

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE TRES MÉTODOS PARA LA
DECOLORACIÓN DE DESECHOS LÍQUIDOS ACUOSOS, EN UNA
INDUSTRIA MANUFACTURERA DE CAFÉ SOLUBLE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARICELY ELÍZABETH SUCHINI MOSCOSO
ASESORADO POR EL ING. QUÍMICO JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, ENERO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
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 Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
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:

EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE TRES MÉTODOS PARA LA DECOLORACIÓN DE DESECHOS LÍQUIDOS ACUOSOS, EN UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE CAFÉ SOLUBLE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha julio de 2010.



Maricely Elizabeth Suchini Moscoso



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, 19 de septiembre de 2011

Ingeniero
WILLIAMS GUILLERMO ÁLVAREZ MEJÍA
DIRECTOR
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
Su Despacho

Respetable Señor Director:

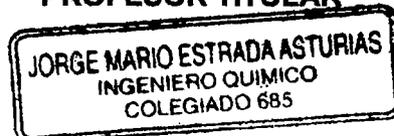
Me dirijo a usted en relación al informe final del trabajo de graduación de la estudiante **MARICELY ELÍZABETH SUCHINI MOSCOSO**, carné No. **2005-12251**, titulado **"EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE TRES MÉTODOS PARA LA DECOLORACIÓN DE DESECHOS LÍQUIDOS ACUOSOS, EN UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE CAFÉ SOLUBLE"**.

En común acuerdo con la estudiante Suchini y los personeros directivos de la empresa Industria de Café, S. A. he aceptado fungir como asesor de dicho trabajo, y habiendo revisado su contenido he visto que tanto los aspectos metodológicos como los demás componentes del cuerpo del informe final de graduación se ajustan al perfil solicitado por nuestra escuela, por lo que considero procedente aprobar el mismo para la continuación de los trámites procedentes.

Sin más por el momento, suscribo de usted

Cordialmente

JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS
Ingeniero Químico, colegiado 685
PROFESOR TITULAR





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
Edificio T-5, Ciudad Universitaria, zona 12, Guatemala, Centroamérica
Teléfono directo: (502) 2418-9118 PBX: 2418-8000 extensión 1599 Extensión 86214

Guatemala, 10 de Noviembre de 2011
Ref.EIQ.TG.270.2011

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-186-2011-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERA QUÍMICA a la estudiante universitaria, **Maricely Elizabeth Suchini Moscoso**, identificada con carné No. **2005-12251**, titulado: "EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE TRES MÉTODOS PARA LA DECOLORACIÓN DE DESECHOS LÍQUIDOS ACUOSOS, EN LA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE CAFÉ SOLUBLE", el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico **Jorge Mario Estrada Asturias**.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al estudiante **Suchimi Moscoso**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Inga. **Teresa Lisey de León Arana, M.Sc.**
COORDINADORA

Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



C.c.: archivo



ACAAI



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.018.2012

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **MARICELY ELÍZABETH SUCHINI MOSCOSO** titulado: "**EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE TRES MÉTODOS PARA LA DECOLORACIÓN DE DESECHOS LÍQUIDOS ACUOSOS, EN UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE CAFÉ SOLUBLE**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía, C.Dr.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, enero de 2012



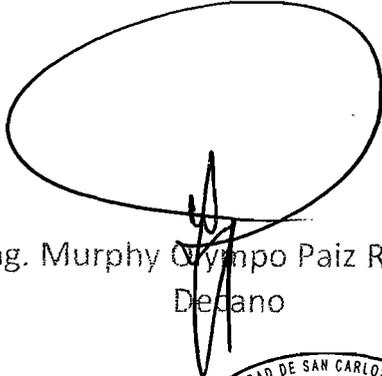
Cc: Archivo
WGAM/ale



DTG. 036.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DE TRES MÉTODOS PARA LA DECOLORACIÓN DE DESECHOS LÍQUIDOS ACUOSOS, EN UNA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE CAFÉ SOLUBLE**, presentado por la estudiante universitaria **Marlcely Elizabeth Suchini Moscoso**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Murphy Olympos Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 25 de enero de 2012.



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por estar conmigo en cada paso de mi vida, darme siempre de su sabiduría e inteligencia y permitirme alcanzar la primera de muchas metas propuestas.
- Mis padres** César Leonel Suchini Paiz y Lola Celina Moscoso de Suchini, por ser los pilares en mi formación como persona, por el amor, apoyo y consejos que me han permitido ser quien soy ahora.
- Mis hermanas** Lesly Celina y Enma Karolina Suchini Moscoso, por el apoyo y cariño demostrado en cada día de mi vida.
- Mis abuelos** Ricardo Suchini (q.e.p.d.), Etelvina Paiz (q.e.p.d.), César Moscoso, Ana Dolores Machorro (q.e.p.d.), porque fueron parte muy importante en mi formación como persona.
- Mi novio** Hugo Rubén Barrera Guevara, por el amor y apoyo incondicional que me ha dado durante el tiempo que hemos compartido juntos, gracias por ser una de las personas más importantes en mi vida, te amo.
- Mis amigos** Por permitirme conocer el valor de la amistad y estar ahí siempre para brindarme su apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de
San Carlos de
Guatemala**

Sin lugar a duda, la mejor Universidad de Guatemala. Dentro de sus aulas aprendí que la perseverancia es la clave del éxito. Me siento orgullosa de ser san carlista.

**Facultad de
Ingeniería**

Por haberme dado la oportunidad de adquirir el conocimiento y formarme como profesional.

**Escuela de
Ingeniería Química**

Por darme las herramientas básicas y poder desarrollarme en el campo como Ingeniera Química.

**Industria
manufacturera de
café soluble**

Por abrirme las puertas y permitirme llevar a cabo mi trabajo de graduación, brindándome los recursos necesarios y el soporte técnico indispensable, en especial al personal por su apoyo, conocimiento y amistad.

Mis revisores

Por haberme apoyado durante el desarrollo del presente trabajo de graduación, su consejo y colaboración.

Mi asesor

Ing. Químico, Jorge Mario Estrada Asturias, por brindarme su apoyo, consejo y tiempo desinteresadamente.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Legislación ambiental de Guatemala	3
2.2. Fuentes de contaminación del agua	5
2.3. Definición de contaminantes y contaminación	5
2.3.1. Contaminantes.....	5
2.3.2. Contaminación.....	6
2.4. Clasificación de los contaminantes	6
2.4.1. Contaminantes orgánicos	6
2.4.2. Contaminantes inorgánicos.....	6
2.5. Parámetros indicadores de contaminación	7
2.5.1. Parámetros físicos	7
2.5.1.1. Temperatura	7
2.5.1.2. Sólidos.....	7
2.5.1.3. Color.....	8
2.5.1.4. Olor.....	9
2.5.1.5. Turbiedad	9

2.5.2.	Parámetros químicos.....	9
2.5.2.1.	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	9
2.5.2.2.	Demanda química de oxígeno (DQO).....	10
2.6.	Condición coloidal	10
2.6.1.	Propiedades de los coloides.....	10
2.7.	Procesos avanzados de oxidación	11
2.7.1.	Peróxido de hidrógeno y catalizador (H ₂ O ₂ /Fe ²⁺)	13
2.7.2.	Foto-fenton (Fe ²⁺ /H ₂ O ₂ /UV).....	14
2.8.	Procesos electroquímicos.....	17
2.8.1.	Oxidación en ánodo.....	17
2.8.2.	Reducción en cátodo.....	18
2.8.3.	Electrocoagulación	18
2.8.3.1.	Celda de electrocoagulación	19
2.8.3.2.	Conceptos generales del diseño de una celda electroquímica	22
2.8.4.	Ventajas y desventajas de la electrocoagulación	25
2.8.4.1.	Ventajas	25
2.8.4.1.	Desventajas	26
2.9.	Adsorción.....	27
2.9.1.	Formas clásicas de utilización del carbon activo	28
2.9.2.	Parámetros que afectan el proceso de adsorción	29
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	31
3.1.	Variables.....	31
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	32
3.2.1.	Universo de estudio	32
3.2.2.	Población o muestra	32

3.2.2.1.	Número de corridas	32
3.2.2.2.	Tamaño de muestras.....	33
3.3.	Recursos humanos disponibles	34
3.4.	Recursos materiales disponibles	34
3.4.1.	Cristalería de laboratorio.....	35
3.4.2.	Reactivos	35
3.4.3.	Equipo extra.....	35
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	36
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	37
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	38
3.8.	Análisis estadístico	38
3.8.1.	Media aritmética.....	39
3.8.2.	Desviación estándar	39
4.	RESULTADOS.....	41
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	47
5.1.	Método foto fenton	47
5.2.	Método por electrocoagulación.....	49
5.3.	Método de adsorción	52
	CONCLUSIONES.....	55
	RECOMENDACIONES	57
	BIBLIOGRAFÍA	59
	APÉNDICES.....	61
	ANEXOS	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Representación esquemática simplificada del sistema foto fenton y la generación de radicales hidroxilo.....	15
2.	Diagrama esquemático de una celda de electrocoagulación de dos electrodos.....	21
3.	Configuración de equipos electroquímicos en paralelo.....	23
4.	Representación de fuerzas en un sólido.....	27
5.	Porcentaje promedio de remoción de color para el método foto fenton.....	41
6.	Porcentaje promedio de remoción de color para el método por electrocoagulación.....	42
7.	Porcentaje promedio de remoción de color para el método de adsorción con carbón activado.....	43

TABLAS

I.	Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores.....	4
II.	Clasificación de las partículas.....	8
III.	Procesos avanzados de oxidación.....	12
IV.	Principales aspectos positivos y negativos en la utilización de foto fenton para el tratamiento de efluentes.....	16
V.	Variables para los métodos de estudio.....	31

VI.	Tamaño de la muestra para cada corrida de los métodos.....	33
VII.	Diseño experimental, toma de datos.....	38
VIII.	Cumplimiento con las diferentes etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006, para cada concentración de sulfato de hierro utilizadas en el método foto fenton.....	44
IX.	Cumplimiento con las diferentes etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006, para cada separación entre electrodos utilizadas en el método por electrocoagulación.....	45
X.	Cumplimiento con las diferentes etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006, para cada caudal utilizado en el método por adsorción.....	46

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
L/min	Caudal
Cm	Centímetro
mol/L	Concentración molar (M)
H₂	Gas hidrógeno
O₂	Gas oxígeno
G	Gramos
L	Litro
UV	Luz ultravioleta
mL	Mililitro
Min	Minutos
H₂O₂	Peróxido de hidrógeno

pH	Potencial de hidrógeno
Fe	Sal de hierro
FeSO₄*7H₂O	Sulfato de hierro heptahidratado
Pt-Co	Unidades platino-cobalto
V	Voltios

GLOSARIO

Adsorción

Se utiliza para eliminar de forma individual los componentes de una mezcla gaseosa o líquida. El componente a separar se liga de forma física o química a una superficie sólida.

Carbón activado

Material que se caracteriza por poseer una cantidad muy grande de microporos (poros menores a 1 nanómetro de radio). A causa de su alta microporosidad, un solo gramo de carbón activado puede poseer un área superficial de 500 m² o más.

Coloide

Sistema fisicoquímico formado por dos o más fases, principalmente una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas; por lo general sólidas. La fase dispersa es la que se halla en menor proporción.

Contaminación

Alteración nociva del estado natural de un medio como consecuencia de la introducción de un agente totalmente ajeno a éste (contaminante), causando inestabilidad, desorden, daño o malestar en un ecosistema, en el medio físico o en un ser vivo.

**Desecho líquido
Acuoso**

Residuos en estado líquido provenientes de las aguas residuales o aguas servidas, las cuales contienen sólidos en suspensión que son contaminantes, también pueden ser residuos peligrosos los materiales corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, inflamables o biológico infecciosos en estado líquido.

Electrocoagulación

Está basado en la utilización de técnicas electroquímicas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua (que necesariamente ha de contener un electrolito) provocando reacciones de oxidación-reducción, tanto en el cátodo como en el ánodo. Por lo tanto, se utiliza energía eléctrica como vector de descontaminación ambiental.

Electrodo

Placa de membrana rugosa de metal, conductor utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito

Flóculo	Es formado por la acumulación de partículas suspendidas. Puede ocurrir de forma natural, pero es usualmente inducido.
Foto fenton	Proceso de oxidación avanzada que utiliza la luz UV (luz ultravioleta), para la degradación catalítica de material químico presentes en aguas residuales descargadas de diversas industrias.
Fuente de poder	Es una fuente eléctrica, un artefacto activo que puede proporcionar corriente eléctrica, gracias a la generación de una diferencia de potencial entre sus bornes.
Lodo	Es producido en las operaciones y procesos de tratamiento de las aguas residuales, generalmente suele ser un líquido o líquido-semisólido con gran contenido en sólidos entre el 0,25 y el 12% en peso. El lodo es, por mucho, el constituyente de mayor volumen eliminado en los tratamientos.
Unidades Pt-Co	Medida del color que le confieren al agua los materiales contaminantes.

RESUMEN

Para la reducción de color en desechos líquidos acuosos con alto contenido de coloides orgánicos, provenientes del proceso del grano de café, se propuso a nivel laboratorio la comparación de tres métodos: foto fenton, electrocoagulación y adsorción con carbón activado; como medio de cumplimiento con el Acuerdo Gubernativo 236-2006, Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos.

Para el método foto fenton se utilizó el sistema sulfato de hierro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 3%. Se trabajó con concentraciones de 0,25, 0,5 y 0,75 M para la sal de hierro. Se inició tomando una muestra de 100 mL del desecho líquido acuoso, posteriormente se le agregó 10 mL de H_2O_2 y 1 mL de solución de hierro, luego se expuso a la radiación solar por 60 minutos. Los resultados obtenidos para dicho método en cuanto al porcentaje de remoción de color, fueron de 86, 91 y 87%, para concentraciones de 0,75, 0,5 y 0,25 mol/L respectivamente. Al comparar los resultados de color con las diferentes etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006, se observó que cumplió con 3 de 4 etapas.

El método por electrocoagulación consistió en la aplicación de un campo eléctrico a través de electrodos de aluminio. Se trabajó con voltajes de 12, 18 y 24 V; distancias de 0,5, 1,0 y 1,5 cm entre las placas del electrodo y un tiempo de aplicación de corriente de 30 minutos. El resultado mayor de porcentaje de remoción de color fue para una aplicación de 24 voltios y una separación de 0,5 cm. entre las placas del electrodo, obteniendo un 89,91% de remoción.

Al comparar los resultados de color con las diferentes etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006, se observó que cumplió con 2 de 4 etapas.

Para el método por adsorción se construyó una torre de carbón activado, en donde se puso en contacto el desecho líquido acuoso con la superficie del carbón activado granular. Se trabajó con caudales de 1, 0,67 y 0,5 L/min.

El resultado mayor de porcentaje de remoción de color se obtuvo para un caudal de 0,5 L/min, con un 45,85% de remoción. Este método no cumplió con ninguna de las etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

OBJETIVOS

General

Evaluar a nivel laboratorio los métodos para decoloración, foto-fenton, electrocoagulación y adsorción, de un desecho líquido acuoso con alto contenido de coloides orgánicos en un industria manufacturera de café soluble, como medio de cumplimiento de la legislación ambiental guatemalteca.

Específicos

1. Evaluar la eficiencia de remoción de color a nivel de laboratorio, expresada como porcentaje, del método foto fenton para la decoloración de desechos líquidos acuosos con alto contenido de coloides orgánicos.
2. Evaluar la eficiencia de remoción de color a nivel de laboratorio, expresada como porcentaje, del método por electrocoagulación para la decoloración de desechos líquidos acuosos con alto contenido de coloides orgánicos.
3. Evaluar la eficiencia de remoción de color a nivel de laboratorio, expresada como porcentaje, del método de adsorción con carbón activado para la decoloración de desechos líquidos acuosos con alto contenido de coloides orgánicos.

4. Comparar los resultados de color con los límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, del Acuerdo Gubernativo 236-2006, Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos.

INTRODUCCIÓN

El agua cumple una doble función en la industria, como materia prima y vehículo de evacuación de gran parte de los residuos generados. Esta segunda función hace que las características del agua utilizada se vean severamente alteradas tras su paso por la industria, impidiendo en numerosos casos, su uso posterior, o simplemente su descarga a cuerpos receptores, debido a la contaminación que provocaría a la naturaleza.

Ante esta situación de contaminación al medio ambiente, provocada en mayor cantidad por las industrias, el gobierno de Guatemala estableció el Acuerdo Gubernativo 236-2006, Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos, para obligar a las industrias a desarrollar una tecnología que proteja el medio ambiente, cumpliendo de esta manera con los parámetros máximos permisibles para la descarga de las aguas residuales a los cuerpos receptores. Para resolver esta problemática y cumplir con el parámetro de color en las diferentes etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006, en la industria manufacturera de café soluble, se realizó el estudio para tratar sus desechos líquidos acuosos y reducir de esta forma la cantidad de coloides orgánicos que provocan el color característico café de los mismos.

Los métodos seleccionados para dicho estudio de decoloración fueron: foto fenton, electrocoagulación y adsorción con carbón activado; éstos están fundamentados por los temas de oxidación, electroquímica y adsorción, respectivamente.

1. ANTECEDENTES

La mayoría de las industrias guatemaltecas, para tratar sus desechos líquidos acuosos (aguas residuales), se basan en tratamientos fisicoquímicos y biológicos. Actualmente, debido al grado de contaminación del medio ambiente, no solo a nivel nacional, sino mundial, las industrias están considerando el estudio de métodos alternos eficaces, para tratar sus desechos líquidos y contribuir de esta manera a la preservación de los cuerpos receptores. Es así como el estudio de este proyecto es basado en la evaluación a nivel laboratorio de tres métodos: foto fenton, electrocoagulación y adsorción con carbón activado, para la decoloración de desechos líquidos acuosos con alto contenido de coloides orgánicos, provenientes de la manufactura de café soluble.

El método foto fenton para tratamiento de aguas residuales, es poco conocido en Guatemala, únicamente ha sido aplicado en países desarrollados, debido a sus costos y tecnologías. Estudios realizados sobre decoloración de aguas residuales por medio de foto fenton, han publicado que el método tiene un alto nivel de remoción de color, llegando hasta un 95%. El inconveniente para fines de este proyecto, es que estos estudios han sido para industrias textiles, donde los desechos líquidos a tratar no contienen materia orgánica, y el color de los mismos se debe a tintes sintéticos.

El método de electrocoagulación recientemente se ha aplicado en el país. Lo han puesto en marcha industrias textiles y en sistema de lixiviados sanitarios, teniendo resultados satisfactorios en sus aguas residuales tratadas, debido a los niveles aceptables de los parámetros en cuanto a la calidad del agua. Un estudio sobre la aplicación de la electrocoagulación para la eliminación de color en las aguas residuales de una industria textil, publicó en sus resultados, que el método alcanzó un 81% en cuanto a la remoción de color, a voltajes de 39 y 40 V.

Según estudios realizados en aguas residuales de diferente tipo por medio de filtros de carbón, indican que el método por adsorción es utilizado en su mayoría como tratamiento terciario, para paralizar la reacción de cloro en el agua tratada, o como medio para atrapar partículas disueltas o suspendidas en ella. Un estudio sobre la aplicación del método por adsorción para la decoloración del agua en una industria textilera, publicó que obtuvo un porcentaje de remoción del 76%.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Legislación ambiental de Guatemala

En la legislación guatemalteca, actualmente existe el Acuerdo Gubernativo número 236-2006, cuyo objetivo es establecer los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reuso de aguas residuales, y la disposición de lodos. Lo anterior para que, a través del mejoramiento de las características de dichas aguas, se logre establecer un proceso continuo que permita:

- Proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de la actividad humana.
- Recuperar los cuerpos receptores de agua en proceso de eutrofización.
- Promover el desarrollo del recurso hídrico con visión de gestión integrada.

Para fines del proyecto se trabajó con el artículo 20, titulado: límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, que se encuentra en el capítulo V del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Tabla I. Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores

Parámetros	Dimensionales	Valores Iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados celsius	TRC +/- 7	TRC +/- 7	TRC +/- 7	TRC +/- 7	TRC +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/ Presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1 \cdot 10^8$	$< 1 \cdot 10^6$	$< 1 \cdot 10^5$	$< 1 \cdot 10^4$	$< 1 \cdot 10^4$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados celsius

Fuente: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Acuerdo Gubernativo 236-2006. p. 9.

2.2. Fuentes de contaminación del agua

Actualmente, el agua es ampliamente utilizada por el ser humano y ha propiciado el progreso económico y social, es utilizada y devuelta a la naturaleza contaminada, con diversos desechos de la actividad humana. De no ponerse un alto a esta situación, llegará un momento en que toda el agua disponible se encontrará contaminada y el hombre se verá obligado a realizar grandes esfuerzos consumiendo tiempo y dinero para separar los contaminantes de la misma, con el fin de conjurar la amenaza de la contaminación del medio ambiente acuático.

2.3. Definición de contaminantes y contaminación

Los conceptos contaminación y contaminantes tienen significados diferentes, a continuación se define cada uno de ellos:

2.3.1. Contaminantes

Toda materia o sustancia, sus combinaciones o compuestos, los derivados químicos o biológicos, así como toda forma de energía térmica, radiaciones ionizantes, vibraciones o ruido, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, aguas, suelo, flora, fauna o cualquier elemento ambiental, alteren o modifiquen su composición, o afecten la salud humana.

2.3.2. Contaminación

Es la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o cualquier combinación de ellos que perjudiquen o resulte nocivo a la vida, la salud y el bienestar humano, a la flora y la fauna, o degraden la calidad del aire, del agua, del suelo de los bienes y recursos en general.

2.4. Clasificación de los contaminantes

Las fuentes de contaminación emiten diversos tipos de contaminantes en cantidades y composiciones muy variadas. Éstos se clasifican de la siguiente manera:

2.4.1. Contaminantes orgánicos

Toda sustancia derivada del carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, que degradan la calidad de los cuerpos de agua que las reciben.

2.4.2. Contaminantes inorgánicos

Son diversos productos disueltos o dispersos en el agua que provienen de descargas domésticas, agrícolas e industriales o de la erosión del suelo. Los principales son cloruros, sulfatos, nitratos y carbonatos. También desechos ácidos, alcalinos y gases tóxicos disueltos en el agua como los óxidos de azufre, de nitrógeno, amoníaco, cloro y sulfuro de hidrógeno (ácido sulfhídrico).

2.5. Parámetros indicadores de contaminación

Los parámetros son características o propiedades que el medio natural o antrópico puede comunicar al agua, definiendo de esta forma alteraciones o condiciones de uso. Los parámetros se pueden agrupar en: físicos, químicos y biológicos.

2.5.1. Parámetros físicos

Los constituyen aquellos que son percibidos por los sentidos, siendo los principales: temperatura, sólidos en todas sus formas, color, olor, conductividad y turbiedad.

2.5.1.1. Temperatura

Es el parámetro que mide el calor en el agua. Es importante porque influye sobre el desarrollo de la vida acuática, reproducción de flora y fauna, acelerando o retardando la velocidad de las reacciones bioquímicas. También es importante en la solubilidad del oxígeno. Un cambio brusco en la temperatura, puede originar la muerte de la vida acuática y a temperaturas elevadas, pueden proliferar plantas acuáticas y hongos.

2.5.1.2. Sólidos

Es una de las características más importantes de las aguas residuales. El contenido total de materia sólida en el agua constituye los sólidos totales (ST), que incluyen los sólidos orgánicos como inorgánicos y es la materia que se obtiene después de evaporar el agua a 103-105°C.

Estos sólidos se pueden encontrar como: sólidos filtrables, sólidos suspendidos sedimentables (SSs), sólidos suspendidos no sedimentables (SSn).

Tabla II. Clasificación de las partículas

Tipos de sólidos	Dimensión de la partícula (micras)
Sólidos disueltos	$10^{-3} - 10^{-5}$
Coloidales	$1 - 10^{-3}$
Suspensión o no filtrables	$100 - 1$

Fuente: SARAVIA CELIS, Pedro. Contaminación del agua. p. 20.

2.5.1.3. Color

El color en las aguas se debe a la presencia de partículas coloidales, o en suspensión, a esto se le llama color verdadero y se mide en unidades de platino-cobalto, una vez se filtra el agua. El color que se mide directamente de las aguas se le denomina color aparente, porque contiene materia en suspensión.

El color tiene importancia sanitaria sobre la calidad del agua y puede interferir con procesos de tratamiento de potabilización del agua.

El color se debe a la descomposición natural de la materia orgánica y residuos domésticos e industriales.

2.5.1.4. Olor

Es debido a la descomposición de la materia orgánica por vía anaerobia, también por el contenido de productos provenientes de la industria.

2.5.1.5. Turbiedad

Es el efecto óptico causado por la interferencia de los rayos luminosos que pasan a través del agua, lo que hace que la luz sea reflejada y no transmitida. Las causas de la turbiedad se pueden deber a sólidos, limo, materia orgánica e inorgánica y microorganismos.

2.5.2. Parámetros químicos

Los constituyen la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno.

2.5.2.1. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Se define como la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente en las aguas.

Con este parámetro se puede determinar el grado de contaminación de una corriente y la capacidad de depuración de las aguas, también sirve para elegir el tipo de tratamiento que debe aplicarse a las aguas residuales. La materia orgánica biodegradable se mide, comúnmente, por medio de la DBO₅.

2.5.2.2. Demanda química de oxígeno (DQO)

Representa la cantidad de oxígeno requerida para estabilizar químicamente la materia orgánica presente en una muestra de agua.

Permite medir la cantidad de materia orgánica que puede oxidarse químicamente, la concentración es superior a la DBO.

2.6. Condición coloidal

Cuando una sustancia está dispersa en el seno de otra, de forma que sus partículas tienen un tamaño aparente del orden de 1 a 100 o 200 μm (1 milimicra $\mu\text{m} = 10^{-6}$ mm), se dice que está en condición coloidal. Las partículas dispersas son tan pequeñas, que no se sedimentan bajo la acción de la gravedad.

La condición coloidal representa un cierto intervalo de tamaños de partículas, por lo que dicha condición podrá alcanzarse, o por condensación de partículas más pequeñas, o por dispersión de partículas más grandes.

2.6.1. Propiedades de los coloides

- Las partículas son tan pequeñas, que pueden atravesar los filtros usuales.
- Un sólido disperso en partículas de tamaño coloidal presenta una enorme superficie específica.

- Las partículas coloidales están cargadas eléctricamente; las de igual sistema tienen carga del mismo signo. La acción repulsiva entre estas cargas, tiende a impedir que las partículas se unan, siendo éste un factor importante en la estabilidad de las dispersiones coloidales.
- Las partículas coloidales se coagulan o flocculan por adición de electrolitos.
- Los precipitados formados por coloides flocculados pueden, en general, volver a dispersarse por lavado en ausencia del electrolito que originó su flocculación.

2.7. Procesos avanzados de oxidación

Los procedimientos avanzados de oxidación (*Advanced Oxidation Processes = AOP*) se definen como aquellos procesos de oxidación que implican la generación de radicales hidroxilo en cantidad suficiente para interactuar con los compuestos orgánicos del medio. Se trata de una familia de métodos que utilizan la elevada capacidad oxidante de los radicales HO^* y que se diferencian entre sí en la forma en la que los generan.

Los más comunes utilizan combinaciones de ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), radiación ultravioleta y fotocatalisis. Una relación completa se indica en la tabla III. Una consecuencia de la elevada reactividad del agente oxidante es que los procesos avanzados de oxidación se caracterizan también por su baja selectividad; pero lo que en un proceso de producción puede ser una desventaja es; sin embargo, una característica deseable en el caso de la eliminación de contaminantes de aguas residuales.

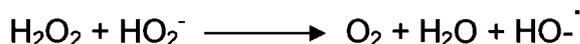
Tabla III. Procesos avanzados de oxidación

Procesos homogéneos:
a) Sin aporte externo de energía: Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^-) Ozonización con peróxido de hidrógeno (O_3/H_2O_2) y ($O_3/H_2O_2/OH^-$) Peróxido de hidrógeno y catalizador (H_2O_2/Fe^{2+})
b) Con aporte externo de energía: b1) Energía procedente de radiación ultravioleta (UV) Ozonización y radiación ultravioleta (O_3/UV) Peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta (H_2O_2/UV) Ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta ($O_3/H_2O_2/UV$) Foto-fenton ($Fe^{2+}/H_2O_2/UV$) b2) Energía procedente de ultrasonidos (US) Ozonización y ultrasonidos (O_3/US) Peróxido de hidrógeno y ultrasonidos (H_2O_2/US) b3) Electroquímica Oxidación electroquímica Oxidación anódica Electro-fenton
Procesos heterogéneos:
Ozonización catalítica ($O_3/Cat.$) Ozonización fotocatalítica ($O_3/TiO_2/UV$) Fotocatálisis heterogénea ($H_2O_2/TiO_2/UV$)

Fuente: FERNÁNDEZ ALBA, Antonio Rodríguez. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. p. 49.

2.7.1. Peróxido de hidrógeno y catalizador (H₂O₂/Fe²⁺)

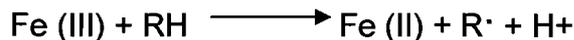
La interacción entre el peróxido de hidrógeno y las sales de hierro se conoce desde el descubrimiento del reactivo de fenton, por H.J.H. Fenton, en 1894. Se trata de un sistema catalítico homogéneo en el cual una sal de hierro, habitualmente FeSO₄, genera radicales gracias a la interacción del peróxido de hidrógeno con la forma reducida, Fe(II). El mecanismo es el siguiente:



La interacción con la forma reducida del hierro, genera en última instancia radicales hidroxilo, aunque éstos pueden intervenir también en la oxidación directa del hierro:



La regeneración de la forma reducida se produce normalmente mediante la intervención de un compuesto orgánico del medio:



La velocidad de generación de radicales está determinada por la reacción del Fe(II) con el peróxido de hidrógeno, por lo que la concentración de hierro limita la velocidad de oxidación. Típicamente, las relaciones Fe:H₂O₂ están en el rango 1-10%, ya que para cargas de catalizador menores, la velocidad de reacción es demasiado baja. Otra incidencia relacionada con el sistema fenton, es la posibilidad de que los productos de reacción (ácidos orgánicos), secuestren el hierro sacándolo del ciclo catalítico. El rango de aplicabilidad de la técnica está limitado también por el pH del medio. El pH óptimo se sitúa en el intervalo 3-6 y la pérdida de eficacia en medio básico se relaciona con la transición del hierro de la forma ferrosa hidratada a especies férricas coloidales, bajo las cuales el hierro descompone el peróxido de hidrógeno en oxígeno y agua, pero sin promover la formación de radicales.

El reactivo de fenton es eficaz, esencialmente como pretratamiento cuando la carga orgánica del agua es superior a 500 mg/L de demanda química de oxígeno. (En corrientes más diluidas, la selectividad disminuye).

2.7.2. Foto-fenton (Fe²⁺/H₂O₂/UV)

El proceso foto-fenton es un tratamiento homogéneo fotocatalítico basado en la producción de radicales hidroxilo mediante el reactivo de fenton (H₂O₂ + Fe²⁺). La velocidad de degradación de contaminantes orgánicos con sistemas fenton resulta notablemente acelerada por la irradiación con luz ultravioleta-visible (longitudes de onda mayores de 300 nm).

En estas condiciones, la fotólisis de complejos Fe(III), permite la regeneración de la forma reducida del catalizador favoreciendo el ciclo catalítico.

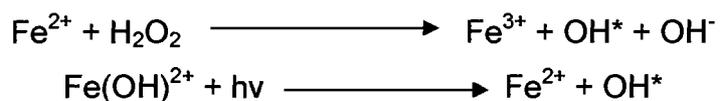
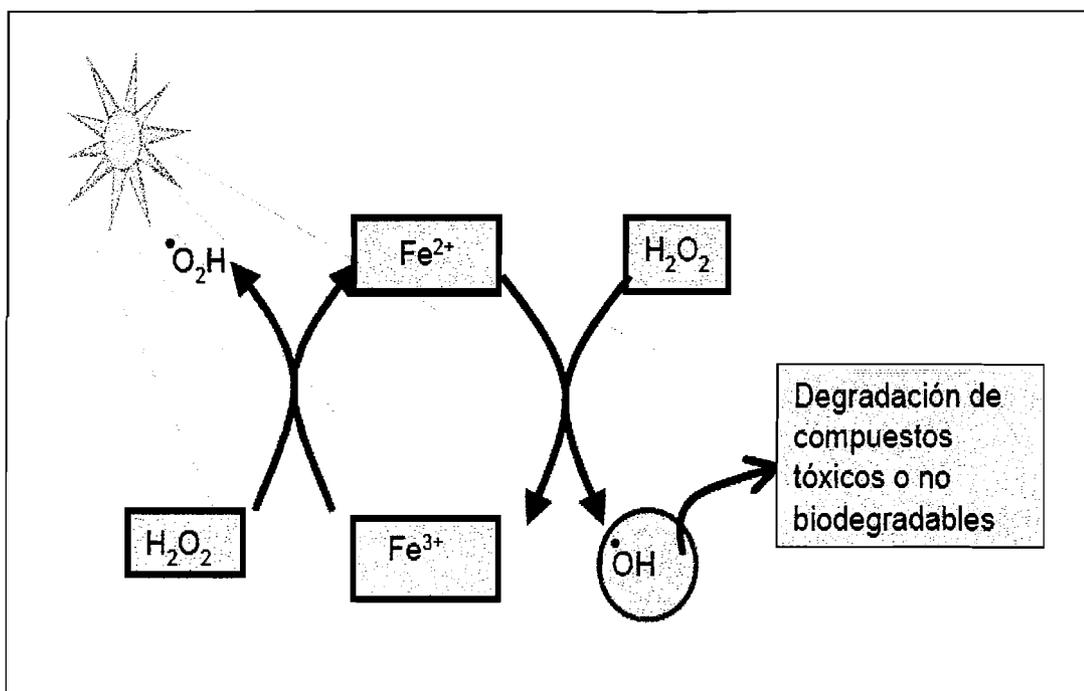


Figura 1. Representación esquemática simplificada del sistema foto fenton y la generación de radicales hidroxilo



Fuente: CHACÓN CASTILLO, Juan Matías. Mineralización de colorantes por foto-fenton y energía solar. p. 2.

Tabla IV. Principales aspectos positivos y negativos en la utilización de foto fenton para el tratamiento de efluentes

Aspectos positivos	Aspectos negativos
No transfieren de fase los contaminantes (como ocurre en las técnicas de membranas, carbón activado, entre otras), pero si transforman químicamente los compuestos.	Pueden formar subproductos de reacciones indeseables en algunos casos.
Poseen potencial para transformar productos refractarios en compuestos biodegradables.	Necesitan, en algunos procesos, de tiempos de reacción grandes.
Usualmente no hay generación de lodo.	Los costos de inversión y operación pueden ser elevados.
Pueden proporcionar mineralización completa de algunos contaminantes.	Es necesario mano de obra especializada.
En algunos casos, consumen menos energía que otros métodos (por ejemplo, en comparación con la incineración).	

Fuente: FERNÁNDEZ ALBA, Antonio Rodríguez. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. p. 55.

2.8. Procesos electroquímicos

Está basado en la utilización de técnicas electroquímicas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua (que necesariamente ha de contener un electrolito) y provocando reacciones de oxidación-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo. Por tanto, se utiliza energía eléctrica como vector de descontaminación ambiental, siendo su coste uno de las principales desventajas de este proceso. Sin embargo, como ventajas cabe destacar la versatilidad de los equipos, la ausencia tanto de la utilización de reactivos como de la presencia de fangos y la selectividad, pues controlar el potencial de electrodo permite seleccionar la reacción electroquímica dominante deseada.

Las consecuencias de las reacciones que se producen pueden ser indirectas, como en el caso de la electrocoagulación, electroflotación o electrofloculación, donde los productos formados por electrólisis sustituyen a los reactivos químicos, y supone una alternativa con futuro a la clásica adición de reactivos. Sin embargo, la aplicación que está tomando auge importante es en el tratamiento de aguas residuales industriales, a través de una oxidación o reducción directa.

2.8.1. Oxidación en ánodo

En el ánodo se puede producir la oxidación de los compuestos a eliminar, tanto orgánicos como inorgánicos. Esta oxidación se puede producir directamente por una transferencia de electrones en la superficie del ánodo, o bien por la generación de un agente oxidante *in-situ*. En este último caso se evita manipular agentes oxidantes.

Entre las aplicaciones de la oxidación directa cabe destacar el tratamiento de cianuros, colorantes, compuestos orgánicos tóxicos (en algunas ocasiones haciéndolos más biodegradables), incluso la oxidación de Cr(III) a Cr(VI), más tóxico pero, de esta forma puede ser reutilizado.

2.8.2. Reducción en cátodo

La principal aplicación de esta posibilidad es la reducción de metales tóxicos. Se ha utilizado en situaciones, no poco frecuentes, de reducción de metales catiónicos desde varios miles de ppm de concentración hasta valores, incluso por debajo de la ppm. Hay una primera etapa de deposición del metal sobre la superficie del cátodo que ha de continuarse con la remoción del mismo. Esto se puede hacer por raspado, disolución en otra fase, etc.

2.8.3. Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso complicado que envuelve varios mecanismos químicos y fenómenos físicos, que emplea electrodos consumibles para suplir iones en el agua residual. Un proceso de electrocoagulación involucra 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 floculantes

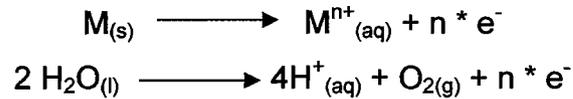
El mecanismo de desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y del rompimiento de emulsión se describe a continuación:

- 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 residual, 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 floculantes que se forman como resultado de la coagulación, crean una capa de lodos que atrapa y conduce las partículas coloidales que permanecen en el medio acuoso.

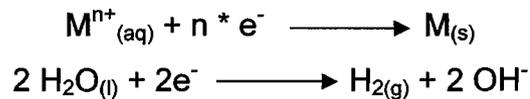
2.8.3.1. Celda de electrocoagulación

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 realiza 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

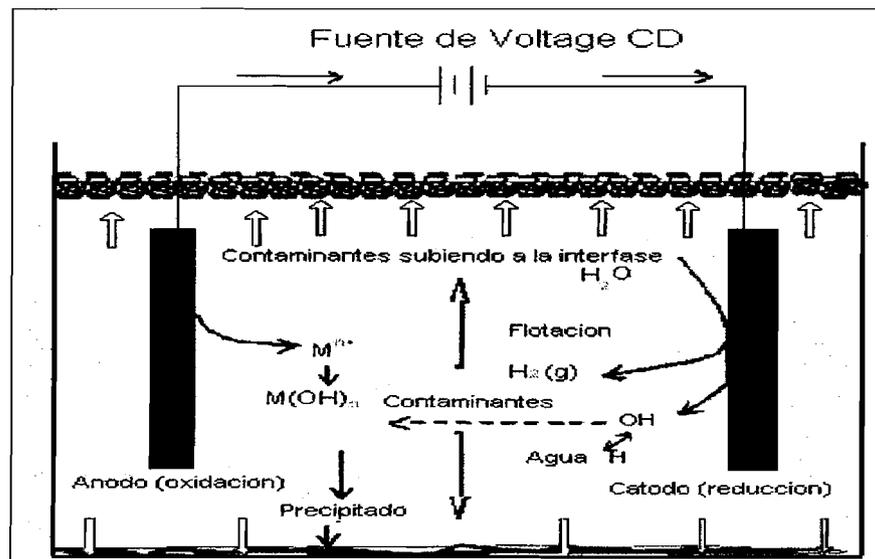


En el ánodo metálico, fabricado habitualmente de hierro o aluminio, se llevan a cabo dos reacciones de separación. Inicialmente el ánodo se disuelve y produce de manera continua hidróxidos poliméricos metálicos, que son excelentes agentes coagulantes. La coagulación ocurre cuando los cationes combinados con las partículas negativas son llevados cerca del ánodo por movimiento electroforético. También se da la electrólisis 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. Éstos 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 éstas con el agua residual. 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.

Figura 2. Diagrama esquemático de una celda de electrocoagulación de dos electrodos



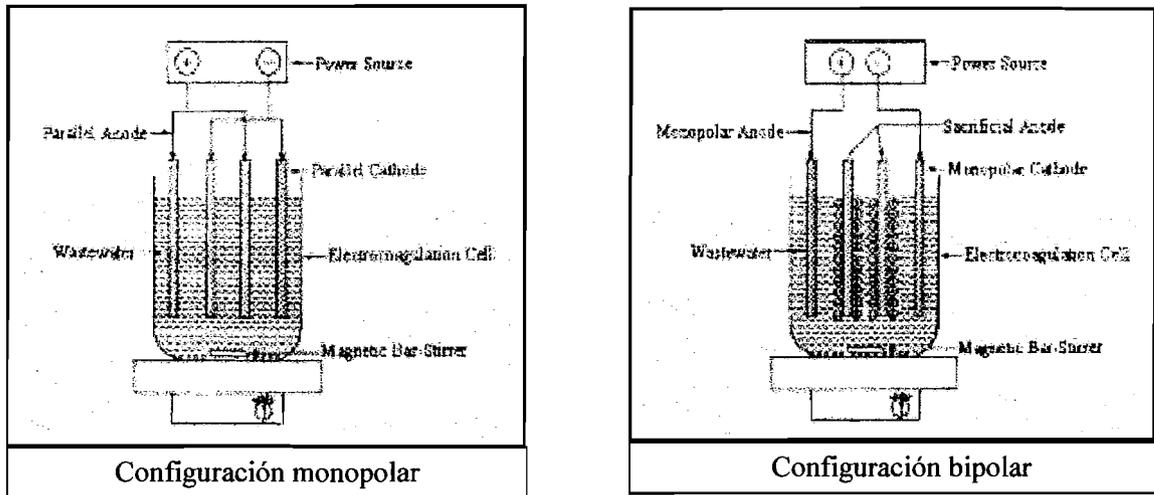
Fuente: ARISTIZÁBAL CASTRILLÓN, Adriana. Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso. p. 64.

2.8.3.2. Conceptos generales del diseño de una celda electroquímica

En la actualidad no existe una metodología definida para el diseño y construcción de un equipo de electrocoagulación. Sin embargo, se debe tener en cuenta aspectos de naturaleza física y química que garanticen un buen desempeño y construcción del equipo.

- Geometría del reactor: la geometría del reactor influye en algunos parámetros de operación tales como: la formación de los flóculos, el movimiento de las burbujas a través del reactor y el régimen de flujo.
- Tipo de conexiones eléctricas: las cuales se pueden dividir, básicamente, en dos configuraciones: monopolar, en la cual los electrodos están conectados en paralelo y sometidos al mismo potencial, lo cual genera mayor gasto de energía; diseño bipolar, el cual se refiere al arreglo de pares de electrodos donde solamente los electrodos de los extremos están directamente conectados a la fuente, de tal forma que los electrodos restantes toman la polaridad opuesta al electrodo que tienen en frente.

Figura 3. Configuración de equipos electroquímicos en paralelo



Fuente: ARISTIZÁBAL CASTRILLÓN, Adriana. Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso. p. 67.

- Escalado del reactor: uno de los grandes retos es establecer los parámetros claves que permitan definir la relación entre el sistema a escala laboratorio y a escala industrial. Dentro de los parámetros más utilizados se encuentran la relación área-volumen, y la similitud geométrica.
- Densidad de corriente: la densidad de corriente determina la dosificación del metal a la solución y la densidad de producción de las burbujas. La determinación de la densidad a aplicar, depende tanto del contaminante que se desea remover, como de la escala a la cual se realiza el tratamiento.

- Voltaje aplicado: debe ser disminuido en la mayor proporción posible para reducir el costo energético, ya sea aumentando la conductividad de la solución, disminuyendo la distancia entre los electrodos o cambiando el material o geometría de los mismos, según sea el caso.
- El material de los electrodos: la eficiencia de los electrodos depende de la concentración, tipo de contaminante y la velocidad de agitación. Por ello se debe hacer un estudio preliminar para su correcta selección, con el objetivo de asegurar una distribución homogénea de la corriente y evitar zonas donde exista acumulación de calor y conversiones no uniformes, es necesario garantizar una buena distribución del potencial y la corriente en toda la celda.
- La caída de potencial: entre los electrodos debe ser minimizada al igual que la acumulación de burbujas de oxígeno e hidrógeno en la superficie de los mismos, ya que producen un incremento en la resistencia eléctrica de la celda lo que conlleva a un mayor consumo energético.
- El transporte de masa: puede ser mejorado por medio de un incremento en el nivel de turbulencia del flujo a través del reactor, lo cual se logra, ya sea aumentando la velocidad de flujo, en el caso de un sistema en continuo, o la velocidad de agitación para un sistema por lotes. Una mejora en el transporte de masa puede evitar la pasivación de los electrodos.

2.8.4. Ventajas y desventajas de la electrocoagulación

El proceso de electrocoagulación para tratar aguas residuales tiene ventajas y desventajas en su operación, a continuación se presentan algunas de ellas.

2.8.4.1. Ventajas

- El equipo necesario es sencillo y de fácil operación; los electrodos empleados necesitan poco mantenimiento (ya que por lo general no hay partes móviles).
- Para la instalación de una celda de electrocoagulación no se requiere de obras civiles complejas.
- Los sistemas de electrocoagulación comparados con sistemas de tratamientos convencionales, requiere menores tiempos de residencia.
- La remoción de la materia, tanto orgánica como inorgánicamente, es más efectiva que por los métodos tradicionales; adicionalmente, es altamente eficiente para destrucción de microorganismos patógenos.
- Se pueden tratar coloides más pequeños, debido a que la aplicación del campo eléctrico les imprime un movimiento mucho más rápido, lo que favorece la coagulación.

- La reducción en la cantidad de químicos necesarios (en el orden de 1/10), ya que el único reactivo es la electricidad, lo que disminuye los costos de operación y evita el riesgo de una segunda contaminación causada por reactivos químicos utilizados.
- Los costos de operación son entre 50-60% más bajos que los sistemas biológicos y de coagulación química convencionales.
- Reducción en la cantidad de lodos producidos, el cual está compuesto principalmente de hidróxidos y óxidos metálicos, éstos son fácilmente secados y separados rápidamente por medio de filtración.

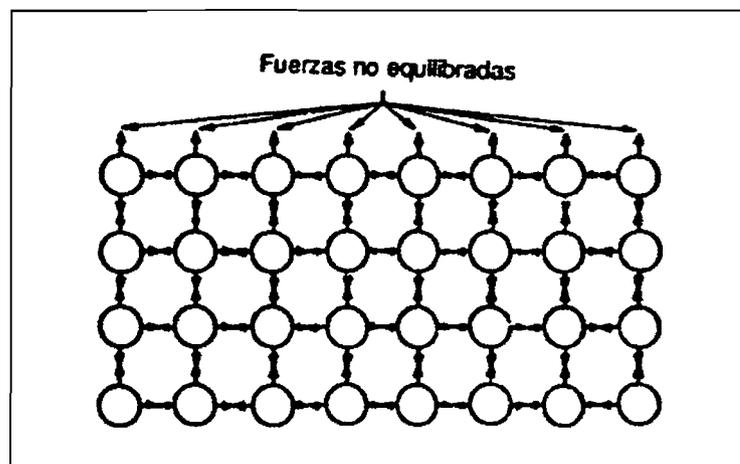
2.8.4.1. Desventajas

- El costo de inversión inicial es alto.
- Puede existir formación de una capa aislante de óxido, lo que disminuye la eficiencia de la celda de electrocoagulación y lleva a una pasivación de los electrodos.
- Es necesario el reemplazo periódico de los electrodos.
- Se aumenta la concentración de iones de hierro y aluminio en el efluente, aunque en menor proporción que la encontrada para la coagulación química.
- Los hidróxidos producidos se pueden aglomerar en los electrodos y entorpecer su posterior producción, aspecto que puede ser solucionado utilizando un electrodo rotatorio.

2.9. Adsorción

Es la concentración de un soluto en la superficie de un sólido. Este fenómeno tiene lugar cuando se coloca dicha superficie en contacto con una solución. Una capa de moléculas de soluto se acumula en la superficie del sólido, debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales. Ver figura 4.

Figura 4. Representación de fuerzas en un sólido



Fuente: RAMALHO, Rubens. Tratamiento de aguas residuales. p. 586.

En el interior del sólido, las moléculas están rodeadas totalmente por moléculas similares y por lo tanto sujetas a fuerzas equilibradas, tal como indican las flechas de la figura 4. Las moléculas en la superficie están sometidas a fuerzas no equilibradas, debido a que estas fuerzas residuales son suficientemente elevadas, pueden atrapar moléculas de un soluto que se halle en contacto con el sólido. Este fenómeno se denomina adsorción física (o de *Van der Waals*).

El sólido (carbón activo), se denomina adsorbente y el soluto a adsorber se denomina adsorbato. La capacidad de adsorción es función de la superficie total del adsorbente, ya que cuanto mayor sea esta superficie, se dispone de mayor número de fuerzas residuales no equilibradas para la adsorción.

2.9.1. Formas clásicas de utilización del carbón activo

- **Carbón activado granular (GAC):** suele utilizarse una columna como medio de contacto entre el agua a tratar y el carbón activado, en la que el agua entra por la parte inferior y asciende hacia la superior. El tamaño de partícula en este caso es mayor que en el otro; se ha de utilizar para eliminar elementos traza, especialmente orgánicos, que pueden estar presentes en el agua, y que habitualmente han resistido un tratamiento biológico. Son elementos, que a pesar de su pequeña concentración, en muchas ocasiones proporcionan mal olor, color o sabor al agua.
- **Carbón activo en polvo (CAP):** este tipo de carbón suele utilizarse en procesos biológicos, cuando el agua contiene elementos orgánicos que pueden resultar tóxicos. También puede añadirse al agua a tratar, y pasado un tiempo de contacto, normalmente con agitación, se deja sedimentar las partículas para su separación previa; son operaciones llevadas a cabo en discontinuo.

Las aplicaciones de la operación de adsorción es diversa, desde un amplio abanico de sustancias orgánicas (colorantes, fenol, etc.), hasta metales pesados en todos sus estados de oxidación.

2.9.2. Parámetros que afectan el proceso de adsorción

Entre los factores que pueden llegar a afectar la adsorción se encuentran:

- Tamaño de los poros
- Tamaño molecular de la impureza
- Tamaño de la partícula de adsorbente
- Temperatura de la solución
- pH de la solución

El pH afecta debido a que la capacidad de adsorción es proporcional a la concentración del adsorbato, y aumenta en condiciones de pH bajo, con el cual se disminuye la solubilidad del adsorbato y se afecta el equilibrio. Cuando el tamaño de la partícula de adsorbente disminuye, la eficiencia de la adsorción aumenta, debido a que la distribución correcta de los tamaños de los poros del material adsorbente es necesaria para facilitar el proceso de adsorción proveyendo sitios de adsorción, como finos poros y canales apropiados para el transporte del adsorbato.

Las partículas más pequeñas de adsorbente proveen una tasa de adsorción más rápida, ya que se acorta la distancia entre los lugares de adsorción. El área total del material adsorbente se determina por el grado de activación y la estructura del poro y no por el tamaño de la partícula de adsorbente; también se aumenta la eficiencia cuando la temperatura disminuye. Se logra aumentar la eficiencia cuando se logra disminuir la solubilidad del contaminante, y cuando el tiempo de contacto aumenta debido a que se tiene mayor probabilidad de que choque con un espacio vacío de adsorbato, alcanzando así el equilibrio. La adsorción es afectada por el tipo de superficie sobre el que se está llevando a cabo; se obtiene una mayor adsorción en las fisisorciones, debido a que éstas son menos selectivas por las fuerzas de atracción que presentan; se considera un proceso rápido, ya que la adsorción que se lleva a cabo al principio es alta, pero disminuye cuando el tiempo aumenta, porque la superficie que queda descubierta es menor.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables involucradas en el tratamiento de desechos líquidos acuosos con alto contenido de coloides orgánicos fueron:

Tabla V. Variables para los métodos de estudio

Método	Variables	Factores perturbadores		Factor de diseño	
		Controlables	No controlables	Dependientes	Independientes
Foto fenton	pH	X		X	
	Concentración sal férrica	X			X
	Tiempo de retención	X			X
Electrocoagulación	pH		X		
	Voltaje	X		X	
	Separación entre placas	X		X	
Adsorción con carbón activado	Volumen		X		X
	Tiempo de paso	X		X	
	Cantidad de adsorbente		X		X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

El estudio se delimitó en tratar únicamente el parámetro color del desecho líquido acuoso, medido en unidades platino-cobalto. Se trabajó con los métodos: foto fenton, electrocoagulación y adsorción con carbón activado.

3.2.1. Universo de estudio

El estudio se enfocó en los desechos líquidos acuosos proveniente de la planta de producción de café soluble, en el departamento de Guatemala.

3.2.2. Población o muestra

Cuando no es conveniente considerar todos los elementos de la población, lo que se hace es estudiar una parte de esa población, llamada muestra. La muestra siempre debe tener las mismas características del universo, ya que es representativa de este.

3.2.2.1. Número de corridas

Para tener la certeza de los resultados obtenidos para cada método aplicado, se estableció un nivel de confianza del 80%, con este nivel de confianza se realizó el cálculo en el cual se estableció el número de veces que se repitió la prueba, esto con el fin de dar una garantía a los resultados obtenidos.

$$n = \frac{z^2 * p * q}{E^2}$$

$p = 0,8$ (probabilidad)

$q = 1 - 0,8 = 0,2$ (fracaso)

Para un nivel de confianza de 80%, $z = 0,6745$, según tablas estadísticas.

$$n = \frac{0,6745^2 * 0,8 * 0,2}{0,1^2}$$

$$n = 7,27 \approx 7 \text{ corridas}$$

De acuerdo al cálculo anterior, se realizaron 7 corridas para cada una de las muestras, teniendo una confiabilidad del 80%.

3.2.2.2. Tamaño de muestras

Es el número de sujetos que componen la muestra extraída de una población, necesarios para que los datos obtenidos sean representativos.

Tabla VI. **Tamaño de la muestra para cada corrida de los métodos**

Método	Tamaño de muestra (Litros)	Volumen por muestra (Litros)
Foto fenton	1	49
Electrocoagulación	18	
Adsorción	30	

Fuente: elaboración propia.

Las muestras tomadas se refrigeraron a una temperatura promedio de 7 °C, para evitar la descomposición de los compuestos orgánicos presentes en el agua, esto cuando no se trabajó con el desecho líquido en el momento.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador
 - Maricely Elizabeth Suchini Moscoso
- Colaboración de los siguientes profesionales
 - Ing. Industrial Sergio Antonio Torres
 - Co-Asesor: Ing. Químico Julio Barrascouth
 - Asesor de trabajo de graduación: Ing. Químico Jorge Mario Estrada Asturias

3.4. Recursos materiales disponibles

Materiales necesarios para que el tratamiento de desechos líquidos acuosos con alto contenido de coloides orgánicos se llevara a cabo, por medio de los métodos de foto fenton, electrocoagulación y adsorción con carbón activado.

3.4.1. Cristalería de laboratorio

- Tubos de ensayos
- Gradillas
- Agitadores
- Recipiente de vidrio
- *Beackers*

3.4.2. Reactivos

- Peróxido de hidrógeno
- Sal de hierro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- Placas de aluminio
- Carbón activado granular

3.4.3. Equipo extra

- Voltímetro
- Amperímetro

- Fuente de poder
- Colorímetro marca Hach DR/890

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

El proyecto de investigación fue de tipo cuantitativo, en donde se tomó el desecho líquido acuoso y se trató por tres métodos: foto fenton, electrocoagulación y adsorción con carbón activado, realizando 7 corridas para cada uno de los métodos.

El alcance fue realizar la evaluación a nivel laboratorio de los tres métodos por medio de la eficiencia de remoción de color, expresada como porcentaje; esto con el fin de hacer una comparación, y establecer el método con mayor eficiencia para la decoloración del desecho líquido acuoso con alto contenido de coloides orgánicos; además se conoció el cumplimiento de este método con las diferentes etapas establecidas en el artículo 20 del Acuerdo Gubernativo 236-2006, Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos; emanado por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, en cuanto al parámetro de color.

$$\% \text{ Remoción de color} = \frac{\text{color inicial} - \text{color final}}{\text{color inicial}} * 100\%$$

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para la recolección de datos se solicitó en los archivos de la industria manufacturera de café soluble, datos históricos relacionados en la caracterización del desecho líquido acuoso de entrada a la planta de tratamiento de aguas residuales; éstos basados en los análisis efectuados por los laboratorios fisicoquímicos pertinentes.

La caracterización ayudó a conocer las variables de entrada con las que se contó, para poner en práctica cada uno de los métodos utilizados, (foto fenton, electrocoagulación y adsorción con carbón activado).

Para conocer el fundamento, así como el funcionamiento de cada método, se buscó referencias bibliográficas, electrónicas, entre otras.

Para los tres métodos se tomó una misma muestra del desecho líquido acuoso, con el fin de comparar los porcentajes de remoción de color.

A cada método se le controlaron las variables pertinentes, para que se llevaran a cabo las reacciones esperadas; se realizaron siete corridas en cada uno de los métodos, para tener confiabilidad del trabajo realizado.

La información recabada, luego de trabajar con cada método, se ordenó en tablas de toma de datos, para luego realizar los cálculos pertinentes.

Tabla VII. Diseño experimental, toma de datos

No. Corrida	Rango de pH	Tiempo de retención (min)	Color (unidades Pt-Co)		pH final
			Inicial	Final	
1	5-6				
2					
3					
4					
5					
6					
7					

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Con la puesta en marcha de los métodos de foto fenton, electrocoagulación y adsorción con carbón activado, se obtuvieron datos teóricos tanto del pH como del color inicial y final para cada prueba; los cuales ayudaron para dar resultados y conclusiones de la efectividad de cada método en cuanto al porcentaje de decoloración del desecho líquido acuoso proveniente de la industria manufacturera de café soluble.

3.8. Análisis estadístico

Se utilizó la media aritmética y la desviación estándar para observar el comportamiento de los datos calculados en este tipo de análisis.

3.8.1. Media aritmética

Es la cantidad total de la variable distribuida a partes iguales entre cada observación.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{a_1 + \dots + a_n}{n} \quad (\text{Ecuación No. 1})$$

3.8.2. Desviación estándar

Es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Dicho de otra manera, la desviación estándar es simplemente el promedio o variación esperada con respecto a la media aritmética.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (\text{Ecuación No. 2})$$

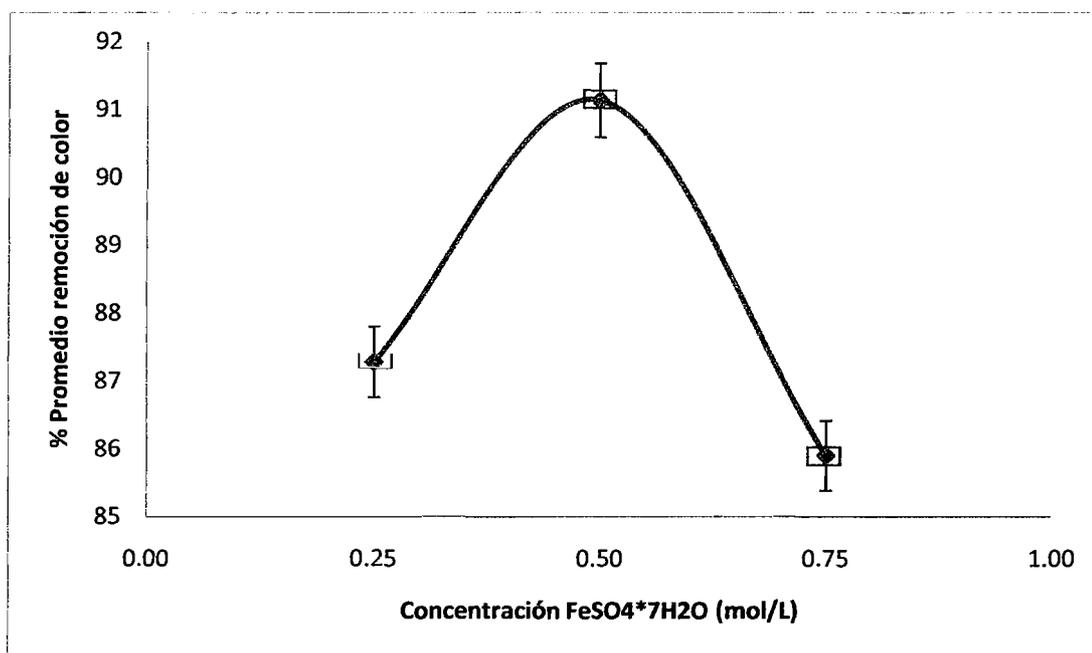
Se emplearon estas ecuaciones para observar el comportamiento de los resultados obtenidos de las siete corridas que se realizaron, para el tratamiento de residuos líquidos fisicoquímicos.

4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados con base en los datos obtenidos de cada método estudiado.

- Evaluación de la eficiencia promedio de remoción de color a nivel laboratorio, expresada como porcentaje, del método foto fenton, en función de las concentraciones de sulfato de hierro utilizadas en el experimento.

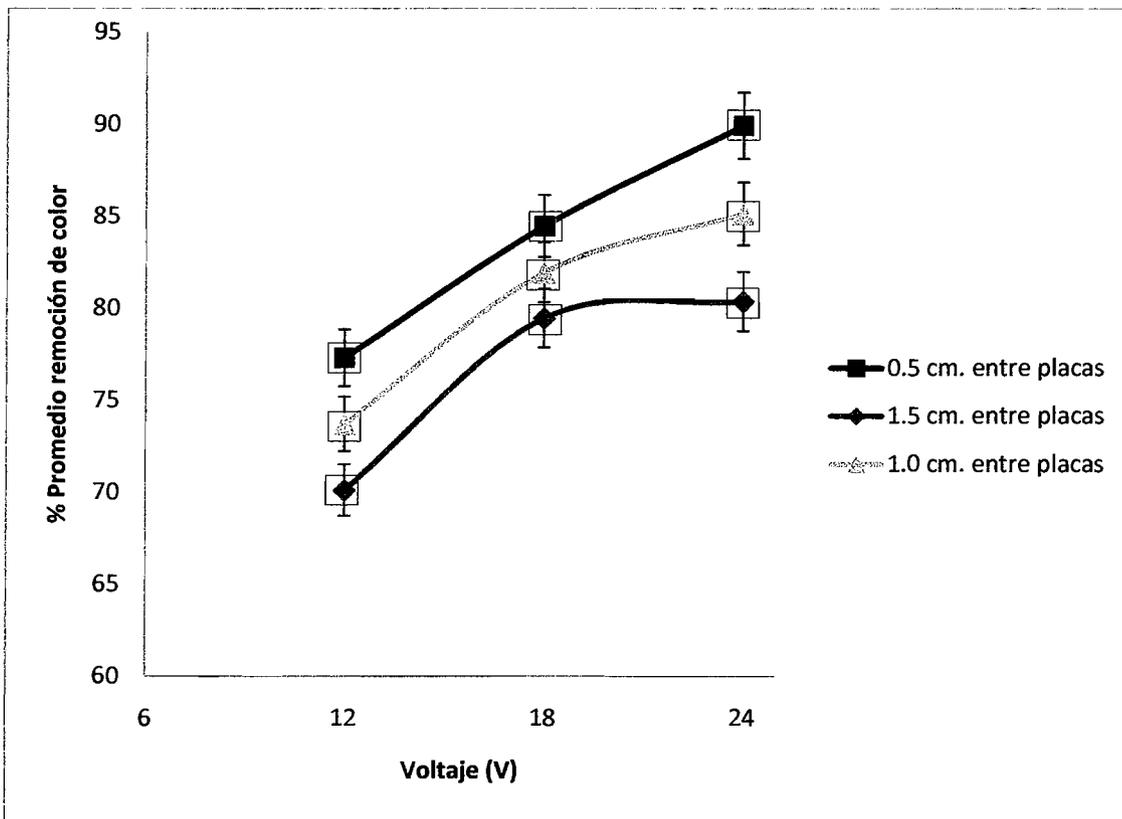
Figura 5. **Porcentaje promedio de remoción de color para el método foto fenton**



Fuente: elaboración propia.

- Evaluación de la eficiencia promedio de remoción de color a nivel de laboratorio, expresada como porcentaje, del método por electrocoagulación, en función del voltaje aplicado para cada separación entre placas del electrodo de aluminio.

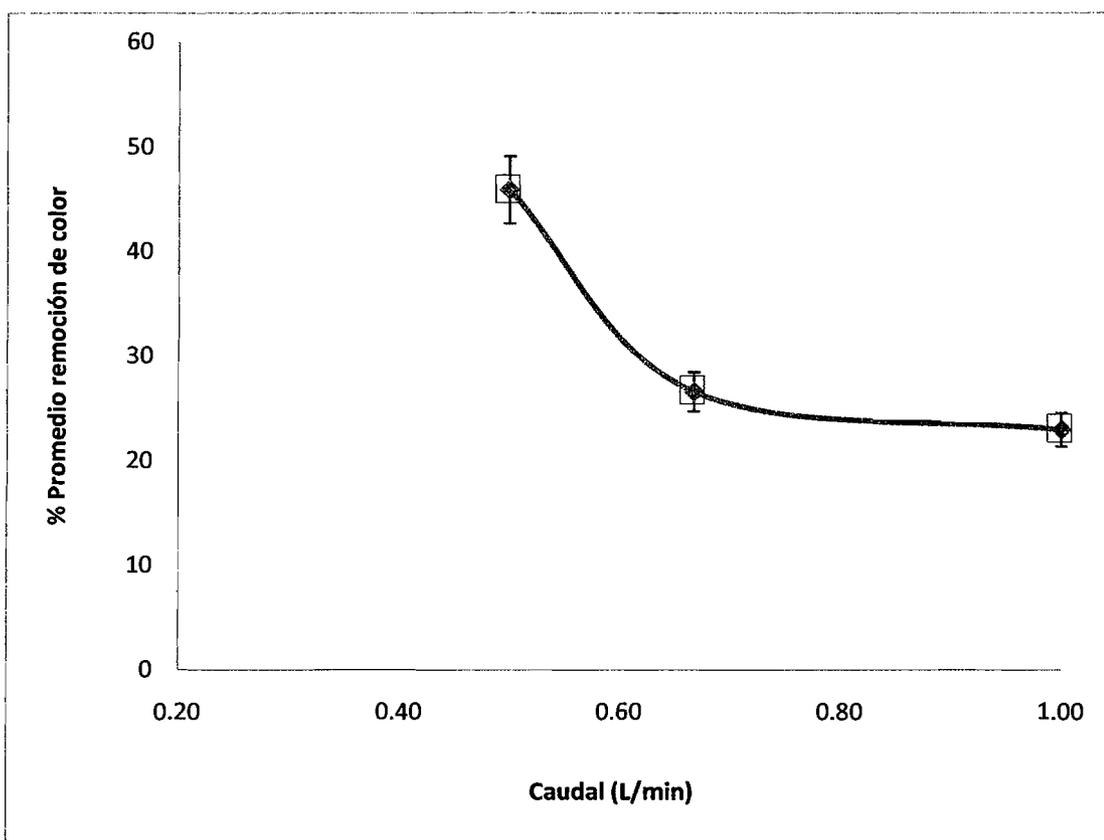
Figura 6. **Porcentaje promedio de remoción de color para el método por electrocoagulación**



Fuente: elaboración propia.

- Evaluación de la eficiencia promedio de remoción de color a nivel de laboratorio, expresada como porcentaje, del método de adsorción, en función del caudal utilizado en el filtro de carbón.

Figura 7. **Porcentaje promedio de remoción de color para el método de adsorción con carbón activado**



Fuente: elaboración propia.

- Comparación de resultados con los límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, del Acuerdo Gubernativo 236-2006, Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos, para cada método aplicado.

Tabla VIII. Cumplimiento con las diferentes etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006, para cada concentración de sulfato de hierro utilizadas en el método foto fenton

		Etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006			
		1	2	3	4
[FeSO₄*7H₂O] (mol/L)	Color final promedio (Pt-Co)	1300 (Pt-Co)	1000 (Pt-Co)	750 (Pt-Co)	500 (Pt-Co)
0,75	1086 ± 11,38	SI	NO	NO	NO
0,50	683 ± 20,63	SI	SI	SI	NO
0,25	980 ± 14,97	SI	SI	NO	NO

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. Cumplimiento con las diferentes etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006, para cada separación entre electrodos utilizadas en el método por electrocoagulación

Distancia entre placas (cm)	Voltaje (V)	Color final promedio (Pt-Co)	Etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006			
			1	2	3	4
			1300 (Pt-Co)	1000 (Pt-Co)	750 (Pt-Co)	500 (Pt-Co)
0,5	12	1748 ± 5,35	NO	NO	NO	NO
	18	1196 ± 4,79	NO	NO	NO	NO
	24	777 ± 8,34	SI	SI	NO	NO
1,0	12	2023 ± 5,89	NO	NO	NO	NO
	18	1387 ± 5,08	NO	NO	NO	NO
	24	1194 ± 6,38	SI	NO	NO	NO
1,5	12	2302 ± 6,44	NO	NO	NO	NO
	18	1583 ± 5,38	NO	NO	NO	NO
	24	1512 ± 4,42	NO	NO	NO	NO

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Cumplimiento con las diferentes etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006, para cada caudal utilizado en el método por adsorción

Tiempo de paso (min)	Color final promedio (Pt-Co)	Etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006			
		1	2	3	4
		1300 (Pt-Co)	1000 (Pt-Co)	750 (Pt-Co)	500 (Pt-Co)
10	5932 ± 9,67	NO	NO	NO	NO
15	5655 ± 8,47	NO	NO	NO	NO
20	4169 ± 15,08	NO	NO	NO	NO

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Método foto fenton

Los procesos fotoquímicos están basados en la acción de la radiación solar sobre un foto-catalizador. El sistema foto-catalizador utilizado para el tratamiento del desecho líquido acuoso con alto contenido de coloides orgánicos provenientes de la manufactura de café soluble, fue la mezcla de sulfato de hierro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 3%, la relación Fe: H_2O_2 fue de 1-10% respectivamente. Para fines de este proyecto se trabajó con soluciones de sulfato de hierro a 0,75, 0,5 y 0,25 M.

Con análisis previos a la fase experimental, se llegó a la conclusión que la cantidad adecuada de agregación para la mezcla Fe: H_2O_2 fue de 1 mL de solución de sulfato de hierro y 10 mL de peróxido de hidrógeno, para una muestra de 100 mL de desecho líquido acuoso. Con esta proporción se observó una formación inmediata de flóculo, y una moderada generación de gas debido a la descomposición del H_2O_2 en presencia de la radiación solar; también se analizaron diferentes tiempos de retención para la exposición del reactivo fenton aplicado al desecho líquido acuoso y la radiación ultravioleta, obteniendo el mejor resultado en cuanto a la decoloración para un tiempo de 60 minutos. Otro aspecto importante que se analizó con anticipación para la aplicación del método foto fenton, fue la relación de pH, ya que trabaja a pH ácido.

Se realizaron pruebas para un intervalo de 2-7 en el desecho líquido acuoso de entrada, alcanzando un pH óptimo para la reacción en un rango de 5-6; dicho rango no fue necesario ajustarlo, debido a que el desecho líquido acuoso se encontraba dentro de ese rango.

Al establecer las variables de concentración de la sal férrica y peróxido de hidrógeno, el tiempo de retención y el pH, se procedió a realizar el estudio de decoloración del desecho líquido acuoso con alto contenido de coloides orgánicos, realizando 7 corridas para tener una confiabilidad del 80% en los resultados.

Según el resultado de la figura 5, se observó que el mayor porcentaje de remoción de color se obtuvo para una concentración de 0,5 mol/L de sulfato de hierro, con un 91,13% de remoción. Al comparar los resultados de color en unidades platino-cobalto para dicha concentración de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ con las diferentes etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006 en su artículo 20, se observó que se cumple con 3 de las 4 etapas emanadas por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, siendo éstas 1300, 1000 y 750 unidades Pt-Co, el resultado promedio de color fue de 683 Pt-Co, con una desviación estándar de 20,63, esto según tabla VIII.

Las desventajas o inconvenientes que se observaron a nivel laboratorio en la aplicación del método foto fenton, como alternativa para tratar desechos líquidos con alto contenido de coloides orgánicos provenientes de la manufactura de café soluble fueron:

- Las soluciones preparadas de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ se oxidaron rápidamente.
- Olor fuerte a hierro en el desecho líquido acuoso tratado.
- El lodo precipitado al transcurrir el tiempo se transformó en polvo.
- El lodo precipitado se mezcló con el desecho líquido acuoso tratado, cuando se provocó una agitación externa, dificultado su separación.
- Tiempo de reacción grande.

5.2. Método por electrocoagulación

La electrocoagulación consistió en la desestabilización de especies químicas suspendidas o disueltas presentes en el desecho líquido acuoso, como producto de la aplicación de un diferencial de potencial eléctrico. Para fines del estudio se trabajó con voltajes de 24, 18 y 12 V, aplicados mediante un electrodo de aluminio compuesto por 3 placas que correspondían a dos cátodos y un ánodo. Para cada voltaje aplicado se varió en 0,5, 1,0 y 1,5 cm. la separación entre las placas del electrodo.

Para iniciar con el estudio de este método, se construyó una celda de electrocoagulación conectada a una fuente de poder variable, dicha celda fue diseñada para tratar 2 litros del desecho líquido acuoso proveniente de la manufactura de café soluble.

Se realizaron ensayos previos para establecer variables de control, empezando con la relación de pH para el desecho líquido acuoso de entrada, se trabajó con una variación 5 a 9, observando un mayor porcentaje de remoción de color para un pH de 5, este pH no fue necesario ajustarlo, debido a que el desecho líquido acuoso se encontraba dentro del rango 5-6.

Otro estudio previo, se realizó para conocer el tiempo de aplicación de corriente a la celda de electrocoagulación, tomando muestras del desecho líquido acuoso tratado cada 10 minutos para analizar la remoción de color, esto se realizó por 60 minutos, alcanzando una mayor decoloración para 30 minutos de aplicación de corriente.

Establecido un pH inicial de 5 y un tiempo de aplicación de corriente de 30 minutos, se procedió a realizar las pruebas para el estudio de la decoloración de desechos líquidos acuosos con alto contenido de coloides orgánicos, que consistió en la unión de la fuente de poder variable con el electrodo de aluminio por medio de un circuito eléctrico, se agregó el desecho líquido acuoso en la celda de electrocoagulación y se varió tanto el voltaje aplicado como la distancia entre las placas del electrodo, cada voltaje se aplicó por 30 minutos, y por último, el desecho líquido acuoso tratado se dejó precipitar por otros 30 minutos.

Según los resultados de la figura 6, el mayor porcentaje de remoción de color se obtuvo para un voltaje de 24 V y una separación entre placas de aluminio de 0,5 cm., esto debido que a menor distancia entre placas hay un mayor potencial eléctrico suministrado, alcanzando un 89,91% de remoción.

Al comparar los resultados de color en unidades platino-cobalto con las diferentes etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006 en su artículo 20, se observó que para el voltaje de 24 V y separación de 0,5 cm. entre placas, se cumplió con 2 de las 4 etapas emanadas por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, siendo éstas la etapa de 1300 y 1000 unidades Pt-Co, el resultado promedio de color que se obtuvo fue de 777 Pt-Co con una desviación estándar de 8,34, esto según tabla IX. Este resultado; sin embargo, se puede corregir llegando a cumplir con las 4 etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006, con un tratamiento secundario, el cual consiste en filtración por medio de carbón activado.

Al aplicar el método por electrocoagulación se justificó que en el ánodo se llevan a cabo dos reacciones de separación, inicialmente el ánodo se oxida disolviendo y produciendo de manera continua cationes Al^{+3} que son excelentes agentes coagulantes.

Después de la oxidación, el aluminio se pasivó formando una capa superficial de óxido que impidió que éste se siguiera oxidando, fue ahí donde se dio la electrólisis del agua, 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.

La oxidación se llevó a cabo por la transferencia de electrones de la superficie del ánodo hacia el desecho líquido acuoso. La transferencia de electrones se demostró por la pérdida de peso del electrodo de aluminio (ánodo), dicha pérdida fue de 0,1 gramos para cada aplicación de voltaje.

Un inconveniente o desventaja de aplicación del método es que el lodo generado fue espuma, debido a la generación de gas H_2 y O_2 del cátodo y ánodo respectivamente, ocasionados por la reacción electroquímica del metal. Esta desventaja dificultó, de cierta manera, la separación de la espuma con el desecho líquido acuoso tratado. El volumen aproximado de transformación del líquido en espuma con partículas suspendidas fue de un 25%.

5.3. Método de adsorción

La aplicación de este método consistió en el montaje de una torre de adsorción para tratar 10 litros de desecho líquido acuoso con la ayuda de materiales domésticos, se le agregó una capa pequeña de grava y el resto de carbón activado granular, llenando $\frac{3}{4}$ del volumen de la torre, equivalente a una cantidad de 2500 g. de carbón. Se varió la abertura de la llave de salida de la torre, para ajustar tiempos de paso de 10, 15 y 20 minutos, obteniendo caudales de 1 L/min, 0,67 L/min y 0,5 L/min respectivamente. El rango de pH para el desecho líquido acuoso de entrada fue de 5-6.

El resultado de la figura 7 proyectó que el mayor porcentaje de remoción de color se obtuvo para un caudal 0,5 L/min, equivalente a 20 minutos de paso del desecho líquido acuoso por la torre de adsorción, obteniendo un 45,85% de remoción. La tendencia de esta gráfica expuso que a mayor tiempo de paso (menor caudal), mayor es el porcentaje de remoción de color; sin embargo, no se lograron resultados significativos en la decoloración del desecho líquido acuoso, debido a que la superficie del carbón activado se saturó demasiado rápido por la gran cantidad de material disuelto.

Al comparar los resultados de color en unidades platino-cobalto con las diferentes etapas del Acuerdo Gubernativo 236-2006 en su artículo 20, se observó que el método de adsorción para tratar desechos líquidos acuosos con alto contenido de coloides orgánicos, no cumplió con ninguna de las 4 etapas emanadas por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, esto según tabla X.

CONCLUSIONES

1. El método foto fenton fue el más efectivo, al alcanzar una reducción de color debajo de tres de los límites establecidos por el Acuerdo Gubernativo 236-2006, para la concentración 0,5 mol/L de sulfato de hierro.
2. El método por electrocoagulación alcanzó una reducción de color significativo, consiguiendo cumplir con dos de los límites establecidos por el Acuerdo Gubernativo 236-2006, esto para la aplicación de 24 voltios y una separación entre placas del electrodo de 0,5 cm.
3. El método por adsorción fue el menos efectivo, al no alcanzar una reducción de color significativo, dicho método no cumplió con ningún límite establecido por el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

RECOMENDACIONES

Método foto fenton

1. Realizar un estudio, para recuperar o eliminar el hierro disuelto en el desecho líquido acuoso tratado; para disminuir la concentración de hierro en el agua.
2. Colocar las diferentes soluciones de sulfato de hierro en recipientes de color ámbar, o recubrir los recipientes con papel aluminio, para impedir que la luz visible oxide la solución, evitando de esta manera, una deficiencia en la reacción.
3. Evitar la agitación del desecho líquido acuoso previamente tratado, para que el lodo generado no permanezca en suspensión con éste.
4. Estudiar técnicas para el posterior tratamiento del lodo generado, (dicho lodo es un polvo fino precipitado).

Método por electrocoagulación

5. Evitar que las placas de aluminio dentro de la celda de electrocoagulación se toquen entre ellas, ya que esto impide el paso de la corriente por estos puntos.

6. Realizar un estudio para el tratamiento del lodo generado en forma de espuma con material orgánico disuelto, dicho lodo es localizado en la superficie de la celda de electrocoagulación.

Método por adsorción

7. Antes de tratar el desecho líquido acuoso con alto contenido de coloides orgánicos, dejarlo reposar por 30 minutos aproximadamente para que los sólidos grandes disueltos precipiten, y evitar así que se sature la torre de adsorción.
8. Lavar en flujo contrario y en flujo normal la torre de adsorción luego de cada prueba, esto para limpiar la superficie del carbón activado y tener así un área mayor de contacto para futuras pruebas.
9. Tener control sobre la abertura de la llave de salida del desecho líquido acuoso tratado, para obtener el caudal deseado a los 10, 15 y 20 minutos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARISTIZÁBAL CASTRILLÓN, Adriana. *Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso*. Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Química. Medellín, 2007. 142 p.
2. AYRES, Gilbert. *Análisis químico cuantitativo*. Madrid: HARLA, 1975. 740 p.
3. CHACÓN CASTILLO, Juan Matías. *Mineralización de colorantes por foto-fenton y energía solar*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, s.a. 8 p.
4. FERNANDEZ ALBA, Antonio Rodríguez. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid: CEIM, s.a. 136 p.
5. GEANKOPLIS, Christie. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3ª ed. México: Continental, 1998. 1008 p.
6. Guatemala. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Acuerdo Gubernativo 236-2006*. 5 de mayo de 2006. 24 p.

7. LENORE S, Clesceri; GREENBERG, Arnold E.; EATON, Andrew D. *Standard method for the examination of water and waserwster*. 20 th ed. United States: APHA AWWA WEF, 1998. 1325 p.
8. SARA VIA CELIS, Pedro. *Contaminación del agua*. Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería, s.a. 95 p.
9. RAMALHO, Rubens. *Tratamiento de aguas residuales*. Faculty of Sciencie and Engineering, Laval University. Quebec: REVERTÉ, 1983. 705 p.

APÉNDICE 1

a) Análisis de datos para el método foto fenton

a.1) Análisis previos para la aplicación del método foto fenton

Dosificaciones de volumen para el sulfato de hierro y peróxido de hidrógeno, en relación 1-10%.

Volumen (mL)		Color inicial (Pt-Co)	[FeSO ₄ *7H ₂ O] (M)		
FeSO ₄ *7H ₂ O	H ₂ O ₂		0,75	0,5	0,25
0,5	5		670	534	116
1	10	3450	540	450	167
2	20		630	490	200

Fuente: elaboración propia.

Relación de pH, para el estudio del método foto fenton.

Rango pH	Color inicial (Pt-Co)	[FeSO ₄ *7H ₂ O], Color final		
		0,75	0,5	0,25
2-3	3450	5040	3500	3860
3-4		2870	3020	1530
4-5		1440	1285	1820
5-6		970	930	665
6-7		1000	940	890

Fuente: elaboración propia.

a.2) Datos calculados para el método foto fenton

Porcentaje de remoción de color, para cada corrida.

Corrida	[FeSO ₄ *7H ₂ O] (mol/L)	Color inicial (Pt-Co)	Color final (Pt-Co)	pH inicial	pH final	%Remoción color
1	0,75	7700	1100	5-6	3-4	85,71
	0,5		692			91,01
	0,25		970			87,40
2	0,75		1077			86,01
	0,5		700			90,91
	0,25		1005			86,95
3	0,75		1100			85,71
	0,5		640			91,69
	0,25		958			87,56
4	0,75		1082			85,95
	0,5		686			91,09
	0,25		980			87,27
5	0,75		1090			85,84
	0,5		674			91,25
	0,25		990			87,14
6	0,75		1070			86,10
	0,5		697			90,95
	0,25		974			87,35
7	0,75		1082			85,95
	0,5		690			91,04
	0,25		980			87,27

Fuente: elaboración propia.

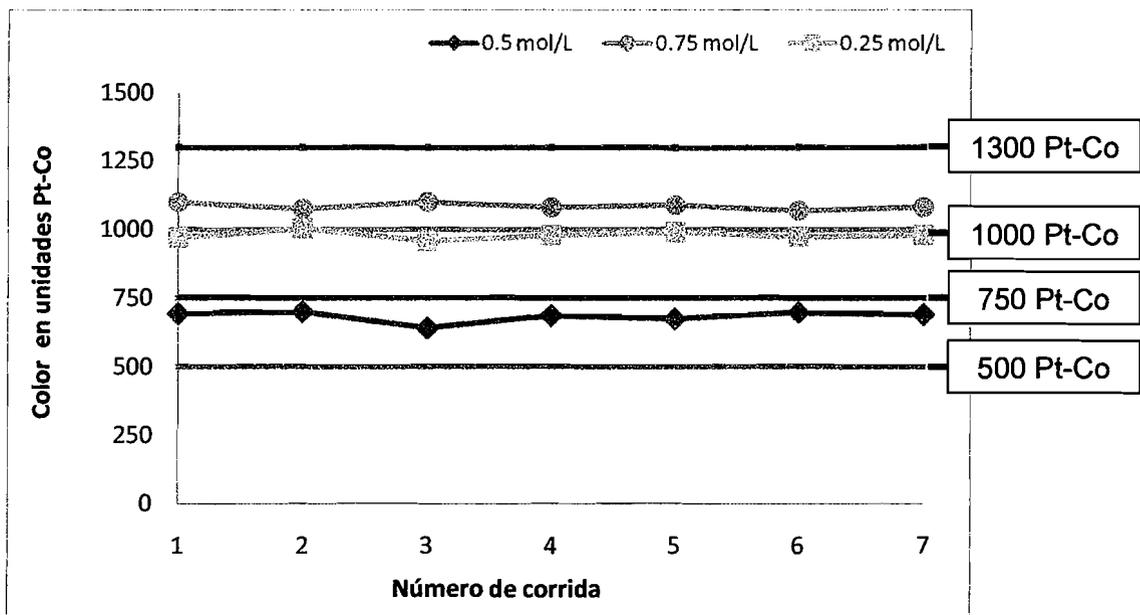
Continuación apéndice a.2)

Porcentaje promedio de la remoción de color y color promedio final en unidades Pt-Co para cada una de las concentraciones trabajadas.

[FeSO ₄ *7H ₂ O] (mol/L)	% Promedio remoción	Color final promedio (Pt-Co)
0,75	85,90 ± 0,15	1086 ± 11,38
0,50	91,13 ± 0,27	683 ± 20,63
0,25	87,28 ± 0,19	980 ± 14,97

Fuente: elaboración propia.

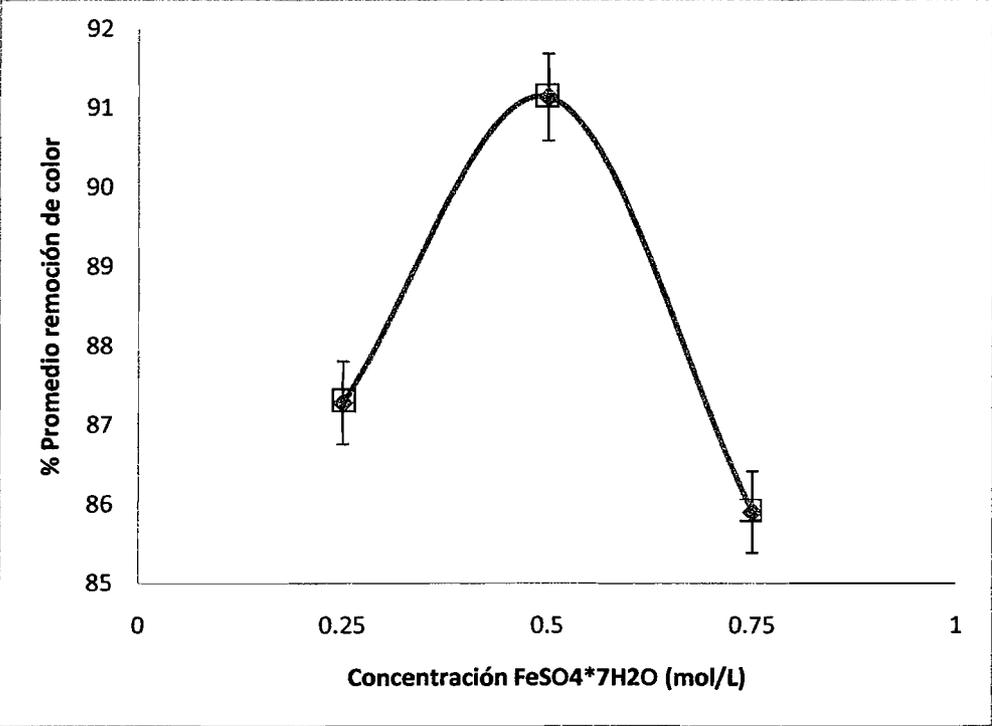
Gráfica de color final obtenido por el método foto fenton, comparado con los límites establecidos por el acuerdo gubernativo 236-2006. Color inicial 7700 (Pt-Co).



Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice a.2)

Porcentaje promedio de remoción de color VRS. Concentración de sulfato de hierro.



Fuente: elaboración propia.

b) Análisis de datos para el método por electrocoagulación

b.1) Análisis previos para la aplicación del método por electrocoagulación

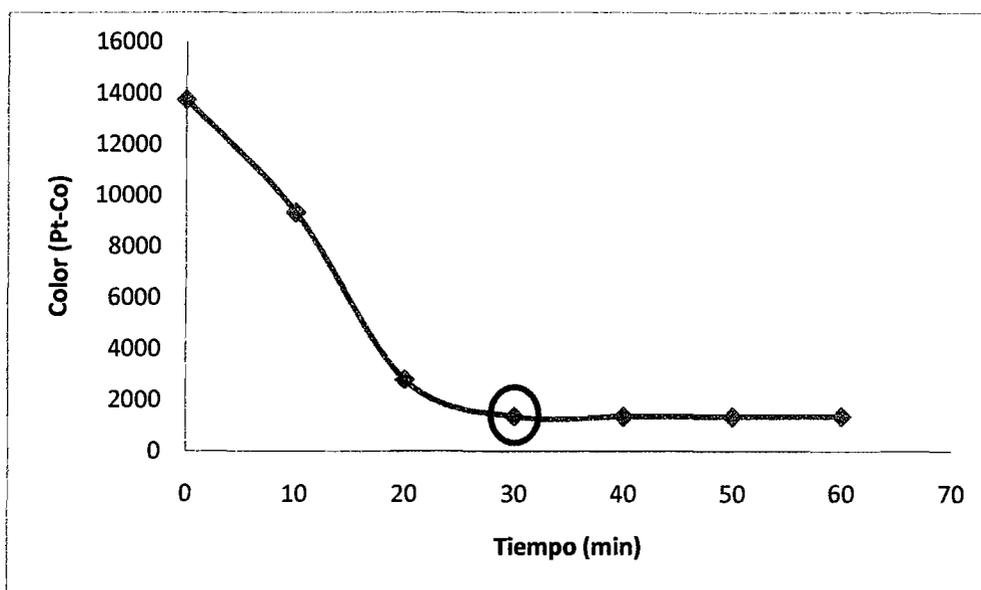
Datos de color en unidades Pt-Co, aplicando 24 V y una separación de 0,5 cm. entre placas.

Tiempo (min)	Color (Pt-Co)
0	13725
10	9320
20	2790
30	1370
40	1365
50	1360
60	1360

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice b.1)

Color en unidades Pt-Co VRS. Tiempo de aplicación de corriente, para 24 V y una separación de 0,5 cm. entre placas.



Fuente: elaboración propia.

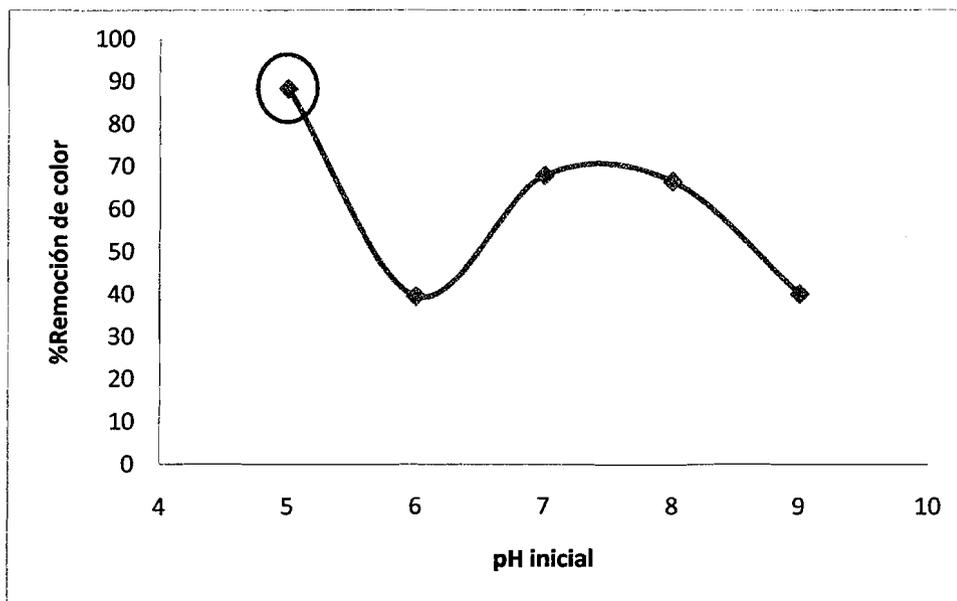
Continuación apéndice b.1)

Relación de pH, para el estudio del método por electrocoagulación.

pH	Color inicial (Pt-Co)	Color final (Pt-Co)	%Remoción color
5	3450	405	88,3
6		2085	39,6
7		1105	68,0
8		810	66,5
9		2065	40,1

Fuente: elaboración propia.

Porcentaje de remoción de color VRS. pH inicial.



Fuente: elaboración propia.

b.2) Datos calculados para el método por electrocoagulación

Datos calculados, para la aplicación de 24 V y una separación de 0,5 cm. entre placas de aluminio.

Corrida	Color inicial (Pt-Co)	Color final (Pt-Co)	%Remoción de color	% Promedio remoción de color
1	7700	769	90,01	89,91
2		775	89,94	
3		767	90,04	
4		778	89,90	
5		773	89,96	
6		785	89,81	
7		790	89,74	

Fuente: elaboración propia.

Datos calculados, para la aplicación de 24 V y una separación de 1,5 cm. entre placas de aluminio.

Corrida	Color inicial (Pt-Co)	Color final (Pt-Co)	%Remoción de color	% Promedio remoción de color
1	7700	1520	80,26	80,36
2		1506	80,44	
3		1510	80,39	
4		1512	80,36	
5		1515	80,32	
6		1513	80,35	
7		1510	80,39	

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice b.2)

Datos calculados, para la aplicación de 18 V y una separación de 0,5 cm. entre placas de aluminio.

Corrida	Color inicial (Pt-Co)	Color final (Pt-Co)	%Remoción de color	% Promedio remoción de color
1	7700	1196	84,47	84,45
2		1200	84,42	
3		1189	84,56	
4		1190	84,55	
5		1195	84,48	
6		1202	84,39	
7		1197	84,45	

Fuente: elaboración propia.

Datos calculados, para la aplicación de 18 V y una separación de 1,5 cm. entre placas de aluminio.

Corrida	Color inicial (Pt-Co)	Color final (Pt-Co)	%Remoción de color	% Promedio remoción de color
1	7700	1587	79,39	79,44
2		1576	79,53	
3		1584	79,43	
4		1578	79,51	
5		1588	79,38	
6		1590	79,35	
7		1580	79,48	

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice b.2)

Datos calculados, para la aplicación de 12 V y una separación de 0,5 cm. entre placas de aluminio.

Corrida	Color inicial (Pt-Co)	Color final (Pt-Co)	%Remoción de color	% Promedio remoción de color
1	7700	1745	77,34	77,30
2		1750	77,27	
3		1754	77,22	
4		1748	77,30	
5		1755	77,21	
6		1743	77,36	
7		1741	77,39	

Fuente: elaboración propia.

Datos calculados, para la aplicación de 12 V y una separación de 1,5 cm. entre placas de aluminio.

Corrida	Color inicial (Pt-Co)	Color final (Pt-Co)	%Remoción de color	% Promedio remoción de color
1	7700	2300	70,13	70,11
2		2310	70,00	
3		2306	70,05	
4		2297	70,17	
5		2292	70,23	
6		2300	70,13	
7		2308	70,03	

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice b.2)

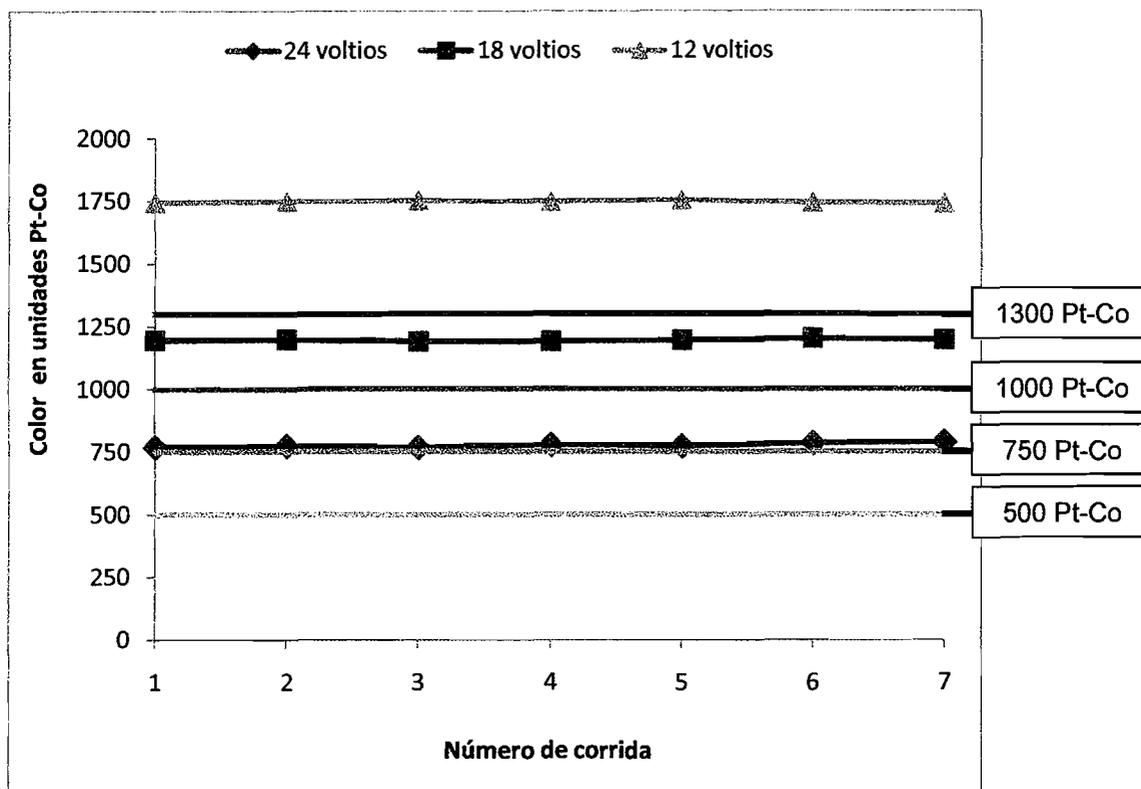
Porcentaje promedio de remoción de color para los diferentes voltajes aplicados y cada separación entre placas.

Separación entre placas (cm)	Voltaje (V)	% Promedio remoción de color	Color final promedio (Pt-Co)
0,5	12	77,30 ± 0,07	1748 ± 5,35
	18	84,45 ± 0,06	1196 ± 4,79
	24	89,91 ± 0,11	777 ± 8,34
1,0	12	73,71 ± 0,08	2023 ± 5,89
	18	81,95 ± 0,07	1387 ± 5,09
	24	85,14 ± 0,08	1194 ± 6,38
1,5	12	70,11 ± 0,08	2302 ± 6,44
	18	79,44 ± 0,07	1583 ± 5,38
	24	80,36 ± 0,06	1512 ± 4,42

Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice b.2)

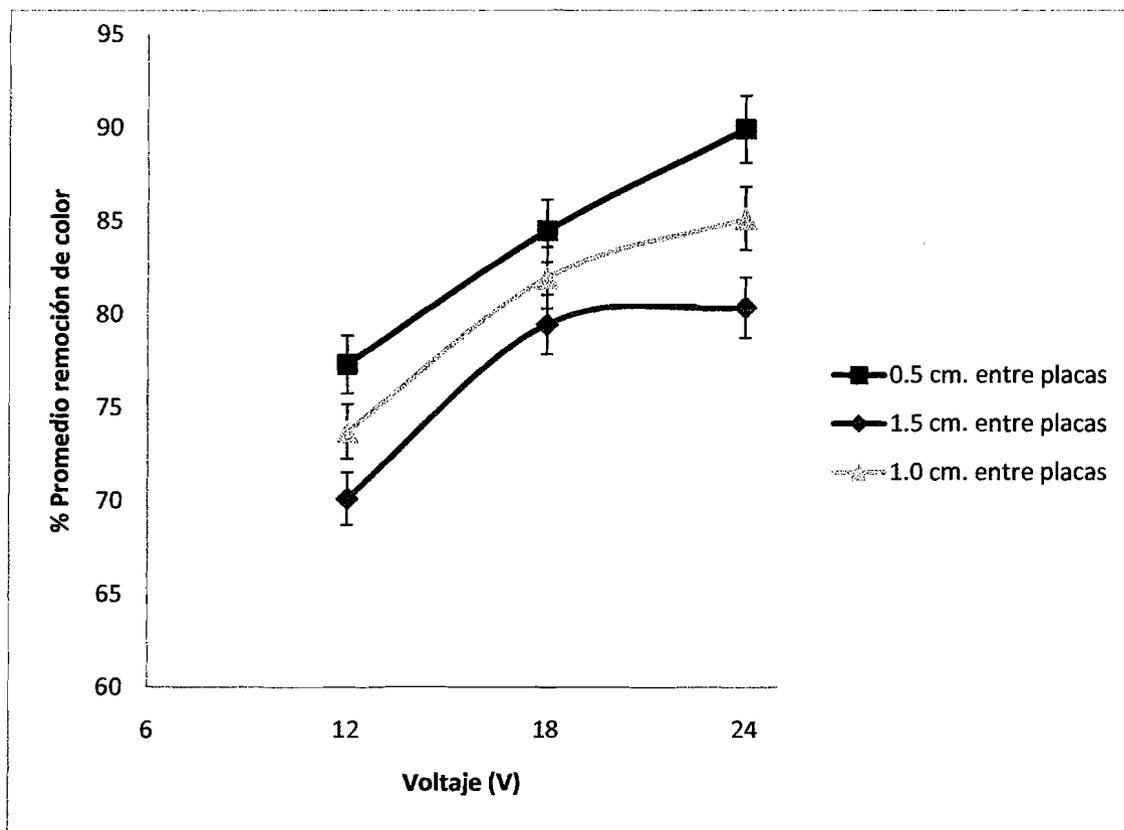
Gráfica de color final obtenido por el método por electrocoagulación, comparado con los límites establecidos por el Acuerdo Gubernativo 236-2006. Color inicial 7700 (Pt-Co).



Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice b.2)

Porcentaje promedio de remoción de color VRS. Voltaje aplicado, para cada distancia entre electrodos.



Fuente: elaboración propia.

c) Análisis de datos para el método de adsorción

c.1) Datos calculados para el método de adsorción

Porcentaje de remoción de color, para cada corrida.

No. Corrida	Volumen (L)	Tiempo de paso (min)	Color (unidades Pt-Co)		pH		%Remoción color
			Inicial	Final	Inicial	Final	
1	10	10	7700	5934	5-6	6-7	22,94
		15		5645			26,69
		20		4150			46,10
2		10		5925			23,05
		15		5668			26,39
		20		4200			45,45
3		10		5923			23,08
		15		5660			26,49
		20		4164			45,92
4		10		5947			22,77
		15		5649			26,64
		20		4168			45,87
5		10		5920			23,12
		15		5661			26,48
		20		4170			45,84
6		10		5939			22,87
		15		5647			26,66
		20		4169			45,86
7		10		5935			22,92
		15		5654			26,57
		20		4165			45,91

Fuente: elaboración propia.

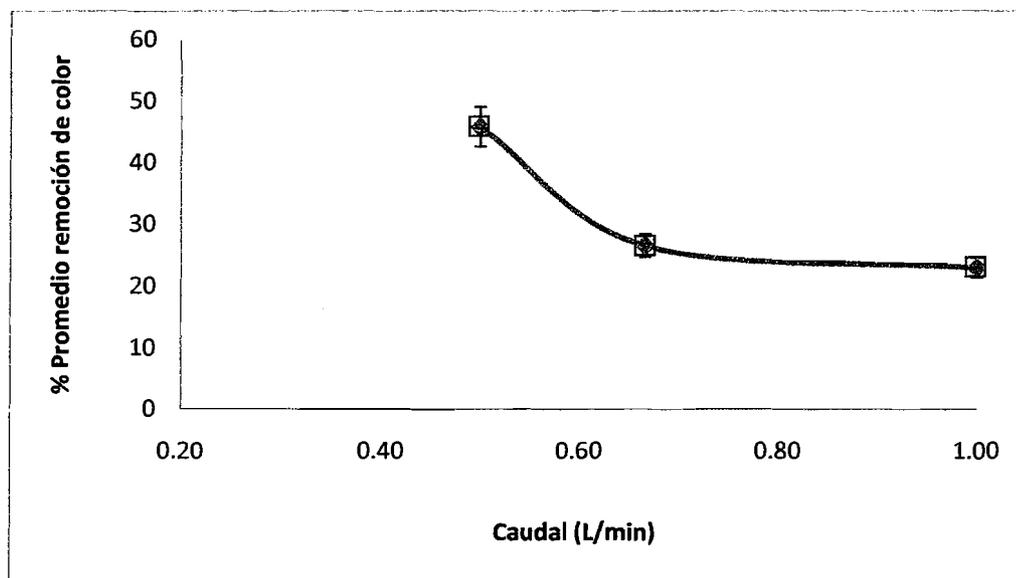
Continuación apéndice c.1)

Porcentaje promedio de remoción de color y color final promedio para cada caudal utilizado.

Caudal (L/min)	% Promedio remoción de color	Color final promedio (Pt-Co)
1,00	20,54 ± 0,13	5770 ± 9,67
0,67	27,63 ± 0,11	5641 ± 8,47
0,50	51,90 ± 0,20	4658 ± 15,08

Fuente: elaboración propia.

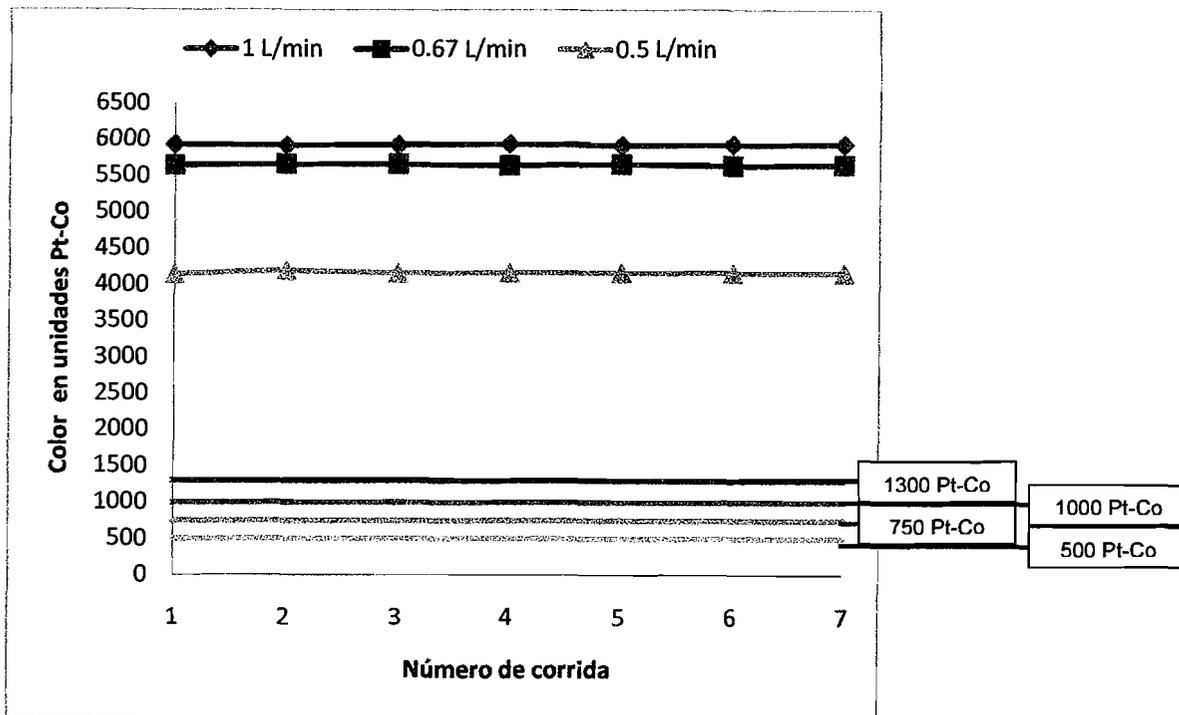
Porcentaje promedio de remoción de color VRS. Caudal.



Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice c.1)

Gráfica de color final obtenido por el método adsorción, comparado con los límites establecidos por el Acuerdo Gubernativo 236-2006. Color inicial 7700 (Pt-Co).



Fuente: elaboración propia.

APÉNDICE 2

a) **Análisis para los métodos: foto fenton, electrocoagulación y adsorción**

a.1) Procedimiento general

Para llevar a cabo el desarrollo del proyecto se planteó el siguiente procedimiento general:

- Conocer la caracterización del agua residual de entrada, para establecer las variables con las que se contarán para la aplicación de cada método.
- Armar el reactor del método a trabajar, con ayuda de equipo que se tenga al alcance y con equipo proporcionado por la empresa.
- Tomar una muestra de agua residual de entrada y depositarla en el reactor.
- Según el método a emplear, ajustar parámetros si lo requiere (pH, voltaje, etc.).
- Adición de los reactivos necesarios para que se lleven a cabo las reacciones esperadas, según el método a trabajar.
- Realizar las corridas necesarias, cambiando las variables pertinentes para cada método (tiempo de retención, voltaje, pH, etc.).
- Tomar una muestra del desecho líquido acuoso tratado, para medir el parámetro de color en unidades platino-cobalto, con la ayuda del colorímetro DR/890, compararlo con el inicial y establecer el porcentaje de remoción para cada corrida de cada método aplicado.

Fuente: elaboración propia.

a.2) Aplicación método foto fenton

- **Equipo**

Tubos Nessler de 100 mL, beacker de 150 mL, varillas de agitación y gradilla.

- **Reactivos**

Solución de sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), a concentraciones de 0,75, 0,5 y 0,25 mol/L y peróxido de hidrógeno (agua oxigenada comercial al 3%)

- **Procedimiento**

- Se tomaron 100 mL del desecho líquido acuoso y se ajustó el pH (rango 5-6), [el desecho líquido acuoso generalmente sale de la planta de producción a pH ácido (5-6)].
- Se agregaron los 100 mL del desecho líquido en un beacker, se agregó 1 mL de la solución $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ a 0,75 mol/L y 10 mL de peróxido de hidrógeno al 3%, y se agitó la solución, [según bibliografía la relación sal férrica - peróxido de hidrógeno es de 1-10%].
- La solución anterior se agregó al tubo Nessler y se expuso en la gradilla a la radiación de los rayos solares por 60 minutos.
- Se tomó una muestra del desecho líquido acuoso tratado anteriormente, y con la ayuda del colorímetro DR/890, y se tomó la lectura del parámetro color en unidades platino-cobalto; si era necesario se diluyó la muestra, debido a que la lectura mayor del colorímetro es de 550 unidades Pt-Co.
- Este mismo procedimiento se realizó para las concentraciones de 0,5 y 0,25 mol/L de la solución de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Fuente: elaboración propia.

a.3) Evaluación del método por electrocoagulación

- **Equipo**

Celda de electrocoagulación para tratar 2 litros de desecho líquido acuoso, 3 placas de aluminio para los electrodos, una fuente de poder variable, multímetro.

- **Procedimiento**

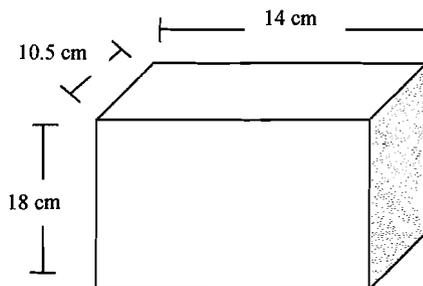
- Se tomó una muestra de 2 litros del desecho líquido acuoso, se verificó que el pH estuviera en el rango 5-6, y se agregó a la celda de electrocoagulación.
- Se introdujeron los electrodos de aluminio, separados por 1,5 cm entre cada uno de ellos. Dos de los electrodos eran cátodos y uno el ánodo de sacrificio.
- Se armó el circuito entre los electrodos y la fuente de poder variable. (ver apéndice a.4)
- Se ajustó la fuente de poder variable a 24 voltios, y se conectó en el tomacorriente, para transitarle corriente a la celda de electrocoagulación.
- Se dejó trabajar la celda de electrocoagulación por 30 minutos.
- Se dejó reposar el desecho líquido acuoso tratado por otros 30 minutos.
- Se tomó una muestra del desecho líquido acuoso tratado y con la ayuda del colorímetro DR/890, se tomó la lectura del parámetro color en unidades platino-cobalto; si era necesario se diluyó la muestra, debido a que la lectura mayor del colorímetro es de 550 unidades Pt-Co.
- Se realizó el procedimiento anterior para distancia de 1,0 y 0,5 cm entre los electrodos.
- Este mismo procedimiento se realizó para voltajes de 18 y 12 Voltios.

Fuente: elaboración propia.

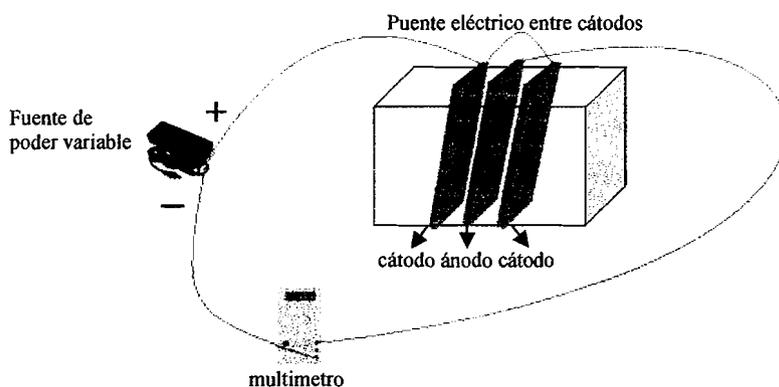
a.4) Diseño celda de electrocoagulación

Para diseñar la celda de electrocoagulación se especificó que se trabajaría con un volumen de 2 L. del desecho líquido acuoso con alto contenido de coloides orgánicos.

- Se construyó una caja de lámina de acrílico 3 mm de espesor con medidas:



- Para los electrodos se cortaron tres placas de aluminio de 3 mm. de espesor (dos de ellas para cátodos y un ánodo) con medidas de 18 X 10.5 cm.
- Con cable calibre 18 se armó el circuito eléctrico, uniendo la fuente de poder variable, el multímetro, la caja de plástico y las 3 placas de aluminio, de la siguiente forma:



Fuente: elaboración propia.

a.5) Evaluación del método de adsorción con carbón activado

- **Equipo**

Un garrafón de agua, una regadera de hojalata, un recipiente alimentador.

- **Reactivos**

Carbón activado granular, grava.

- **Procedimiento**

- Se armó la torre de adsorción, con la ayuda de los materiales domésticos.
- Se agregó $\frac{3}{4}$ partes de carbón activado granular al garrafón de agua (torre de adsorción).
- Se tomaron 10 litros del desecho líquido acuoso y se agregó al recipiente alimentador.
- Se ajustó la llave de salida del desecho líquido acuoso previamente tratado, para que el tiempo de paso de los 10 litros del desecho líquido sobre el área de adsorción sea de 10 minutos, esto con el fin de tener un caudal de 1 L/min.
- Luego se abrió la llave de paso del desecho líquido acuoso del recipiente alimentador a la torre de adsorción.
- Se tomó una muestra del desecho líquido acuoso tratado y con la ayuda del colorímetro DR/890, se tomó la lectura del parámetro color en unidades platino-cobalto; si era necesario se diluyó la muestra, debido a que la lectura mayor del colorímetro es de 550 unidades Pt-Co.
- Se repitieron los pasos anteriores dos veces más, para tener confiabilidad de los resultados.
- Este mismo procedimiento se realizó para tiempos de 15 y 20 minutos.

Fuente: elaboración propia.

b) Exhibición del método foto fenton

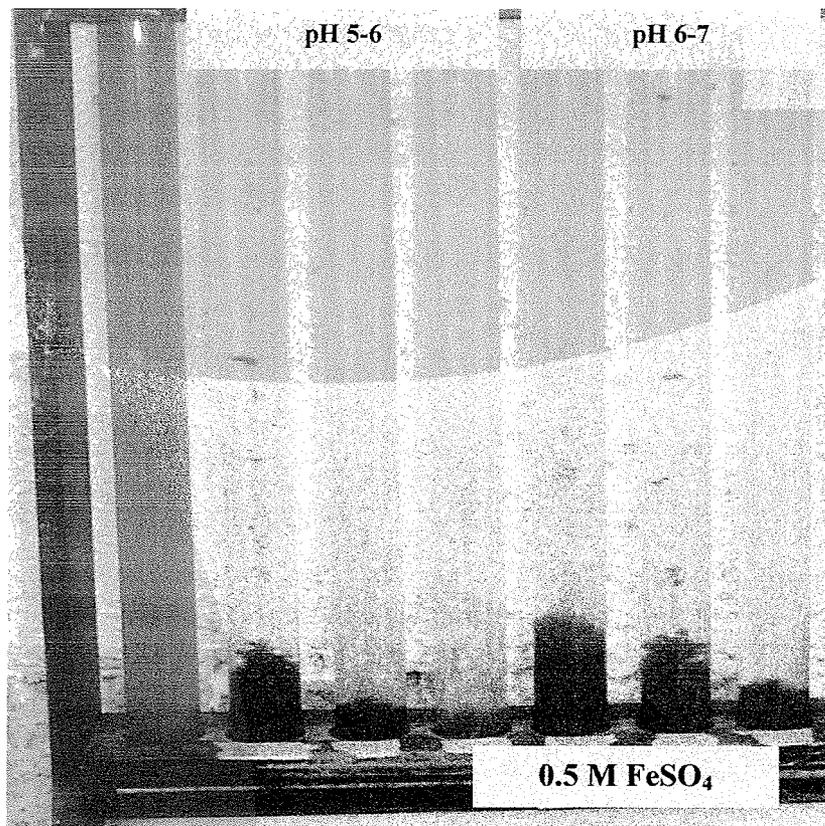
Dosificaciones en relación 1-10% de sulfato de hierro y peróxido de hidrógeno.



Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice b)

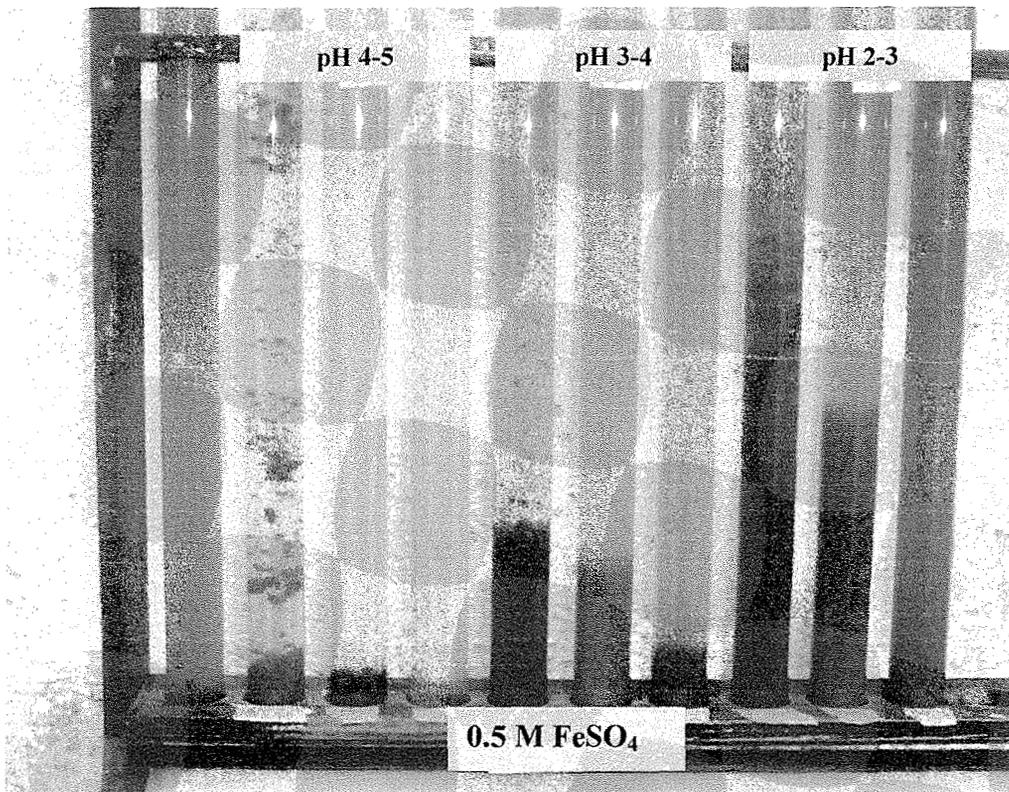
Ajuste de pH rango 5-7 para el desecho líquido acuoso de entrada, agregando 1 mL de sulfato de hierro y 10 mL de peróxido de hidrógeno.



Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice b)

Ajuste de pH rango 2-5 para el desecho líquido acuoso de entrada, agregando 1 mL de sulfato de hierro y 10 mL de peróxido de hidrógeno.



Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice b)

Exposición a la radiación solar por 30 minutos, método foto fenton.



Fuente: elaboración propia.

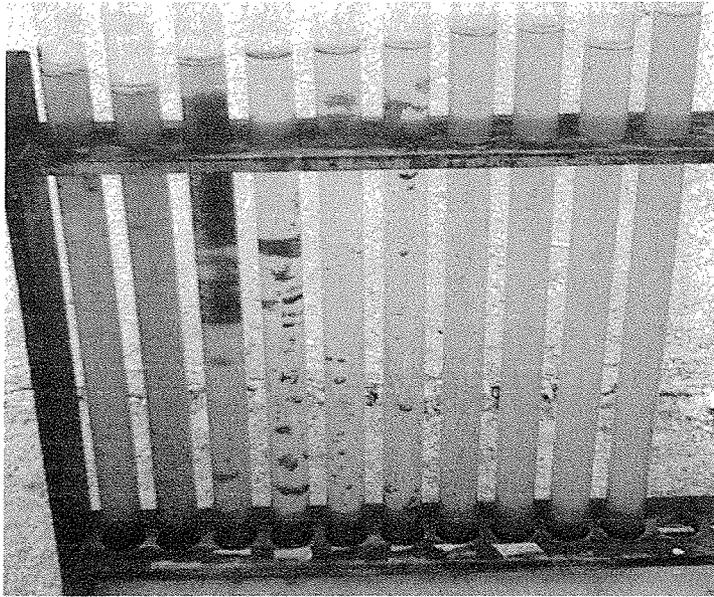
Comparación del desecho líquido acuoso de entrada y el desecho líquido tratado por el método foto fenton.



Fuente: elaboración propia.

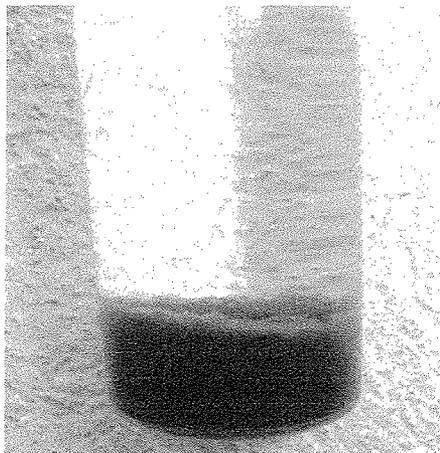
Continuación apéndice b)

Formación y precipitación de flóculos, método foto fenton.



Fuente: elaboración propia.

Lodo generado (polvillo), método foto fenton.



Fuente: elaboración propia.

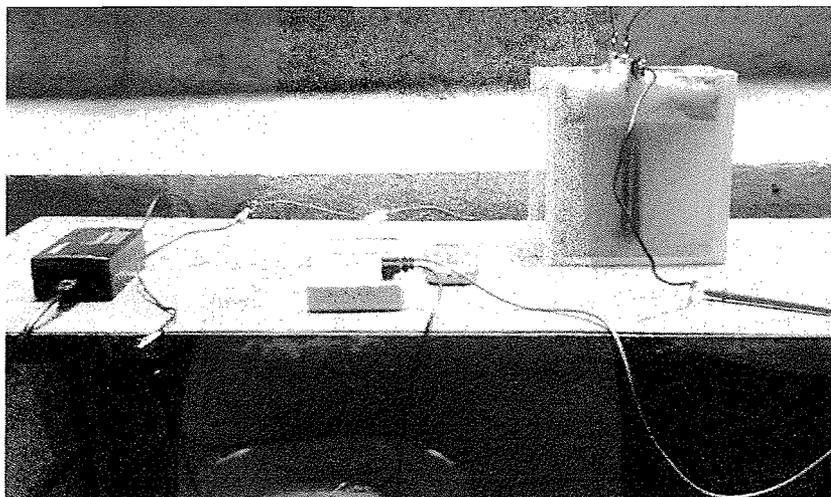
c) Exhibición del método por electrocoagulación

Preparación celda de electrocoagulación.



Fuente: elaboración propia.

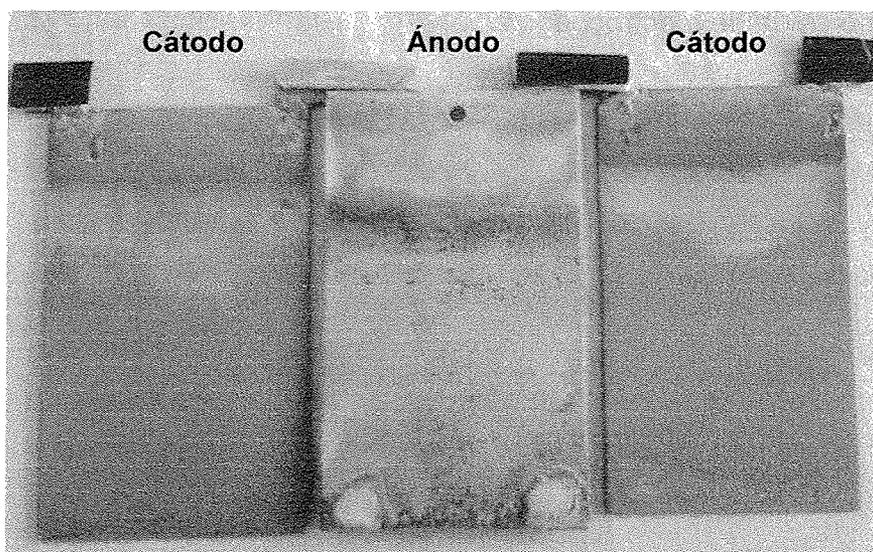
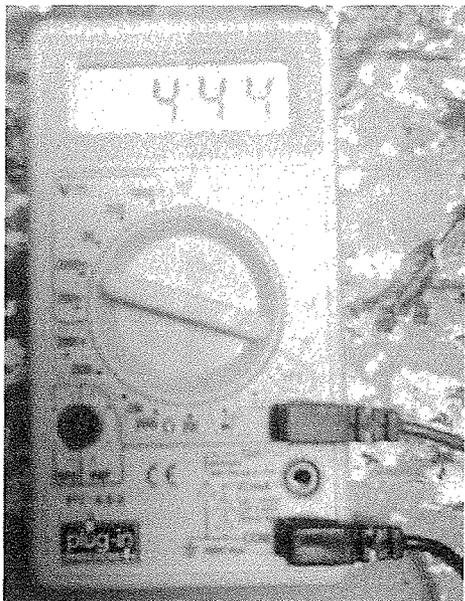
Equipo celda de electrocoagulación.



Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice c)

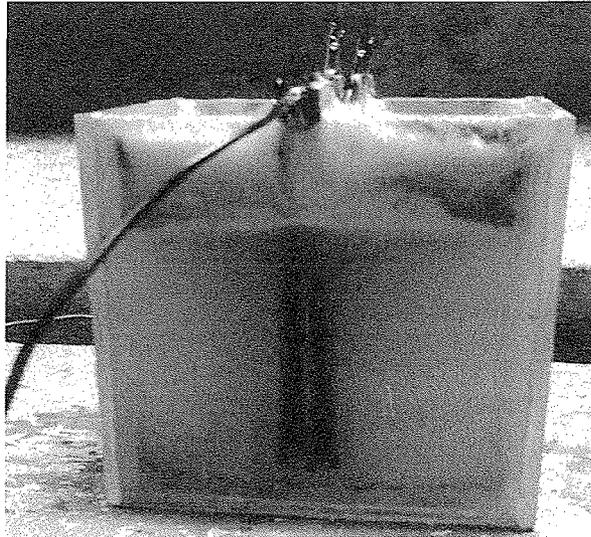
Elementos de la celda de electrocoagulación, multímetro, fuente de poder variable y placas de aluminio.



Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice c)

Aplicación de voltaje al desecho líquido acuoso.



Fuente: elaboración propia.

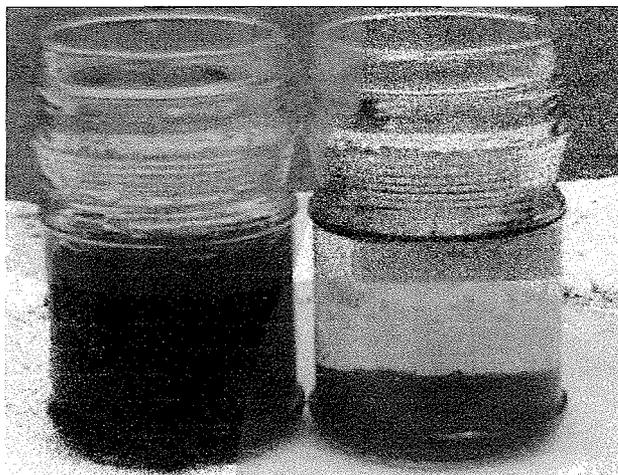
Generación de lodo (espuma), método por electrocoagulación.



Fuente: elaboración propia.

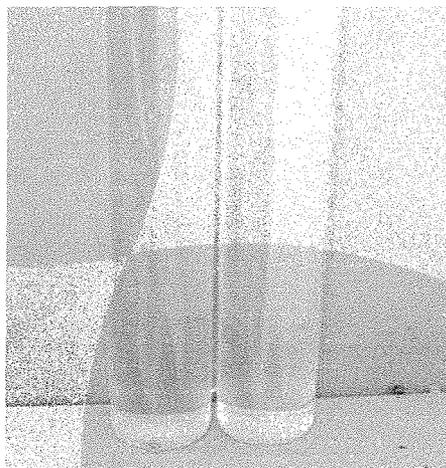
Continuación apéndice c)

Comparación del desecho líquido acuoso de entrada y el desecho líquido tratado por electrocoagulación.



Fuente: elaboración propia.

Comparación del desecho líquido tratado por electrocoagulación y el desecho líquido tratado filtrado.



Fuente: elaboración propia.

d) Exhibición del método por adsorción con carbón activado

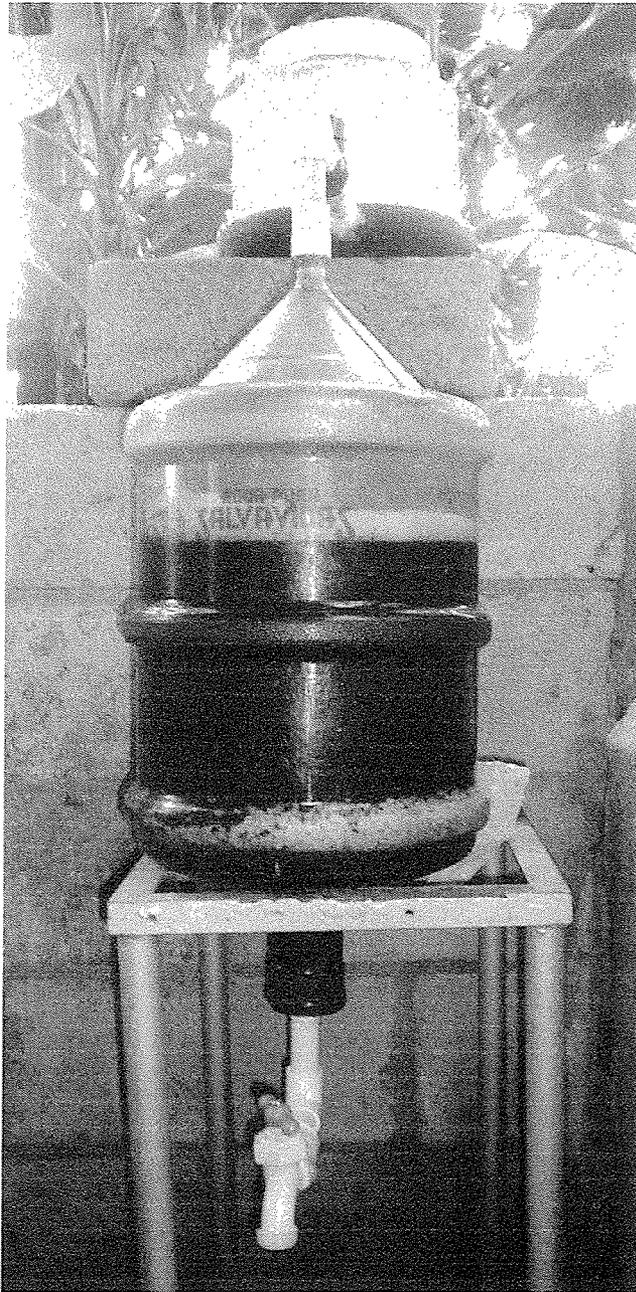
Torre de adsorción con carbón activado, construida de materiales domésticos.



Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice d)

Paso del desecho líquido acuoso por la torre de adsorción.



Fuente: elaboración propia.

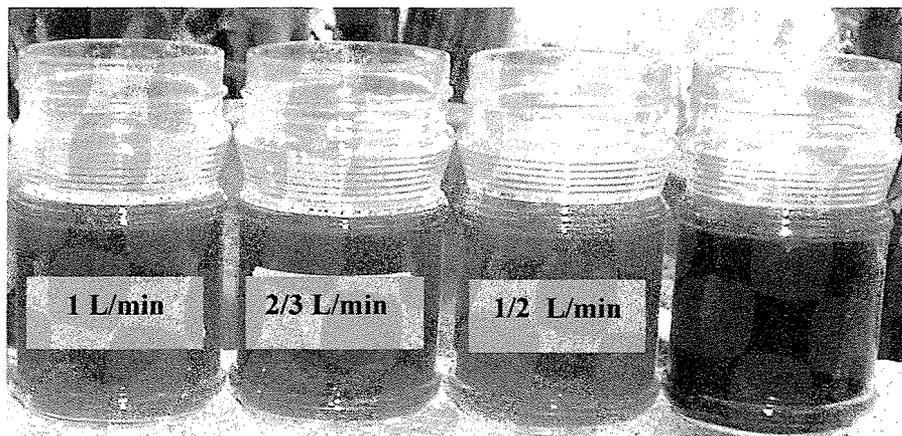
Continuación apéndice d)

Toma de muestra para el desecho líquido previamente tratado.



Fuente: elaboración propia.

Comparación del desecho líquido acuoso de entrada y el desecho líquido tratado para diferentes caudales.



Fuente: elaboración propia.

e) **Colorímetro marca Hach DR/890**

Kit colorímetro marca Hach DR/890.



Fuente: elaboración propia.

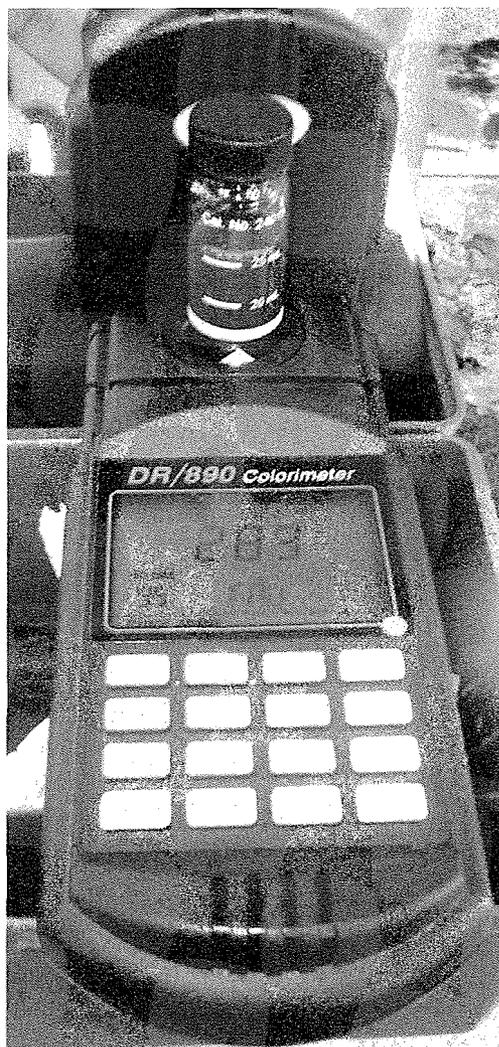
Preparación de la muestra para la lectura del colorímetro.



Fuente: elaboración propia.

Continuación apéndice e)

Lectura del color en unidades platino-cobalto.



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores.

Parámetros	Dimensionales	Valores Iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados celsius	TRC +/- 7	TRC +/- 7	TRC +/- 7	TRC +/- 7	TRC +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/ Presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1*10^8$	$< 1*10^6$	$< 1*10^5$	$< 1*10^4$	$< 1*10^4$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

Fuente: artículo 20, Acuerdo Gubernativo 236-2006, Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos. p. 9.

