un análisis tomando en cuenta que estas plantas podrían dirigirse a un mercado de plantas domiciliarias o para uso en emergencias, debido a que el volumen de tratamiento no es grande.

5.2.1.1.1. Energía eléctrica

Para la definición del coste de energía, se hará el cálculo por medio de la fórmula (9), identificada en el numeral 2.3.3.1:

_____ (9);

Donde:

E= energía consumida expresada en KW.h/m³

P = V*I

Y este a su vez es:

P= Potencia (watts)

V= Voltaje aplicado (voltios)

I = Intensidad (amperios)

t= tiempo en horas

1000 es factor de conversión de Watts (W) a Kilowatts (Kw); y el volumen está definido en m³.

Aplicando la ecuación sobre el prototipo optimizado, y considerando que el voltaje aplicado fue de 7.5 voltios (V) y la intensidad de 26.82 amperios (A), se tiene:

Considerando que el costo por kw.h de la Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A., distribuidor vigente en el área del departamento de Guatemala, es de Q.1.770711 por kw.h, el consumo por metro cúbico tratado es de Q.6.19.

De la visita al Condominio Terravista, se identificó que la tarifa por consumo de agua es de Q.190.00 por 45 metros cúbicos; tomando como referencia este volumen, se tendría un consumo por tratamiento de Q.278.88 por mes.

5.2.1.2. Desgaste de placas

Se percibió una disminución de la eficiencia de las placas a cada 15 ensayos; al llegar a la dieciséis se comenzaba a ver una disminución de la intensidad (I), lo cual podría interpretarse desde la ley de Ohm ($I = V/R$), como un aumento de la resistencia (R) de los electrodos; aun cuando el Voltaje se mantuviera constante; bajo estas condiciones los valores de eficiencia de remoción disminuían. Lo anterior se corrigió con la sustitución de las placas y repetición de los ensayos.

De la bibliografía consultada, se concluye que el cambio de placas puede realizarse entre 2 a 4 veces al año, pero esta condición podría variar dependiendo del material. Bajo las condiciones de este estudio no es posible determinar el máximo rendimiento del uso de las placas, pero para usos del estudio se asume que podrán realizarse tres cambios. Por lo que el costo estimado de sustitución es de Q. 194.40 cada tres meses.

5.2.1.3. Mantenimiento

Se buscará a un operario que realice la limpieza semanal del sistema y el mantenimiento, cada cuatro meses; no se necesita que esta persona labore en forma permanente; si se estima un día trabajo en Q.116.00, más costos de movilización en Q.100.00, da un total de Q.216.00.

Se analizaron los costos de mercado en mantenimiento de plantas purificadoras de ozono para hogar, con el que guardaría similitud.

5.2.2. Análisis de factibilidad financiera

De los análisis para la definición de los costos previamente tratados se realiza el siguiente análisis:

Tabla XIX. Análisis de factibilidad financiera

Costo anuales		Desembolsos	
Inversión directa e indirecta	Q. 3,072.30	Aporte mensual inicial	Q. 1,207.68
Operación	Q. 1142.88	Incremento anual	6 %
Mantenimiento	Q. 777.60		
Incremento anual	12 %		

Fuente: elaboración propia.

Utilizando un análisis de evaluación financiera con recuperación de fondos para un periodo estimado de 5 años, se obtiene un VAN de -1790 y un TIR de -19 %.

CONCLUSIONES

1. En virtud de los resultados obtenidos en laboratorio, el porcentaje de reducción de Fe es de 45.97 % y para Mn de 24.27 %; lo cual no asegura alcanzar reducciones en el caso del hierro de 3 mg/l a 1 mg/l, así como la concentración de manganeso de 21 mg/l a 0.50 mg/l, como fue previsto en un inicio. Sin embargo, en condiciones de concentración inicial por debajo de dichos porcentajes, es factible la aplicación de la tecnología de electrocoagulación, es decir, para superiores a 1.45 mg/l, en el caso del hierro y 0.62 mg/l para manganeso.
2. Al tener el proceso de electrocoagulación un potencial considerable de remoción de Fe, podría haber potencial en la remoción de otros metales pesados o de sustancias que afectan la salud pública o el ambiente, cuando su presencia es significativa en el agua.
3. El proceso de electrocoagulación, bajo las condiciones específicas del presente estudio, no favorecen la factibilidad de su aplicación desde el punto de financiero, dado que los indicadores de TIR de -19; y VAN de 1790.15, no fueron los más favorecedores, pues serían inferiores al TIR referencial del 12 %, siendo negativo el valor del VAN; pero un enfoque con variantes sobre las tecnologías complementarias, materiales y de alcances sobre el tipo de sustancias a remover podría permitir su factibilidad.
4. El uso de un modelo estadístico de diseño de experimentos permite tener un enfoque científicamente sustentado de la elaboración de los procesos y de la determinación de sus resultados finales.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda explorar la Implementación de un modelo para tratamiento de aguas residuales, por ser el área de investigación con mayores antecedentes bibliográficos con conclusiones positivas, lo que podría darle más opciones de aplicación sobre todo en el área industrial o comercial, donde el tema de la sostenibilidad operativa cuenta con más recursos financieros.
2. Explorar la posibilidad para el tratamiento de agua para consumo humano en condiciones de emergencia, donde la aplicación se realiza de manera temporal y el tema financiero es superado contra la priorización del tema social.
3. Investigar el efecto de tipos de materiales en la elaboración de la celda, como fibra de vidrio para la celda o en cuanto a placas con materiales de costos menores como aluminio o acero.
4. Experimentar el efecto que podría tener este proceso en un sistema con caudal continuo como en el caso de una descarga de aguas residuales, utilizando para la precipitación de sólidos la aplicación de químicos o por medio de canales, que son métodos de uso común en aplicaciones reales y experimentales, según referencias bibliográficas identificadas durante la investigación. Esto sería una alternativa al uso de máquinas agitadoras como se ha implementado en el presente caso, lo cual podría reducir en alguna medida el consumo de energía eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARANGO RUIZ, Álvaro. “La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales”. Revista Lasallista de Investigación, enero – junio, año/vol. 2, número 001. Corporación Universitaria Lasallista, Antioquía, Colombia. 2005. 56 p.
2. ARANGO RUIZ, Álvaro; Garcés Giraldo, Luis Fernando. “*Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea*”. Universidad EAFIT. Julio – septiembre, año/vol. 43, número 147-2007. Medellín. 2007. 67 p.
3. ARANGO RUIZ, Álvaro; Garcés Giraldo, Luis Fernando; Restrepo, Ana Patricia. “*La electrocoagulación retos y oportunidades en el tratamiento de aguas*”. Revista Producción + Limpia”. Edición julio-diciembre 2006. 73 p.
4. ARISTIZÁBAL CASTRILLON, Adriana; Bermudez Agudelo, María Catalina. *Estudio de factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso*. Tesis de Ingeniería Química, Universidad pontificia Bolivariana, Escuela de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química, Medellín, Colombia. 2007. 142 p.

5. BLAS AMADOR, G.; Tirado, L. A. *Aplicación de electrocoagulación para la eliminación de cromo en agua*. Instituto de investigaciones eléctricas. IV Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico. Morelos, México. Del 11 al 13 de octubre de 2006.
6. CORDÓN M. Octavio y Avendaño Flores, Norma. *Aplicación de estudios de laboratorio al diseño de plantas de tratamiento de agua*. Artículo XXI Congreso Centroamericano y Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 1999. 35 p.
7. GONZÁLEZ MALDONADO, Guadalupe. *Estudio de la celda electroquímica sobre la remoción de fluoruros en el agua para consumo doméstico del estado de Aguas Calientes*. Tesis de Doctorado de Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, México, 2009. 192 p.
8. HERNÁNDEZ LEHMANN, Pablo Santiago. *Investigación sobre procesos avanzados de tratamiento y depuración de las aguas mediante electrocoagulación*. Tesis de Doctorado en Ingeniería de Canales, Caminos y Puentes, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, 2011. 652 p.
9. JARAMILLO PÁEZ, Cesar Augusto; Jaramillo Giraldo, Alexander; Tarborda Ocampo, Gonzalo. *Construcción de un reactor electroquímico para electrocoagulación como método alternativo en descomposición de aguas residuales*. Revista de Universidad de Caldas, julio – diciembre 2005. 158 p.

10. JIMÉNEZ MOLINA, Esperanza; Rangel Santiago, Esmeralda. *Remoción de metales pesados en una muestra modelo mediante un proceso electroquímico*. Tesis de ingeniería Química, Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas, 2011. 74 p.
11. MORALES POSADA, Nelly; Acosta Niño, Gema. “*Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas*”. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 20-1, Bogotá, junio de 2010. 44 p.
12. MORANTE G. Gonzalo. “*Electrocoagulación de aguas residuales*”. Revista Colombiana de Física. Vol. 34, No 2. 2002.
13. OJEDA ARMAIGNAC, Elaine y HING CARTÓN, Romelia. *Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de hierro*. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, Revista Tecnología Química. Vol. XXX, 1-2010. 2010. 30 p.
14. PAPALETTO TAMAYO, Martín Adolfo y Rodríguez, Stephen Enrique. *Diseño y construcción del prototipo de un sistema de electrocoagulación de tratamiento de aguas residuales*. Tesis de Ingeniería Electrónica, Universidad de San Buenaventura Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Energía Electrónica, Santiago de Cali, Colombia, 2011. 122 p.
15. PIÑÓN MIRAMONTES, Manuel; Pérez Hernández, Antonio; Margulis, Raúl. *Diseño de un equipo de electrocoagulación para la eliminación de flúor en agua subterránea*. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cancún, México, 2002.

16. REYES ÁVILA, Deisy; Mercado Martínez, Iván Darío. *Estudio de tratabilidad por electrocoagulación de los lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda*. Tesis de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2003. 133 p.
17. VÁZQUEZ ARANDA, Almazán Ruíz, Cruz Díaz, Delgadillo Gómez. *Estudio de una celda de electrocoagulación mediante Herramientas computacionales y distribución de tiempos de residencia*. XXV Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica. Zacatecas, México. 2010.