

**TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE TEÑIDO DE
CUERO EN BOMBO POR ELECTROCOAGULACIÓN- SECTOR DE SAN
BENITO**

**DIANA MILENA LAGUNA GRAJALES
CAMILO ANTONIO MANRIQUE BELTRÁN**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2014**

**TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE TEÑIDO DE
CUERO EN BOMBO POR ELECTROCOAGULACIÓN-SECTOR DE SAN
BENITO**

**ELABORADO POR:
DIANA MILENA LAGUNA GRAJALES
CAMILO ANTONIO MANRIQUE BELTRÁN**

**Proyecto de grado - pregrado
Modalidad: trabajo de grado**

**Dirigido por:
Ing. Nidia Elena Ortiz Penagos**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2014**

Nota de aceptación

Firma Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C., Octubre 09 de 2014

TABLA DE CONTENIDO

1.	RESUMEN	9
2.	INTRODUCCIÓN	10
3.	OBJETIVOS	11
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	11
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
4.	MARCO DE REFERENCIA.....	12
4.1	MARCO CONTEXTUAL	12
4.2	MARCO TEÓRICO.....	16
4.3	GLOSARIO	29
4.4	MARCO INSTITUCIONAL.....	31
4.5	MARCO LEGAL.....	33
4.5.1	De la constitución política que da sustento a todas las leyes que versan sobre la materia.	33
4.5.2	De la legislación de vertimientos a nivel nacional.	33
4.5.3	De la legislación de vertimientos a nivel distrital.	33
4.5.4	De la exigencia legal a las personas jurídicas y naturales que desarrollan los procesos de curtido del cuero.....	34
4.5.5	De los parámetros de vertimientos que deben cumplir las personas jurídicas y naturales que desarrollan los procesos de curtido del cuero.	34
5.	DESARROLLO CENTRAL	35
5.1	METODOLOGÍA	35
5.2	PROCEDIMIENTO.....	40
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	41
6.1	RESULTADOS TINTA NEGRA	41
6.1.1	Determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual...41	
6.1.2	Evaluación del efecto de las variables independientes como número de electrodos y metal utilizado en cada electrodo.	42

6.1.3	Determinación y Comparación de los parámetros fisicoquímicos con los límites permisibles.....	45
6.1.4	Tasa de reutilización para tinta negra:	47
6.1.5	Resultados de análisis básico de costos.....	48
6.1.6	Experimentación adicional	49
6.2	RESULTADOS TINTA AZUL	51
6.2.1	Determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual...51	
6.2.2	Evaluación del efecto de las variables independientes como número de electrodos y metal utilizado en cada electrodo.	52
6.2.3	Comparación del mejor ensayo con los límites permisibles.	56
6.2.4	Resultados de experimentación adicional	58
6.2.5	Tasa de reutilización para la tinta azul.	59
1.1.1	Resultados básicos de costos	60
7.	IMPACTO SOCIAL, HUMANÍSTICO Y AMBIENTAL DEL PROYECTO	61
8.	CONCLUSIONES	63
9.	RECOMENDACIONES	64
10.	BIBLIOGRAFÍA	65
11.	ANEXOS	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de San Benito (Bogotá D.C.)	13
Figura 2. Predios dedicados a curtiembres en el área de influencia del río Tunjuelito en el barrio San Benito (Bogotá D.C.)	15
Figura 3: Diagrama esquemático del proceso de una celda de electrocoagulación de dos electrodos.....	25
Figura 4: Número de electrodos Vs Conductividad.....	44
Figura 5. Turbiedad después de la electrocoagulación.....	45
Figura 6. Comparación visual del agua utilizando arena sílice.	50
Figura 7. Comparación visual del agua utilizando carbón activado en polvo.	50
Figura 8. Montaje experimental del proceso de electrocoagulaciónl	54
Figura 9. Número de electrodos Vs Conductividad para tinta azul	54
Figura 10. Turbiedad después de la electrocoagulación tinta azul.	55
Figura 11. Comparación visual del agua utilizando arena sílice.	59
Figura 12. Comparación visual del agua utilizando carbón activado en polvo.	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de agua residual del proceso de teñido bombo.	35
Tabla 2. Diseño experimental para el proceso de electrocoagulación.	36
Tabla 3. Determinación y comparación del mejor ensayo con los límites permisibles (Resolución 3957 del 2009).	37
Tabla 4. Análisis adicional del agua electrocoagulada.	39
Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos de agua residual del proceso de teñido en bombo.	41
Tabla 6. Diseño experimental.	43
Tabla 7. Determinación y comparación del mejor ensayo con los límites permisibles (Resolución 3957 del 2009).	46
Tabla 8. Ensayos y análisis adicional para tinta negra.	49
Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos de agua residual del proceso de teñido en Bombo.	51
Tabla 10. Diseño experimental del tratamiento del agua con electrocoagulación .	53
11. Comparación del mejor ensayo con los límites permisibles (Resolución 3957 del 2009).	56
Tabla 12. Ensayo adicional utilizando carbón activado en polvo para tinta azul. ...	58

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Determinación de DQO.....	70
Anexo 2. Determinación de DBO ₅	70
Anexo 3. Determinación de sólidos.....	70
Anexo 4. Resultado de análisis del agua residual emitido por laboratorio certificado QUIMIA LTDA.....	70
Anexo 5. . Resultado de análisis del agua tratada con electrocoagulación, emitido por laboratorio certificado QUIMIA LTDA.....	70
Anexo 6. Resolución 1003 de acreditación del laboratorio QUIMIA LTDA.	70
Anexo 7. Registro Fotográfico del proceso de electrocoagulación.	70

1. RESUMEN

El presente trabajo se realizó teniendo como objetivo principal la evaluación de la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales del proceso de teñido de cuero en bombo, mediante la técnica de electrocoagulación, para ello se realizó determinación de los parámetros fisicoquímicos como: DBO₅, DQO, Turbiedad, conductividad, pH, cromo, hierro, aluminio, sólidos totales, sólidos suspendidos y sólidos disueltos. Para establecer un punto de comparación con el agua residual tratada en el cumplimiento de la legislación vigente para la ciudad de Bogotá en materia de parámetros exigidos para vertimientos al alcantarillado (resolución 3957/2009).

El montaje experimental (electrocoagulador) se construyó a escala de laboratorio, el cual constaba de placas de metal de dos materiales diferentes como hierro y aluminio (electrodos), recipientes plásticos, cables conductores de energía y estos conectados a una batería de 12 voltios. Con el ejercicio anterior se evaluó el efecto de las variables independientes como: corriente, número de electrodos y posición de electrodos. De acuerdo a lo anterior, se determinaron los valores de turbiedad y conductividad; los ensayos que obtuvieron menores valores fueron seleccionados como los mejores ensayos, a los cuales se les realizaron análisis de los parámetros fisicoquímicos mencionados anteriormente y paralelamente se evaluó la posibilidad de reutilizar el agua tratada.

Con los valores obtenidos se mostró la eficiencia del tratamiento por electrocoagulación, sin embargo en algunos casos no se cumplió con los límites permisibles por la resolución 3957/2009. Con el fin de obtener valores que se ajustarán a la norma, se realizaron procesos simples de filtración con carbón activado y la arena sílice.

Los mejores ensayos se obtuvieron utilizando 4 electrodos (2 de aluminio como ánodo y 2 de hierro como cátodo) en un tiempo de 4 minutos de tratamiento por con electrocoagulación, observándose remoción: del 50% en sólidos totales para tinta negra y azul, 94% en turbiedad tinta azul y 100% tinta negra y una conductividad de 9.4% tinta azul y 22% tinta negra. El costo de la energía para el tratamiento por m³ varía de 4800\$ hasta 7500\$. El pH de las aguas producto del proceso de teñido de cuero en bombo tienden a ser acidas con pH cercanos a 3 o 4, el cual es necesario estabilizar a 7.

Por otro lado el agua residual del proceso de teñido tiene conductividades altas de (6.84 mS/cm tinta azul y 16.2 mS/cm tinta negra) por tanto no se dosifico sales, sin embargo se puede observar mayor remoción en el agua de conductividad inicial alta (tinta negra).

2. INTRODUCCIÓN

El afán del hombre por el dominio y el poder ha llevado al olvido el cuidado del ambiente de manera holística, gracias a que a lo largo de la historia se ha denotado una concepción antropocéntrica. Sin embargo este concepto ha ido cambiando por muchas razones, una por las exigencias de las autoridades ambientales competentes donde obligan a las empresas al cumplimiento legal a cuidar, proteger y preservar los recursos naturales, y otras por campañas educativas que ha hecho reflexionar a muchas personas y que por consiguiente de una u otra manera han sacado provecho de ello con innovación de nuevas tecnologías. Muchas de las tecnologías actualmente implementadas han sido estudiadas años atrás, aunque muchas no han sido desarrolladas ampliamente. Ejemplo de ello, se encuentra la electrocoagulación que se conoce desde el siglo XX y aun se sigue estudiando, con el fin de encontrar mayor eficiencia en los procesos para el tratamiento de las aguas residuales.

El presente trabajo se realizó teniendo como objetivo principal la evaluación de la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales del proceso de teñido de cuero en bombo mediante la técnica de electrocoagulación.

Las industrias del curtido de cuero, han sido consideradas como actividades sucias y contaminantes, lo cual implica demandas de grandes volúmenes de agua por proceso (ribera, curtido y acabado), tiempos de retención de las pieles con las dosificaciones de productos químicos como sales, cal, sulfuros, cromo y azocompuestos. Lo cual beneficia a la calidad del cuero pero aumenta la contaminación hídrica. Por lo anterior se llevó a cabo el desarrollo de una evaluación de un sistema de tratamiento por electrocoagulación del agua residual en el proceso de teñido en bombo, donde se logró una disminución de la contaminación en Cromo, DBO_5 , DQO, y sólidos del agua actualmente vertida que impacta negativamente los ríos Tunjuelito, Bogotá y Magdalena. La implementación de este tipo de tecnología limpia, representaría una alternativa de protección y cuidado del ambiente, y una solución para las empresas curtidoras en el cumplimiento de los parámetros exigidos por la Secretaría Distrital de Ambiente (Resolución 3957 de 2009) a solucionar el conflicto ambiental y legal que se tienen, minimizando la contaminación de las aguas y disminuyendo costos de producción por la posibilidad del reúso de estas aguas si son descontaminadas, surgiendo un efecto favorable en el escenario del tratamiento de las aguas residuales para la protección del ambiente.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- ✓ Evaluar la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales del proceso de teñido de cuero en bombo mediante la técnica de electrocoagulación.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar los parámetros fisicoquímicos de calidad de las aguas residuales del proceso de teñido de cuero en bombo.
- ✓ Evaluar el efecto del número de electrodos en el proceso de electrocoagulación, sobre la eficiencia en el tratamiento del agua residual, determinada por turbiedad y conductividad.
- ✓ Evaluar el efecto del metal utilizado en cada electrodo, en el ánodo y en el cátodo, sobre la eficiencia del tratamiento del agua residual, determinada por turbiedad, conductividad.
- ✓ Determinar los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua residual tratada para el mejor resultado obtenido en el tratamiento por electrocoagulación, determinado por los menores valores de conductividad y turbiedad obtenidos.
- ✓ Evaluar la posibilidad de reutilizar el agua residual tratada por electrocoagulación, dentro de los mismos procesos de las curtiembres dependiendo de los niveles de remoción logrados en el tratamiento.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1 MARCO CONTEXTUAL

Las empresas que transforman la piel cruda en cuero curtido y realizan actividades como remojo, pelambre, descarte, piquelado, curtición, rebajado y acabados, son principalmente mipymes (micros, pequeñas y medianas empresas), en la ciudad de Bogotá, de acuerdo con el registro empresarial de la Cámara de Comercio de Bogotá, en el año 2002 operaban en la ciudad 175 empresas dedicadas a actividades de curtición, donde el 86% correspondían a microempresas, el 13% pequeñas y 1% medianas empresas [1].

Los primeros registros de actividad curtiembre en Colombia corresponden a la década de 1920 en el departamento de Antioquia, para el sector relacionado con este proyecto (Departamento de Cundinamarca – Colombia) la actividad curtiembre data desde la década de 1950 [2]. Posteriormente algunos campesinos del norte del país especialmente del municipio de Villapinzón, se establecieron las primeras curtiembres artesanales alrededor del río Tunjuelito pues resultaba más rentable trabajar el cuero cerca al río, en la zona conocida actualmente como San Benito, quedando a las afueras de la ciudad de Bogotá [3] [4].

El asentamiento de los campesinos en el barrio San Benito trajo consigo el inicio de actividades industriales del cuero, y con ello problemas ambientales y sociales, debido a los malos olores, vapores de solventes y vertimientos de los efluentes de las curtiembres al río Tunjuelito que contienen residuos del cuero y de los insumos químicos utilizados durante la producción. No fue sino hasta la década de los 90 cuando las autoridades inspeccionan formalmente estas industrias, después de que entra en vigor la ley 99 de 1993, que organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA), y la ley 142 de 1994, de servicios públicos, para el año 2006 la Corporación Autónoma Regional (CAR) define la reglamentación sobre los usos del agua en los tramos y afluente del río Bogotá y en el 2009 son establecidos los tipos y cantidades de vertimientos a la red de alcantarillado público por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), aumentando la preocupación por el cumplimiento legal de parte de estas industrias a la par que aumentan también los niveles de producción y contaminación producidos por las mismas [4] .

De esta manera San Benito se convirtió en un punto crítico ambiental ya que generaba problemas de salud, de contaminación al suelo, a la vegetación y sobre todo a los cuerpos hídricos cercanos a esta zona.

El barrio se encuentra ubicado en el extremo sur-occidental de la Localidad de Tunjuelito y está limitado por el sur con el barrio Tunjuelito; hacia el oriente con el barrio San Carlos, por el occidente con la localidad de Ciudad Bolívar, sirviendo como límite el Río Tunjuelito; y hacia el Norte con el Parque Metropolitano el Tunal, por otra parte el barrio San Benito se caracteriza por estar ubicado en una zona quebrada conformada por tres zonas geotécnicas: Una zona de inundación baja; una zona de arcillas y limos [5]. (Ver figura 1).

Figura 1. Ubicación geográfica de San Benito (Bogotá D.C.).



Fuente: Ana Mercedes Garzón

Los vertimientos de las industrias curtidoras del sector de San Benito, tienen elevadas concentraciones de materia orgánica [6]. Sin embargo en el proceso de teñido de cuero en bombo se utilizan colorantes de fórmula química estructural derivada de las anilinas o azocompuestos que por ser “sustancias intensamente coloreadas por el enlace azo $-N=N-$ produce la conjugación de los anillos aromáticos los cuales son no biodegradables [7].

En el sector de San Benito localidad de Tunjuelito se encuentran registradas aproximadamente 265 curtiembres, las representan más del 50% de las industrias curtidoras del país [6]. Tradicionalmente, los desechos de esas fábricas van a parar al río Tunjuelito, que, según datos de la Secretaría de Salud, produce el 30 por ciento de la contaminación del río Bogotá [6].

En el sector de San Benito se producen aproximadamente **775,593 pieles al año** [8], con una generación aproximada de residuos sólidos de 1,157 ton/mes [8] como resultado del procesamiento de 70 pieles/mes [8], 98 toneladas de sal/mes [8], 210 toneladas de sebo/mes [8], 133 toneladas de residuos del proceso de pelambre/mes [8], 66 toneladas/mes de unche, [8] , 111 toneladas de recorte/mes [8] y 105 toneladas de lodos PTAR/mes [8].

Además de lo mencionado anteriormente para la producción de una sola piel se utilizan entre 400 Litros [8] a 1200 Litros de agua por piel [8] según el proceso utilizado, y la contaminación hídrica por DBO está dada en un 80% por el proceso de ribera [8] , 10% en remojo [8], 10% en encalado y desencalado [8], además también se contamina por salinidad, amoníaco, colorantes sintéticos de fórmula química estructural derivada de anilinas o azocompuestos entre otros.

Figura 2. Predios dedicados a curtiembres en el área de influencia del río Tunjuelito en el barrio San Benito (Bogotá D.C.).



Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente (2007)

El barrio cuenta con un área bruta de 46.96 hectáreas, de éstas 37.77 hectáreas se encuentran ocupada por viviendas y 8.99 hectáreas corresponde a área libre [3]. En cuanto a la red hídrica está compuesta por el río Tunjuelito y la Quebrada Chiguaza, la cual desemboca en el río a la altura de la Carrera 17, el cual sirve de límite entre el barrio y la localidad de Ciudad Bolívar (Barrio Meissen) [5].

4.2 MARCO TEÓRICO

El proceso de teñido en bombo es una operación cuyo objetivo es proporcionar al cuero un color determinado, esta aplicación de tintura a la piel se hace por inmersión de la misma en un bombo en movimiento, permitiendo penetración total de la tintura dentro de las fibras. El teñido se realiza en baño que contiene agua, colorantes que se selecciona dependiendo de la clase del curtido (natural, artificial o sintético) y ácido fórmico, el agua que se utiliza en el baño se desecha después de cada operación.

Los bombos empleados son altos y estrechos para favorecer la penetración y rápida distribución del colorante tienen pH ácido, entre 3 y 4; en este rango de pH los colorantes son muy solubles y los floculantes prácticamente no alcanzan a precipitarlos. Otras industrias utilizan agentes oxidantes para reducir el color pero la estabilidad del anillo bencénico limita la eficiencia de éstos.

En el proceso de teñido de cuero en bombo se utiliza exceso del colorante de naturaleza aromática, donde la estabilidad del anillo bencénico impide su degradación, además su elevada solubilidad en medio ácido evita su floculación, obstaculizando el tratamiento de las aguas residuales para la eliminación del color [9].

Aproximadamente la tercera parte del colorante adicionado no reacciona con el colágeno del cuero (determinado por pre-experimentación), que absorbe las otras dos terceras partes. Esto produce elevados contenidos de materia orgánica en las aguas residuales que son vertidas al Río Tunjuelito, que es uno de los principales afluentes del Río Bogotá [6].

El Centro Nacional de Producción más Limpia [2] en su Diagnóstico Ambiental del sector Curtiembre en Colombia presenta los resultados de un amplio estudio acerca del elevado impacto ambiental producido por las industrias curtidoras en Colombia, ya que los efluentes industriales provenientes de curtiembres son uno de los más complejos, en su tratamiento debido a la composición y origen de los contaminantes.

En el 2001, la Encuesta Anual Manufacturera reportó que la producción de manufacturas de cuero se concentra en Bogotá con un 63.8% [10] de la

producción total del país. Sin embargo por esta demanda del cuero, se considera que igualmente se requieren materiales e insumos para la transformación de la piel de cualquier animal a cuero flexible, suave y resistente de fácil comercialización. De acuerdo a lo anterior es posible mencionar que uno de los insumos que se requieren en grandes volúmenes por unidad de piel en dicho proceso es el agua, por tanto es la que más se ve alterada en sus condiciones iniciales ya que se estima que un 15% del peso total de la piel se descarga en las aguas residuales en forma de grasas, pelo y fibras [11]. Por tanto si se vierte sin previo tratamiento la contaminación del agua es mayor.

La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca y la Secretaría Distrital de Ambiente han realizado jornadas de capacitación sobre tecnologías más limpias para el sector, y han planeado programas para la implementación de un parque industrial con el tratamiento de efluentes; sin embargo, aún no hay resultados sobre estos planes. Aunque algunas curtiembres tienen licencia ambiental, sus plantas de tratamiento de aguas residuales son utilizadas solamente cuando las entidades ambientales realizan auditorías en el sector, lo que muestra su enfoque en la producción, dejando de lado el respeto por el medio ambiente [6].

Por otra parte los análisis de la información de las encuestas realizadas en el sector San Benito por Ana Mercedes Garzón [3] , muestran que de los estándares ambientales de cumplimiento normativo que ha fijado la Secretaria Distrital de ambiente solo se realiza medición de pH y cromo si se utiliza la técnica de curtido al cromo, ya que para DBO, DQO, aceites y grasas, sulfuros y temperatura la mayoría de las curtiembres encuestadas en el estudio no manejan el tema, esto muestra falta de seguimiento de los vertimientos y desconocimiento de la norma lo cual causa cierre de si no se cumple con lo exigido legalmente (resolución 3957 de 2009) para verter a la red alcantarillado.

Por lo mencionado anteriormente La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y el Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC) [12], plantean diversas alternativas de tecnologías limpias aplicables a cada una de las etapas de los procesos en la producción de cuero.

De acuerdo lo anterior una de las tecnologías limpias que se ha implementado en el tratamiento de aguas residuales es la electrocoagulación, esta es un tipo de

tecnología emergente conocida desde principios del siglo XX, que aun se sigue investigando sobre sus procesos y mecanismos [13].

La electrocoagulación es una técnica de la electroquímica que se basa en la interacción de los procesos químicos y eléctricos mediante reacciones de óxido-reducción; este proceso es empleado en el tratamiento de aguas residuales y potables, ya que al inducir corriente eléctrica mediante un arreglo monopolar (emitir energía eléctrica en un punto de contacto) a placas metálicas o electrodos con materiales que generan una serie de reacciones químicas. Estas involucran generación "in situ" de coagulantes, y así mismo aproximan las moléculas contaminantes que se encuentran suspendidas, disueltas y emulsificadas, a su estado más estable donde se rompen las coloides y se forman flóculos. Cuando esto ocurre se generan dos tipos de lodos que pueden ser removidos por métodos físicos, los cuales son: 1) lodos de flotación debido a la acción de gases de oxígeno en el ánodo y de hidrogeno en el cátodo y 2) lodos de sedimentación que se alcanzan a precipitar debido a los iones metálicos del ánodo que se disuelven en agua [14] [15] [16].

Las placas metálicas o electrodos que se utilizan habitualmente en el proceso de electrocoagulación son: aluminio, hierro, grafito, cobre, plata y acero [34] [22] [15] [17] [18]. Sin embargo los electrodos utilizados con frecuencia son los de hierro y aluminio debido al precio, y a la resistencia química con buenas propiedades electroquímicas, que permiten obtener elevados rendimientos [19].

De acuerdo lo anterior la corriente que usualmente se utiliza para el proceso de electrocoagulación es la corriente directa (CD) ó continua (DC) de voltaje bajo y fijo dado que el campo electrico que se genera debe ser constante. La corriente aplicada en los electrodos generan reacciones quimicas que dan lugar a la formación de hidroxidos, los cuales se generan del desprendimiento de iones metalicos del ánodo de sacrificio y los iones hidroxilos que se forman en el cátodo. La cantidad de metal disuelto del electrodo de sacrificio (ánodo) depende de la cantidad de electricidad que pasa a través de la solución electrolitica [16] [20] [18].

Para tratar el agua residual utilizando el proceso de electrocoagulación es necesario tener en cuenta los factores que determinan y controlan las reacciones

que ocurren en el proceso. Entre los más importantes la conductividad y el pH. ya que son estos el punto de partida en la eficiencia del tratamiento [21] [18].

Conductividad: La conductividad en un medio acuoso depende de la cantidad de conductores iónicos disueltos en el medio, para el agua residual estos consisten principalmente en los iones metálicos que son aportados por las sales disueltas en el agua; en condiciones con bajos contenidos de sales se presentan bajas conductividades que se traducen en una alta resistencia eléctrica del medio (la resistencia eléctrica es el inverso de la conductividad) lo que conlleva alta disipación de la energía eléctrica aplicada durante el proceso en calor, esto genera dos consecuencias: 1) por un lado el aumento de temperatura afecta el tamaño de las burbujas de gas de oxígeno en el ánodo y de hidrógeno en el cátodo reduciendo su tamaño y afectando negativamente el proceso y; 2), por otro lado se disminuye la fracción de la energía aplicada que efectivamente contribuye al proceso de electrocuagulación haciéndose necesario aumentar la cantidad de corriente aplicada para mantener la eficiencia del proceso de electrocuagulación. Por lo anterior es recomendable que si la conductividad del agua residual a tratar tiene valores bajos sean agregadas sales al agua, obteniendo de esta manera 1) menores pérdidas de energía disipada en calor y por ende menor consumo de energía eléctrica 2) menor afectación de la temperatura sobre el tamaño de las burbujas de gas, bajo condiciones de voltaje constante), el incremento en la conductividad conlleva a un incremento en la densidad de corriente para el mismo voltaje [18] [22] [19] [23].

Según las recomendaciones obtenidas por estudios realizados se requiere un valor mínimo en la conductividad 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para favorecer la conducción de electricidad [23] [24].

pH: De acuerdo Holt-Barton-Mitchell [25] y Orozco-Castro [15] el pH inicial de la solución influyen en la formación de las especies químicas que favorecen el proceso de floculación y que se generan a partir de la hidrólisis con los iones metálicos, y las especies más eficientes como coagulantes se van a formar en pH tendientes al neutro (6.5-7.5), para ánodos de hierro y aluminio de acuerdo a Bayramoglu-Kobya-Taner-Sozbir [26] estas corresponden respectivamente a: 1) $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})^{+2}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})_2^{+1}$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2^{+4}$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_4^{+2}$ y 2) $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3$, $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{+4}$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{+3}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{+4}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{+4}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{+7}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{+5}$.

Consecutivamente la electrocoagulación es un proceso que envuelve varios mecanismos químicos y fenómenos físicos, que emplea electrodos consumibles para suplir iones en el agua residual y que ha sido utilizada para tratar eficientemente aguas residuales en industrias de alimentos, industria textil, urbanas, con contenidos de surfactantes, metales pesados, tintes, aceites, desechos poliméricos, partículas suspendidas, suspensiones acuosas de partículas ultrafinas, nitrato, fenoles, entre otros, siendo este un método electroquímico de tratamiento de aguas contaminadas donde un electrodo de sacrificio se corroe, es decir se le denomina electrodo de sacrificio al que más se desgasta, y este hace que sea más óptima la coagulación [27].

El proceso de electrocoagulación involucra tres etapas sucesivas:

- 1) Formación de los coagulantes por oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio [19].
- 2) Desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y rompimiento de las partículas coloidales [19].
- 3) Agregación de las fases desestabilizadas para formar flóculos [19].

El mecanismo de desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y del rompimiento de partículas coloidales se describe a continuación [19]:

- Compresión de la doble capa difusiva alrededor de las especies cargadas (iones de los azocompuestos del colorante, en este caso como son colorantes ácidos pueden ser iones diazonio ($R-N_2^+X^-$), o nitratos (NO_3^-) entre otros) por la interacción de los iones generados en la oxidación del ánodo de sacrificio [28] [7].
- 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, el cual reacciona estabilizando las cargas, se utiliza habitualmente hierro o aluminio. 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 [19].

- Los flóculos 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 [19].

Las siguientes reacciones fisicoquímicas tienen lugar en una celda de electrocoagulación [19]:

- Reducción catódica de las impurezas presentes en el agua residual.

- Coagulación de las partículas coloidales. Teniendo en cuenta que las partículas coloidales son virtualmente estables en soluciones acuosas, debido a las repulsiones electroestáticas entre ellas, es importante desestabilizarlas y esto se logra cuando el potencial es cercano a 0 mV (cero), con la adición de los iones metálicos, los cuales tienen un efecto sobre las propiedades de la doble capa eléctrica, el cual reduce la energía de repulsión mediante la floculación de las partículas, por lo tanto estas pueden aglomerarse [29] [30] .

- Migración electroforética de iones en solución. Toda partícula coloidal está eléctricamente cargada, la carga varía su magnitud de acuerdo a la naturaleza del material coloidal y puede ser positiva o negativa. La estabilidad de los coloides depende de su carga eléctrica. Los de igual signo se repelen y no dejan formar aglomerados de muchas partículas. Cuando una partícula coloidal es ubicada en un campo eléctrico migra hacia el polo de carga opuesta. Este fenómeno se conoce como Electroforesis y se usa para determinar la naturaleza de la carga de las partículas coloidales [28].

.Electroflotación: Se aprovecha la formación de gas para arrastrar hacia la superficie parte de los contaminantes (grasas y materia orgánica). Debido a las reacciones producidas del rompimiento de la molécula del agua (H_2O) la cual da lugar a 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 [31] [14].

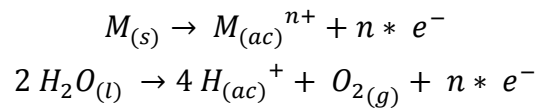
- Reducción de los iones metálicos en el cátodo. Los cationes metálicos se producen en los electrodos a través de la electrólisis y estos cationes forman

diversos hidróxidos en el agua en función del pH del agua. Los electrodos más utilizados son los de Hierro y Aluminio [18] [30].

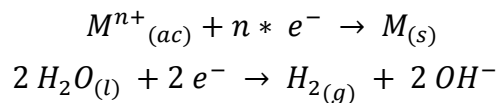
- Otros procesos químicos y electroquímicos.

Cuando un potencial es aplicado al agua por una fuente externa de energía, en el ánodo se lleva a cabo una oxidación mientras que en el cátodo se lleva a cabo una reducción. La reacción electroquímica con el metal (M) como ánodo se puede resumir como se muestra a continuación [32].

En el ánodo:

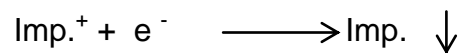


En el cátodo:



1. Cátodo

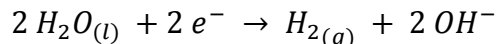
- Iones (+) de impurezas reciben electrones en el cátodo que es el electrodo que no se transforma:



Se precipitan las impurezas

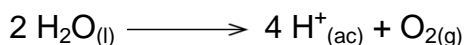
- En el cátodo también se realiza la siguiente reacción debida a la hidrólisis o electrolisis del agua en una reacción paralela produciendo pequeñas burbujas de oxígeno en el ánodo y de hidrógeno en el cátodo. Estas burbujas son atraídas por las partículas floculadas y posteriormente arrastran el flóculo hasta la superficie, y es por esto que el proceso de electrocoagulación está asociado de manera intrínseca a la electroflotación.

Reacción en el cátodo:

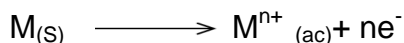


Esta reacción participa también en la descontaminación del agua debido a los gases de hidrogeno ($H_{2(g)}$) que disminuyen la densidad de algunos contaminantes como grasas y parte de la materia orgánica no disuelta, dejando una capa en la superficie, la cual puede ser retirada por medios mecánicos.

En el ánodo también sucede la siguiente reacción, la generación de $O_{2(g)}$ por medio de la siguiente fórmula:



2. **Ánodo:** es el electrodo de sacrificio que se oxida y libera electrones (e^-). 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 (movimiento de partículas dispersas en un fluido causado por la influencia de un campo eléctrico).



Es el electrodo de sacrificio por que se disuelve el metal (M) para producir los iones positivos M^{n+} que reemplazan los iones positivos aportados por los floculantes, siendo este el mismo mecanismo de un coagulante.

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. 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 corrosión del electrodo. Estos son removidos posteriormente por electroflotación, sedimentación y/o 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 [33]. Para un volumen fijo de gas formado, mientras mayor el número de burbujas formadas a partir de ese volumen, mayor área superficial es ofrecida para tal fenómeno.

Es importante diseñar una celda de electrocoagulación para alcanzar la máxima eficiencia posible, por lo tanto se deben considerar los siguientes factores:

- Se debe minimizar el sobrepotencial entre electrodos causado por la resistencia de la solución y la acumulación de burbujas en la superficie de los electrodos [22] [15] [19].

- Se debe maximizar la transferencia de masa entre electrodos [33].

El transporte de masa como grasas y material orgánico se puede incrementar aumentando la turbulencia de la solución en el reactor. Las burbujas gaseosas de oxígeno e hidrógeno que se forman alrededor de los electrodos son de forma esférica y a medida que se acumulan en la superficie de los electrodos se incrementa la resistencia eléctrica de la celda y como resultado de esto se requiere mayor cantidad de energía para lograr la eficiencia de remoción óptima; para minimizar esta acumulación de las burbujas se pueden emplear vibraciones [32] [33].

Para un reactor de electrocoagulación el mejoramiento del desempeño se logra usando electrodos monopolares conectados tanto en paralelo como en serie [18]. El arreglo en paralelo esencialmente consiste de un par de placas de metal ubicadas en medio de dos electrodos paralelos y una fuente de energía de corriente directa [18].

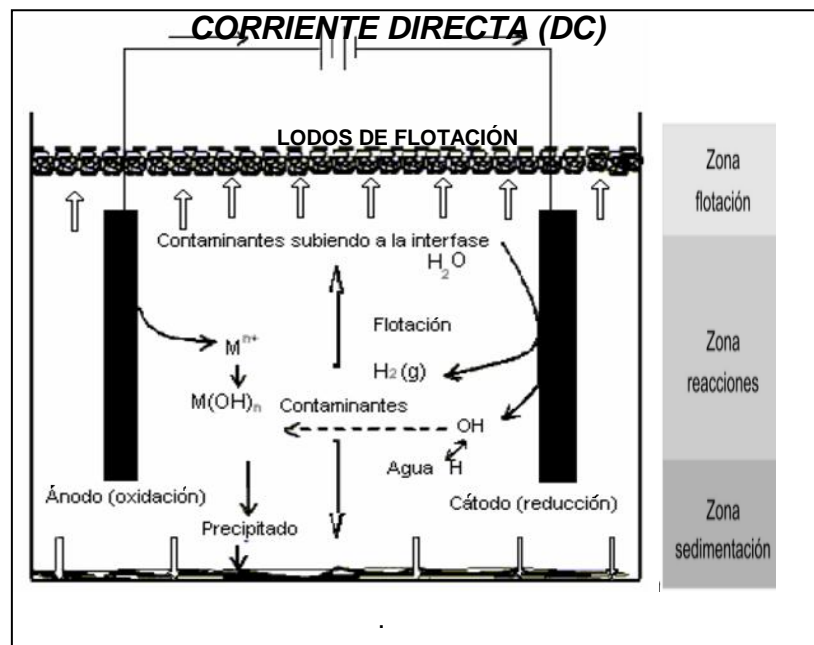
En un arreglo monopolar los pares de electrodos de sacrificio están internamente conectados entre sí, y no tienen interconexión con los electrodos externos [18]. Este arreglo de electrodos monopolares con celdas en serie es eléctricamente similar a una celda con múltiples electrodos e interconexiones [18]. El montaje experimental requiere además de una caja de resistencias para regular el flujo de corriente y un multímetro para leer los valores de corriente [18]. Las placas de metal se conocen comúnmente como electrodos (el electrodo de sacrificio ánodo y el cátodo pueden ser de materiales diferentes).

Se debe tener en cuenta que una diferencia de potencial mayor se requiere para un mismo flujo de corriente cuando se realiza el arreglo en serie, porque las celdas conectadas en serie tienen una mayor resistencia mientras que en un arreglo en

paralelo la corriente eléctrica se divide entre los electrodos de manera proporcional a la resistencia de la celda individual [18].

Para mejorar el desempeño de la electrocoagulación se recomienda intercambiar la polaridad de los electrodos de manera intermitente [18] [26], ya que esta también es una manera de limpiar los electrodos, y así mejorar su desempeño.

Figura 3: Diagrama esquemático del proceso de una celda de electrocoagulación de dos electrodos.



Fuente: Elaboración propia, adaptado de Mollah

La figura N° 1, corresponde a un diagrama descriptivo de los procesos dentro de una celda con dos electrodos la cual incluye tres zonas de ocurrencia de diferentes procesos las cuales son descritas a continuación:

- Zona de flotación: Es donde se depositan los lodos de flotación o lodos menos densos y las espumas [13].
- Zona de reacciones: Es donde ocurre la reacción electroquímica ya que allí es donde se encuentran localizados los electrodos [13]

- Zona de sedimentación: Es dónde se depositan los lodos de precipitación o lodos más densos [13]

La electrocoagulación es una técnica eficiente cuya relación costo efectividad es buena. Además como no se requiere de productos químicos en este proceso entonces no se produce contaminación secundaria. Con esta técnica se pueden remover partículas coloidales pequeñas de manera eficiente en comparación con las técnicas químicas convencionales, ya que las pequeñas partículas cargadas tienen mayor probabilidad de ser coaguladas por el campo eléctrico que las mantiene en movimiento [19] [21] [33].

Según Iván Martínez [34] y Álvaro Ruiz- Luis Fernando Garcés [32] las ventajas y desventajas del proceso de electrocoagulación son:

Ventajas:

- Las burbujas producidas durante la electrocoagulación tienen mayor estabilidad que las generadas en los tratamientos de efluentes con flotación de aire comprimido y de flujo de aire disuelto, por lo que conservan su gran superficie de contacto y por tanto, aumenta la eficiencia de la remoción.
- Éste tratamiento electroquímico provoca una mejor y rápida ruptura de las emulsiones.
- La cantidad de lodos generados son menores que para otros métodos tradicionales, ya que se efectúa de manera simultánea flotación y coagulación.
- Permite la reducción de una amplia variedad de contaminantes, como: metales pesados, grasas y aceites, materia orgánica, fosfatos y cianuros.
- Sus costos de operación son relativamente bajos si se realiza un apropiado diseño del reactor, selección de los materiales para electrodos, y una optimización de los parámetros de funcionamiento. Éste proceso requiere poca corriente eléctrica y bajos costos de mantenimiento.

- El material separado por electrocoagulación puede ser reprocesado como subproducto lo cual permite que el efluente tratado pueda ser reutilizado.
- Los equipos para electrocoagulación son compactos y fáciles de instalar, factores que son muy apreciables cuando no se dispone de espacio suficiente.

Desventajas:

- Reemplazo del electrodo de sacrificio, ya que este es el que más se desgasta.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
- Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto.
- Formación de una película de óxido impermeable formado en el cátodo puede, interferir en el buen desempeño del proceso, ya que impide el paso de la corriente eléctrica, sin embargo este efecto se puede disminuir cambiando la polaridad de los electrodos, para retirar esta película.

A continuación se muestran los antecedentes de resultados obtenidos utilizando el proceso de electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales:

- La industria láctea construyó una celda para un volumen de agua de dos litros, donde buscaban mediante este tipo de tratamiento (Electrocoagulación) tratar las aguas residuales del mismo, durante la caracterización de los parámetros a evaluar (conductividad, DQO, pH, Grasas y aceites) los mejores resultados se obtuvieron con seis electrodos: tres de hierro y tres de aluminio, dispuestos en forma alternada y conexión en paralelo separados a una distancia de 10mm, el ánodo electrodo de sacrificio con mejores resultados fue el de hierro, la fuente de energía a utilizar fue de 25 A y voltaje de 16 V y áreas de los electrodos de 925 cm² [17].

- Aristizábal y Bermúdez [19], en su estudio encontraron que los valores de óptimos para tratar un volumen de dos litros (2L) de agua residual el agua residual de lavandería industrial con fines de reuso minimizar la conductividad y la turbiedad fueron: 6 electrodos 3 de aluminio como ánodo y 3 de acero inoxidable como cátodo, distancia entre placas de 0.7, voltaje de 20V y tiempo de retención de 10 minutos.
- Orozco y Castro [15] es su estudio realizaron diferentes ensayos con electrodos de grafito como cátodo y aluminio, hierro y cobre como ánodo, donde obtuvieron disminuir un 98% el color de aguas residuales del proceso de tinturado de una curtiembre para tinta negra y roja en 10 minutos de reacción y ajustando el pH a 7, utilizando el grafito como cátodo y aluminio como ánodo. Donde se utilizaron electrodos de hierro y cobre como ánodo se disminuyó el porcentaje de remoción sin embargo evidenciaron turbidez e incremento de la absorbancia por la formación de iones metálicos, por otro lado evidenciaron que al utilizar el aluminio como ánodo se aumentó el porcentaje de remoción mas no aumento la turbidez debido a que el ión Al^{3+} es transparente.
- Los estudiantes de la universidad de Villa María de Argentina, encontraron resultados favorables para el tratamiento de los efluentes industriales de las curtimbres al utilizar métodos electroquímicos. El cual incluye el estudio de la electrocoagulación donde se obtuvieron resultados favorables en separación de cromo³⁺ del (79.67%) y degradación de DQO del (95%) [16] .

4.3 GLOSARIO

- **Agua residual:** Agua obtenida como resultado de actividades industriales, agrícolas forestales, mineras, pecuarias, de comercio, servicios y procesos de urbanización, entre otras, que porta diversas sustancias o materiales indeseables, dependiendo del tipo de proceso, como compuestos orgánicos e inorgánicos, microorganismos y trazas de algunos metales que le dan una composición diferente a la de su estado natural [35].
- **Amperaje:** Se define como la cantidad de corriente o flujo de electrones que fluyen por un conductor en una unidad de tiempo. Su unidad de medida son los Amperios (A), y se calculada dividiendo el voltaje entre la potencia en vatios [36].
- **Anión:** Es un ion (sea átomo o molécula) con carga eléctrica negativa; con exceso de electrones. Los aniones se describen con un estado de oxidación negativo [37].
- **Ánodo:** Electrodo en el que se llevan a cabo oxidaciones [37].
- **Catión:** Ion (sea átomo o molécula) con carga eléctrica positiva; con defecto de electrones. Los cationes se describen con un estado de oxidación positivo [37].
- **Cátodo:** Electrodo en el que tiene lugar la reducción, en una celda electroquímica [37].
- **Conductímetro:** Es un instrumento electrónico de medición que permite establecer las concentraciones iónicas totales en soluciones acuosas, estos equipos normalmente se componen de una sonda y un indicador y/o transmisor [38].
- **Conductividad Eléctrica en solución acuosa:** Es la medida de una solución acuosa para conducir corriente eléctrica, esta habilidad depende de la materia ionizable total presente en el agua. La cual proviene de una base, un ácido o una sal, disociadas en iones.
- **Corriente continua (CC) O Directa (DC):** Es aquella cuyas cargas eléctricas o electrones fluyen siempre en el mismo sentido en un circuito eléctrico cerrado, moviéndose del polo negativo hacia el polo positivo de una fuente de fuerza electromotriz (FEM) tal como ocurre en las baterías, las dinamos o en cualquier otra fuente generadora de ese tipo de corriente eléctrica [39].
- **Curtido:** Se denomina curtido al proceso por el cual se transforma la piel en un material que se conserva a través del tiempo y posee características de flexibilidad, resistencia y belleza que le da gran valor comercial y estético [40].

- **Electrodo:** Conductor que emite o recoge electrones en una pila, válvula termoiónica, dispositivo semiconductor, etc. El ánodo es el electrodo positivo y el cátodo es el electrodo negativo [41] .
- **Electrolito:** Líquido que conduce la electricidad como resultado de la presencia de iones positivos y negativos [41].
- **Electrolisis:** Es el proceso que separa los elementos de un compuesto por medio de la electricidad. En ella ocurre la captura de electrones por los cationes en el cátodo (una reducción) y la liberación de electrones por los aniones en el ánodo (una oxidación) [42].
- **Emulsión:** La emulsión es un sistema de dos fases que consta de dos líquidos parcialmente miscibles, uno de los cuales es dispersado en el otro en forma de glóbulos [43] .
- **Impacto ambiental:** Se dice que hay impacto ambiental, cuando una acción o actividad produce una alteración, modificación o alguno de sus componentes. El impacto puede ser negativo o positivo [44]
- **pH** = $-\log [H^+]$. Menos el logaritmo de base 10 de la concentración molar de iones hidrógeno o hidronio. Indica la concentración de hidrogeniones o de iones hidroxilo en una solución acuosa. Puede tener valores de 0 a 14. Un pH de 7 corresponde a la neutralidad, la acidez a un pH menor de 7 y la alcalinidad a un pH mayor de 7 [37].
- **Potencia eléctrica:** es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado. La unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el vatio (watt) [45]
- **Turbiedad:** Es el parámetro que mide qué tanto es absorbida o dispersada la luz por la materia suspendida (sedimentable y coloidal) del agua [46].
- **Unche:** Residuo de descarte.
- **Vertimiento:** Según la Resolución 1514 de 2012 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible se considera vertimiento como la descarga final a un cuerpo de agua, a un alcantarillado o al suelo, de elementos, sustancias o compuestos contenidos en un medio líquido [47].
- **Voltaje:** Es una magnitud física, con la cual se mide la diferencia de potencial eléctrico o la tensión eléctrica entre dos puntos [48] .

4.4 MARCO INSTITUCIONAL

Para la realización de este proyecto se tuvo en cuenta las instituciones directamente relacionadas con el proyecto de descontaminación de aguas residuales en la industria curtidora como la autoridad local y ambiental, que son los entes que tienen que proteger la salud humana y asegurar un trato responsable con el medio ambiente, y el sector industrial de curtiembres en San Benito (Bogotá), ya que estos sectores son responsables de la problemática ambiental, pues están afectando la flora, la fauna, las fuentes hídricas y directa o indirectamente a la población del sector sin retribución alguna.

Las industrias de producción de cuero en San Benito están representadas por dos asociaciones principales las cuales protegen los deberes y derechos del sector de producción de cuero en la zona, estos son, Cooperativa de Curtidores Coopicur Ltda. Y la Corporación Ecológica de San Benito COESA [2]. Estos son los principales actores y son los más beneficiados ya que con la implementación de tecnologías limpias como la electrocoagulación, pueden llegar a encontrar nuevas formas de ahorro de los recursos reduciendo los costos de producción y generando un trato amable con el medio ambiente. La implementación de nuevas formas de descontaminar el agua a precios más cómodos y generando igual o mayor eficiencia en la remoción de contaminantes en el agua residual produce el cumplimiento de la normativa ambiental generada para el sector y esto a su vez previene sellamientos sanciones y comparendos, que traen implícitos una pérdida tanto económica como social por la generación de un porcentaje mayor de desempleo.

Dentro de las autoridades beneficiadas está el Ministerio de Salud (hoy Ministerio de la Protección Social) que según el Código Sanitario Nacional fue creado bajo la Ley 9 de 1979 y le asignó la responsabilidad de reglamentar las características permitidas de vertimientos, así como la vigilancia y reglamentación del manejo, transporte y disposición final de los residuos sólidos, pero hace la claridad, que para aquellos que presenten características especiales, la responsabilidad desde la generación hasta la disposición final es del generador .

También se encuentra el Departamento Administrativo de Medio Ambiente que mediante el Acuerdo 257 de 2006 se transformó en la Secretaría Distrital de Ambiente – SDA y bajo la Ley 99 de 1993 asumió las competencias de una Corporación Autónoma Regional para el Distrito Capital, asumiendo como misión la de autoridad promotora del desarrollo sostenible y el ambiente sano en el

Distrito Capital para elevar la calidad de vida de sus habitantes [49]. Esta tiene como objetivo realizar el control de vertimientos y emisiones contaminantes, disposición de desechos sólidos y desechos o residuos peligrosos y de residuos tóxicos, dictar las medidas de corrección o mitigación de daños ambientales y complementar la acción de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAAB, para desarrollar proyectos de saneamiento y descontaminación, en coordinación con la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos [49].

Y por último el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias – FOPAE que es una entidad perteneciente al Sector Gobierno, Seguridad y Convivencia, cuya misión es gestionar y realizar con las entidades competentes del sector las acciones en materia de conocimiento, prevención, mitigación y recuperación en riesgos públicos de origen natural y antrópico no intencional y la coordinación para la atención de emergencias en la ciudad de Bogotá, así como velar por su cumplimiento como ente coordinador y dinamizador del Sistema Distrital de Prevención y Atención de Emergencias (SDPAE), a fin de minimizar los efectos negativos de éstos sobre la población, sus bienes, la infraestructura, el medio ambiente y la actividad económica de la ciudad, lo cual contribuye a mejorar de manera equitativa la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras [49].

Las anteriores autoridades tienen la obligación de velar por el cumplimiento de la normatividad distrital y son los responsables de supervisar y vigilar el sector de la producción de cuero en San Benito como la obligación de velar por un ambiente sano, lo que traduce en el compromiso de mejorar la salud de la población. En estos objetivos está el beneficio pues ahorrarían esfuerzos en procesos jurídicos, económicos, sociales, ambientales y esos esfuerzos lo usarían en sectores más críticos y a su vez ayuda a la sociedad por cumplir con el compromiso de mantener un ambiente sano, una economía estable y un beneficio a la población por generación de empleo.

4.5 MARCO LEGAL

4.5.1 De la constitución política que da sustento a todas las leyes que versan sobre la materia.

La Constitución Política de Colombia en sus artículos 79 y 80 establece que es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación ambiental para garantizar el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución; debiendo prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados [50].

4.5.2 De la legislación de vertimientos a nivel nacional.

El decreto vigente a nivel nacional en cuanto a vertimientos es el decreto 3930 de 2010, sin embargo de acuerdo al artículo 76 del mismo, se estableció un régimen de transición en el que permanecen vigentes los principales artículo del decreto 1594 de 1984 por el cual se dictan medias para el uso del agua y residuos líquidos; a su vez el decreto 1594 de 1984 se sustenta bajo los siguientes preceptos: 1) La ley 9 de 1979 por la cual se dictan medidas sanitarias para el territorio nacional es reglamentada parcialmente en su título I por el decreto 1594 de 1984. 2) El decreto ley 2811 de 1974 por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente es reglamentado parcialmente en el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I por el decreto 1594 de 1984. 3) El decreto 3930 de 2010 establece en su artículo 76 establece un régimen de transición donde expresamente los parámetros de vertimientos descritos en el decreto 1594 de 1984 se mantienen hasta que sean expedida las regulaciones correspondientes por parte del Ministerio de Ambiente, situación que a la fecha de este documento de proyecto de grado no ha sucedido [50] [51].

4.5.3 De la legislación de vertimientos a nivel distrital.

La ley 99 de 1993 [52] establece en su artículos 65 y 66 que es función del Distrito Capital de Santafé de Bogotá ejercer las mismas funciones de las Corporaciones Autónomas Regionales y además dictar las medidas de corrección o mitigación de daños ambientales, esto sumado a la autonomía para los distritos que establece la constitución política en sus artículos 286, 287 y 298, permiten darle plena validez a la Resolución 3957 de 2009 de la Secretaría Distrital De Ambiente [47] que

establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital y que se encuentra vigente.

4.5.4 De la exigencia legal a las personas jurídicas y naturales que desarrollan los procesos de curtido del cuero.

Toda vez que el proceso de curtido del cuero genere grandes cantidades de vertimientos de aguas residuales no domésticas a la red de alcantarillado, las personas naturales o jurídicas que desarrollan estos procesos son considerados bajo la legislación actual como generadores de vertimientos estando obligados a cumplir la legislación distrital Resolución 3957/2009 y la legislación nacional Decreto 3930 de 2010 bajo los siguientes preceptos: 1) Todo usuario que genere vertimiento de aguas residuales, exceptuando los vertimientos de agua residual domestica realizados al sistema de alcantarillado público está obligado a solicitar el registro de sus vertimientos (Art. 5, Res. 3957/2009) y todo usuario objeto de dicho registro debe cumplir con los valores de referencia establecidos para los vertimientos a la red de alcantarillado (Art. 8, Res. 3957/2009) [47] . 2) El acuerdo distrital 332 de 2008 establece que los Usuarios del recurso hídrico del servicio público de alcantarillado que generen vertimientos líquidos de interés ambiental y sanitario o ambos, que excedan las concentraciones máximas establecidas por las autoridades ambientales y sanitarias, deberán efectuar, ante la SDA (Secretaria Distrital de Ambiente), la autodeclaración de los mismos.

4.5.5 De los parámetros de vertimientos que deben cumplir las personas jurídicas y naturales que desarrollan los procesos de curtido del cuero.

Los parámetros que deben ser cumplidos por los generados de vertimientos están descritos de manera expresa en la resolución distrital 3957 de 2009 en las tablas A y B del artículo 14, adicionalmente los generadores de vertimientos deben cumplir con aquellos parámetros que no están descritos en la resolución 3957 de 2009 pero si están descritos en el decreto 1594 de 1984 (que se encuentra en régimen de transición) de acuerdo a los siguientes preceptos: 1) Se permitirá el vertimiento al alcantarillado de las aguas residuales que presenten características físicas y químicas iguales o inferiores a los valores de referencias establecidos en las tablas A y B (Art. 14 Res. 3957/2009). 2) Los valores de referencia para las sustancias de interés sanitario no citadas en las tablas A y B del Art. 14 Res. 3957/2009 serán tomados de conformidad con los parámetros y valores establecidos en el Decreto 1594 de 1984 o el que lo modifique o sustituya (Art. 14 Res. 3957/2009) [47] [50] [51].

5. DESARROLLO CENTRAL

5.1 METODOLOGÍA

Esta es una propuesta enmarcada en mediciones numéricas para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de teñido de cuero en bombo por electrocoagulación en el sector de San Benito (Bogotá). Para ello, se tomaron dos (2) muestras en empresas curtidoras de dicho sector, que corresponden a dos tintas diferentes (tinta negra y tinta azul) y los análisis se realizaron a nivel de laboratorio, el cual consistió en seis (6) etapas enfocadas hacia el cumplimiento de los objetivos, las cuales se describen a continuación:

- I. La primera etapa consiste en la determinación de las propiedades fisicoquímicas del agua residual del proceso de teñido en bombo, para ello se realizó análisis de DBO₅, DQO, conductividad, turbiedad, pH, sólidos totales y sólidos disueltos de acuerdo los métodos normalizados para análisis de agua potable y residual establecidos por la APHA, AWWA y WPCF [53] (ver anexo 1, 2 y 3). Para los análisis de cromo, hierro y aluminio contenidos en el agua residual, fueron enviados a laboratorio certificado; se optó por enviar solo una muestra correspondiente a una tinta, y se eligió de acuerdo los valores iniciales de mayor contenido de sólidos suspendidos ya que se esperaba mayor remoción de los mismos. Los valores se reportaron siguiendo el esquema de la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos de agua residual del proceso de teñido bombo.

Parámetro	¹ Método	Unidades
DBO ₅	SM 5210	mgo ₂ /L
² DQO	SM5220	mgo ₂ /L
Sólidos Suspendidos	SM 2540 D	mg/L
Sólidos disueltos	SM 2540 C	mg/L
Sólidos totales	SM 2540 B	mg/L
Conductividad	SM2510	mS/cm
Turbiedad	SM2130	NTU
Ph	Papel tornasol	Unidades

¹ Los parámetros a evaluar se realizaron de acuerdo a los métodos normalizados para análisis de agua potable y residual establecidos por la APHA, AWWA y WPCF [55].

² La curva de calibración se puede observar en el anexo 1.

Aluminio (Al)	Absorción atómica con llama	mg/L
Hierro (Fe)	Absorción atómica con llama	mg/L
Cromo total (Cr)	Absorción atómica con llama	mg/L

Fuente: Elaboración propia.

II. La segunda etapa consistió en la evaluación del efecto de las variables independientes como número de placas y metal utilizado en cada electrodo: para ello se construyó el montaje experimental donde se trató el agua mediante el proceso de electrocoagulación, este montaje se construyó tomando como base el observado en la visita realizada al laboratorio de química de la universidad Central, y en la revisión bibliográfica encontrada. dicho montaje constaba de:

- Fuente de alimentación de corriente directa ó continua: Para ello se utilizó una batería de carro que entregaba 12V.
- Reactor tipo Batch: Se realizó mediante este tipo de reactor ya que no tenía flujo de entrada ni de salida [54], es decir se utilizó un volumen fijo en cada ensayo. Teniendo en cuenta que para que se genere de reacción se debe inducir corriente, para ello se utilizaron electrodos de hierro y aluminio, estos se colocaron en paralelo porque cada electrodo se conectó a la fuente de alimentación de corriente de manera independiente.

De acuerdo a lo anterior los ensayos se realizaron siguiendo el diseño experimental del proceso de electrocoagulación (ver tabla 2).

Tabla 2. Diseño experimental para el proceso de electrocoagulación.

Número de electrodos	Ánodo (+)	Cátodo (-)
2	Fe	Al
4	Fe	Al
2	Al	Fe
4	Al	Fe

Fuente: Elaboración propia.

III. En La tercera etapa se realizó determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual tratada seleccionando el mejor ensayo

obtenido en el tratamiento con electrocoagulación determinado por los menores valores de turbiedad y conductividad, una vez obtenido el mejor ensayo se realizó análisis de DBO₅, DQO, conductividad, sólidos totales y sólidos disueltos de acuerdo los métodos normalizados para análisis de agua potable y residual establecidos por la APHA, AWWA y WPCF [53]. Posteriormente se realizó una comparación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual antes y después del tratamiento, con los límites permisibles según resolución 3957 de 2009, siguiendo la tabla 3.

Tabla 3. Determinación y comparación del mejor ensayo con los límites permisibles (Resolución 3957 del 2009).

Parámetro	Método	Unidades	Valor Limite según Resolución 3957 del 2009
DBO ₅	SM 5210	mg o ₂ /L	800
DQO	SM5220	mg o ₂ /L	1500
Sólidos Suspendidos	SM 2540 D	mg/L	600
Sólidos disueltos	SM 2540 C	mg/L	no legislado
Sólidos totales	SM 2540 B	mg/L	no legislado
Conductividad	SM2510	mS/cm	no legislado
Aluminio (Al)	Absorción atómica con llama	mg/L	10
Hierro (Fe)	Absorción atómica con llama	mg/L	10
Cromo total (Cr)	Absorción atómica con llama	mg/L	1

Fuente: Elaboración propia.

- IV. Cuarta etapa se evaluó la posibilidad de reutilizar el agua tratada por electrocoagulación, tomando como punto de partida el cumplimiento con la normatividad legal ambiental (resolución 3957 del 2009). Posteriormente se calculó la tasa de agua recuperada del proceso de electrocoagulación, ya que durante el proceso parte del agua sale junto con los lodos de flotación y sedimentación, ver ecuación 1.
- Ecuación 1, cálculo de tasa de recuperación.

$$Tasa\ de\ recuperaci3n\ \% = \left(\frac{AguaRecuperada\ (L)}{AguaTratada\ (L)} \right) * 100$$

AguaRecuperada: Es la cantidad de agua que queda al final del tratamiento (L).

AguaTratada: Es la cantidad de agua residual a tratar (L).

- V. En la quinta etapa se realizaron análisis básicos de costos: Para el desarrollo de esta etapa, se halló la potencia requerida en el proceso de electrocoagulación para tratar 800 ml de agua residual del proceso de teñido de cuero (tinta negra y tinta azul), utilizando la ecuación 2, una vez obtenido el resultado de potencia se procedió a calcular el costo de la energía eléctrica en pesos Colombianos utilizado en el proceso, y se convirtió a un volumen más comercial de 1m³, obtenido mediante la ecuación 3.

Ecuación 2, cálculo de la potencia requerida por el sistema de electrocoagulación:

$$P = V * I$$

$$\text{Donde el factor } 1\ W = 1\ \frac{J}{s}$$

Se calculó la potencia (P) con base en la corriente (I) y el voltaje (V) requerido por el sistema, teniendo en cuenta el costo del KWH a nivel industrial, a continuación en base de las siguientes ecuaciones:

- Ecuación 3, cálculo de costo de energía eléctrica en pesos Colombianos consumidos en el proceso de electrocoagulación.

$$CECOPT/m^3 = \frac{\left[\frac{P_J}{s} * t_s * \left(\frac{1\ KJ}{1000\ J} \right) \right] * \left[\left(\frac{1\ KWH}{3600\ KJ} \right) * \left(\frac{COP}{1\ KWH} \right) \right]}{v_{(L)} * \left(\frac{1m^3}{1000\ L} \right)}$$

Dónde:

CECOP/m³=Costo energía en COP (Pesos Colombianos) por 1m³ de agua tratada.

P= Potencia eléctrica $\left(\frac{J}{s}\right)$.

t = tiempo de electrocoagulación (s).

v=volumen de agua electrocoagulada (L).

- VI. Como última etapa, se realizó experimentación adicional, dado que se pasó el agua electrocoagulada de tinta negra y tinta azul través materiales adsorbentes, como el carbón activado y arena sílice de manera independiente. Posteriormente se analizaron los valores de DQO y aspecto visual del agua electrocoagulada con su posterior tratamiento (ver tabla 4)

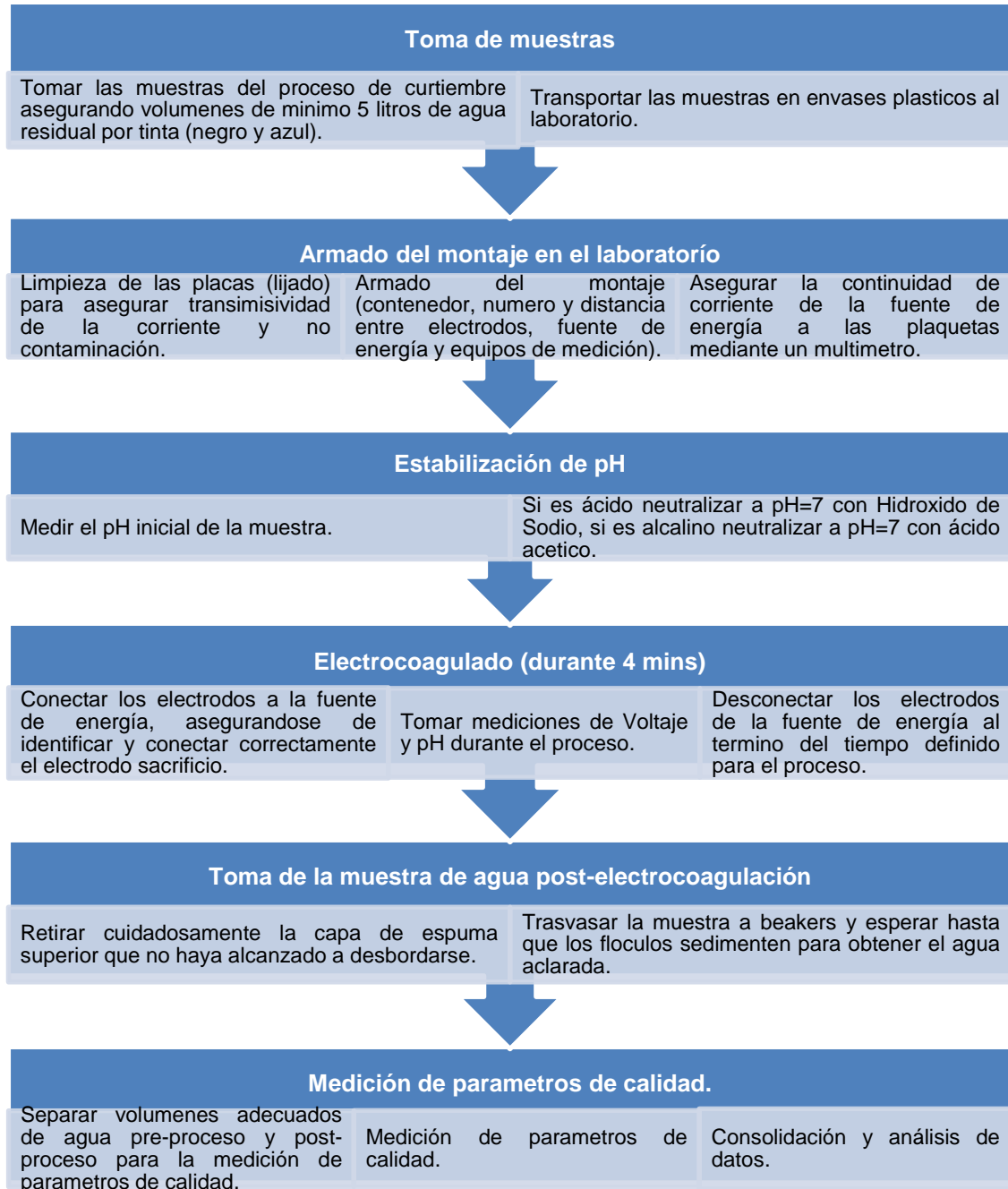
Tabla 4. Análisis adicional del agua electrocoagulada

Parámetro	UND*	Valor Limite según Resolución 3957 del 2009
DQO	mgo ₂ /L	1500
		1500

Fuente: Elaboración propia

5.2 PROCEDIMIENTO

Para la ejecución del proyecto se tuvieron en cuenta los siguientes pasos, como se muestra a continuación:



6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

De acuerdo a la literatura encontrada es muy importante neutralizar el pH para que el proceso sea eficiente, esto se comprobó electrocoagulando muestras a pH ácido (igual a 4, que corresponde al pH original de las muestras) y a pH básico (igual a 10, después subir el pH con hidróxido de sodio), ya que no se observó formación de flóculos concluyendo que a esos pH no se da el proceso de electrocoagulación. Por esta razón fue necesario realizar este proceso de neutralización de pH a la muestras previo al proceso de electrocoagulación.

6.1 RESULTADOS TINTA NEGRA

6.1.1 Determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual.

Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos de agua residual del proceso de teñido en bombo.

TINTA NEGRA							
Parámetro	Método	Unidades	Réplica 1	Réplica 2	Valor Promedio	Valor -única medición	Desviación estándar
DBO ₅	SM 5210	mg/l o ₂	315	325	320	-	7.07
³ DQO	SM5220	mg/l o ₂	3103	3100	3102	-	2.12
Sólidos Suspendidos	SM 2540 D	mg/l	-	-	-	9600	-
Sólidos disueltos	SM 2540 C	mg/l	-	-	-	10400	-
Sólidos totales	SM 2540 B	mg/l	-	-	-	20000	-
Conductividad	SM2510	mS/cm	16.2	16.2	16.2	-	0
Turbiedad	SM2130	NTU	14.5	14.5	14.5	-	0
pH	Papel tornasol	Unidades	4	4	4	-	0

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5, se puede apreciar que:

Las réplicas 1 y 2, realizadas durante el análisis de los parámetros fisicoquímicos al agua residual del proceso de teñido, fueron importantes para corroborar la

³ La curva de calibración se puede observar en el anexo 1.

veracidad de los datos ya que como podemos observar en el parámetro de DBO_5 se obtuvo una lejanía con respecto al promedio de siete punto cero siete (7.07), en cuanto a la DQO se obtuvo una lejanía del promedio de dos punto doce (2.12). Para conductividad, turbiedad y pH la desviación estándar fue cero (0) es decir indica que no hay lejanía con respecto al promedio ya que en la réplica 2 tienen el mismo valor de la réplica 1.

El valor de DBO_5 se encuentra con un valor promedio de 320 mgO_2/l siendo este un nivel bajo aun de los límites permisibles, sin embargo el valor promedio de DQO es de 3102, siendo este un valor alto, lo que indica que la materia orgánica del agua residual del procesos de teñido para tinta negra es poco biodegradable.

Se puede apreciar que los valores encontrados en sólidos suspendidos de 9600, sólidos disueltos de 10400 mg/L , sólidos totales de 20000 mg/L , del agua residual del proceso de teñido se deben a los residuos que al terminarlo quedan en el Bombo, ya que estos se van introduciendo en el agua durante los procesos del curtido.

En cuanto la conductividad de 16.2 se debe a los sólidos disueltos que esta agua residual tiene, se espera que con la electrocoagulación baje su concentración.

El agua residual del proceso de teñido sale con un pH ácido con un valor de cuatro (4) debido a los químicos que se le dosifican en el mismo proceso de teñido para que la piel absorba las anilinas.

6.1.2 Evaluación del efecto de las variables independientes como número de electrodos y metal utilizado en cada electrodo.

Para lograr la evaluación de las variables independientes se tuvo que construir un montaje experimental donde se trató el agua residual del proceso de teñido de cuero, como el montaje constaba de una alimentación de corriente continua ó directa, reactor tipo batch y arreglo paralelo de los electrodos.

El reactor se ajustó para tratar un volumen de 0.8L de agua residual del proceso de teñido por ensayo. El reactor inicialmente se construyó para tratar un volumen de 1L, sin embargo en los primeros ensayos se observó que los caimanos estaban

reaccionando y corroyéndose, esta situación hizo necesario ajustar la celda para tratar volúmenes de 0.8L, permitieran que sobresalieran las placas de la lámina de agua y que los caimanes estuviesen fuera de la reacción.

Los materiales que se utilizaron fueron: una fuente de energía con corriente continua o directa de batería de carro de 12V, (2) recipientes y cuatro (4) electrodos donde se intercambiaron de posición de ánodo y cátodo según el ensayo y de la misma manera se variaba el número de los electrodos (ver figura 8 y tabla 6).

Tabla 6. Diseño experimental.

TINTA NEGRA									
Número de electrodos	Ánodo (+)	Cátodo (-)	Turbiedad (NTU)	Conductividad (mS/cm)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	⁴ SST (mg/L)	⁵ SDT (mg/L)	⁶ ST (mg/L)
2	Fe	Al	17	15.4					
4	Fe	Al	16.5	16.8					
2	Al	Fe	5	13.1					
⁷ 4	Al	Fe	0	12.7	20	2035	1870	8130	1000 0

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 6, se pueden observar que los valores de conductividad y turbiedad de cada uno de los ensayos realizados, sin embargo la columna azul indica que se eligió como mejor ensayo donde se utilizaron cuatro (4) electrodos (dos (2) de aluminio como ánodo y dos (2) de hierro como cátodo), ya que en este se obtuvo el menor valor en turbiedad de cero (0) y en conductividad de 12.7 después de la electrocoagulación.

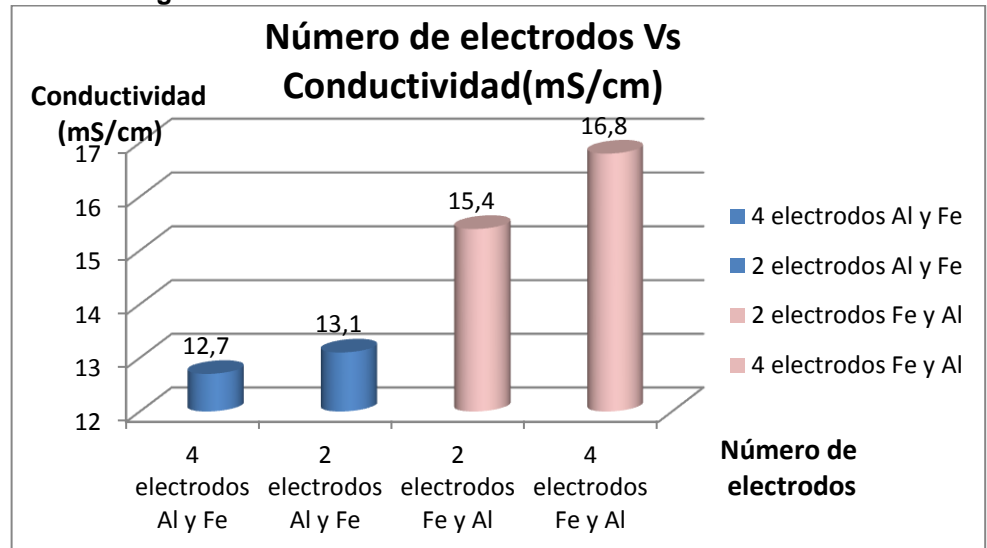
⁴ SST: Sólidos Suspendidos Totales

⁵ SD: Sólidos Disueltos Totales

⁶ ST: Sólidos Totales

⁷ Fila de color azul corresponde al mejor ensayo y fue utilizado en la medición de los parámetros.

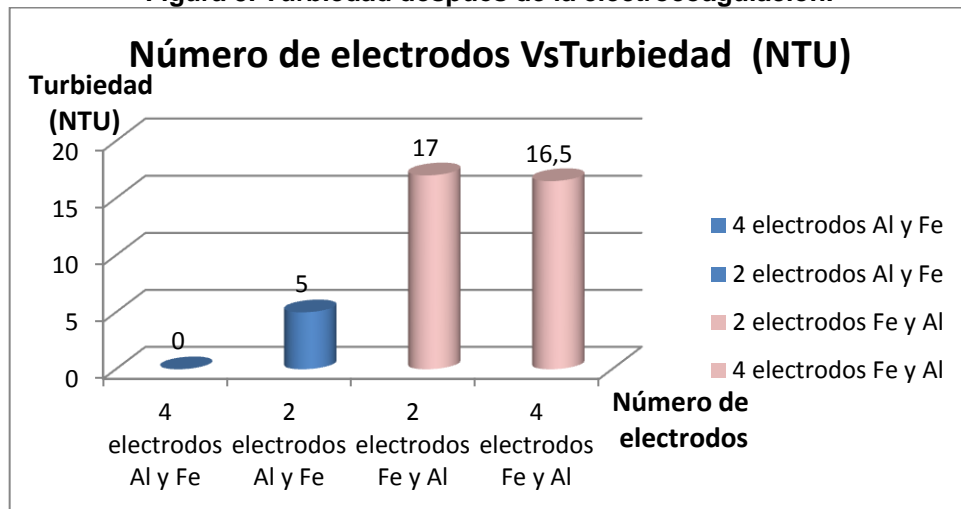
Figura 4: Número de electrodos Vs Conductividad



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4, se puede observar disminución en la conductividad según la posición del tipo de electrodo utilizado, es decir utilizando 2 y 4 electrodos de hierro como ánodo y el aluminio como cátodo, se obtuvieron valores entre 15,4 y 16,8 mS/cm, que respecto a utilizar 2 y 4 electrodos y en la posición aluminio como ánodo y el hierro como cátodo se obtuvieron valores de 12,7 y 13,1; por lo tanto se seleccionó el ensayo de cuatro (4) electrodos (2 de aluminio como ánodo y 2 de hierro como cátodo) ya que es donde quedan menos iones disueltos en el agua, y también utilizando el mismo arreglo de posición de electrodos se obtuvo una turbiedad más baja de cero (0) ver figura 5.

Figura 5. Turbiedad después de la electrocoagulación.



Fuente: Elaboración propia

En la figura 5, se puede observar mayor incidencia del tipo de electrodo que del número de placas sobre la turbiedad, siendo más favorable utilizar electrodos de aluminio como ánodo y hierro como cátodo. En el ensayo se observó que utilizando el hierro como ánodo, su precipitación quedaba un lodo pesado y afectaba la traslucidez del agua tratada que a simple vista se notaba y utilizando el tubímetro se pudo confirmar, por lo tanto se obtuvo un resultado de turbiedad cero (0) utilizando 4 electrodos (2Al como ánodo y 2Fe como cátodo), siendo esta un determinante para seleccionar el mejor ensayo.

Al utilizar 4 electrodos (2 de hierro como ánodo y 2 de aluminio como cátodo) se puede observar que la turbiedad tiene un valor de 16.5 NTU siendo este el valor más alto comparado con los resultados obtenidos en la figura 5, esto se debe a que aún había presencia de sólidos en suspensión, dado que estas partículas impiden el paso de la luz.

6.1.3 Determinación y Comparación de los parámetros fisicoquímicos con los límites permisibles.

Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos se le realizó al mejor ensayo seleccionado por el menor valor de turbiedad y conductividad, se procedió a realizar los análisis con los equipos y materiales del laboratorio de la

universidad Santo Tomas.

Los parámetros a evaluar se realizaron de acuerdo a los métodos normalizados para análisis de agua potable y residual establecidos por la APHA, AWWA y WPCF [53]. (Ver tabla 10).

Una vez obtenido los valores se procedió a realizar la comparación con los límites permisibles según resolución 3957 del 2009, aplicable para vertimientos al alcantarillado público en Bogotá.

Tabla 7. Determinación y comparación del mejor ensayo con los límites permisibles (Resolución 3957 del 2009).

TINTA NEGRA								
Parámetro	Método	Unidad	Muestra sin electro-coagulación	Muestra electro-coagulada	Remoción		Valor Limite según Resolución 3957 del 2009	Cumplimiento
DBO ₅	SM 5210	mgo ₂ /l	320	20	300	94%	800	Cumple
DQO	SM5220	mg ₂ /l	3102	2035	1066.5	34%	1500	No cumple
Sólidos Suspendidos	SM 2540 D	mg/l	9600	1870	7730	81%	600	No cumple
Sólidos disueltos	SM 2540 C	mg/l	10400	8130	2270	22%	no legislado	N.A.
Sólidos totales	SM 2540 B	mg/l	20000	10000	10000	50%	no legislado	N.A.
Conductividad	SM2510	mS/cm	16.2	12.7	3.5	22%	no legislado	N.A.
Turbiedad	SM2130	NTU	14.5	0	14.5	100%	no legislado	N.A.
pH	Papel tornasol	Unidades	7	7	N.A		5.0-9.0	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7 se puede observar que.

Los valores reportados de los parámetros en la muestra sin electrocoagular en la tabla 7 corresponden a los valores promedio y valores únicos de la tabla 5.

La remoción de DBO_5 cumple el límite permisible de la res. 3957/2009 al estar por debajo de 800 mg/LO_2 adicionalmente sino fuera para Bogotá también cumple el decreto 1594/1984 que exige remoción $>80\%$.

La remoción de sólidos suspendidos no cumple con los límites permisibles que exige la resolución 3957/2009 aunque se puede evidenciar que bajaron de acuerdo al agua original sin embargo si el tratamiento no fuese para Bogotá se puede evidenciar cumplimiento con el decreto 1594/1984 que exige remoción $>80\%$ en sólidos suspendidos.

La DQO con electrocoagulación es del 2035 y tiene un 34.4% de remoción, lo que indicaría que mayores tiempos de electrocoagulación no serían suficientes para alcanzar los límites establecidos por la res. 3957/2009 y decreto 1594/1984, se requiere de un proceso de tratamiento adicional a la electrocoagulación para alcanzar la remoción necesaria en DQO; sin embargo como un ensayo adicional se realizó filtrado con carbón activado ver los resultados descritos en tabla 14, para ver como el agua después de ser electrocuagulada y pasada por un filtro de carbon activado alcanza los parametros de DQO establecidos por la ley.

6.1.4 Tasa de reutilización para tinta negra:

Al iniciar el proyecto se pensó que con solo utilizar el proceso de electrocoagulación se lograrían cumplir con los límites exigidos por la normatividad, sin embargo como no se logra ese cumplimiento es importante realizar un tratamiento adicional posterior a la electrocoagulación (filtración y formación de flóculos con coagulantes tradicionales) con el fin de retirar el aluminio y el hierro remanente y así mismo evitar interferencias indeseables en los procesos de curtido donde se va a reutilizar el agua.

Se cálculo mediante ecuación 4, la tasa de recuperación del agua tratada, ya que durante la experimentación se observo que parte del agua salía junto con los lodos.

Ecuación 4: Tasa de recuperación.

$$\text{Tasa de recuperación} = \left(\frac{0.570 \text{ L}}{0.8 \text{ L}} \right) * 100 = 71\%$$

En la ecuación 4 se puede observar que al tratar 0.8L de agua residual se obtuvo 0.570L de agua tratada equivalentes al 71%.

Por otra parte el 30% restante equivalente a 0,23L y es el agua retenida en los lodos (flotación y de sedimentación).

6.1.5 Resultados de análisis básico de costos.

6.1.5.1 Consumo de energía tinta negra.

6.1.5.1.1 Potencia eléctrica requerida por el sistema de electrocoagulación.

La potencia eléctrica consumida en el proceso de electrocoagulación al tratar 0.8L de agua residual del teñido de cuero de tinta negra, fueron 270(J/s), los cuales fueron aplicados mediante los electrodos de aluminio como ánodo y hierro como cátodo, el cálculo se realizó mediante la ecuación 5, descrita a continuación:

Ecuación 5: Potencia eléctrica requerida por el sistema de electrocoagulación.

$$P = 12V * 22.5A = 270W = 270 \left(\frac{J}{s} \right)$$

6.1.5.1.2 Costo energía eléctrica.

Una vez conocida la potencia eléctrica (P), se halló el costo de la energía eléctrica necesaria para tratar 1 m³ de agua con tinta negra del proceso teñido de cuero con electrocoagulación, para ellos se utilizó la ecuación 6:

Ecuación 6: Costo energía eléctrica en COP consumidos en el proceso de electrocoagulación.

$$\frac{CECOPT}{m^3} = \frac{\left[270 * 240_s * \left(\frac{1 KJ}{1000J} \right) \right] * \left[\left(\frac{1 KWH}{3600 KJ} \right) * \left(\frac{\$334.87 COP}{1 KWH} \right) \right]}{0.8_{(L)} * \left(\frac{1m^3}{1000 L} \right)} = \$7,535 \frac{COP}{m^3}$$

En la ecuación 6, podemos apreciar que para tratar 1m³ de agua residual del proceso de teñido de cuero de tinta negra, con electrocoagulación el proceso se consume \$7.535 Pesos Colombianos (COP) en energía eléctrica, ya que es esta el punto de partida para que la electrocoagulación se genere.

6.1.6 Experimentación adicional

Se realizó de manera independiente tratamientos a través de medios adsorbentes con carbón activado en polvo y con arena sílice, que son medios comúnmente utilizados en aguas para retener contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos para comparar los aspectos visuales de la calidad del agua final electrocoagulada.

Tabla 8. Ensayos y análisis adicional para tinta negra.

Parámetro	UND*	Muestra Inicial	Muestra EC**	Proceso de Filtrado post-Electro Coagulación		Remoción		Valor Limite según Resolución 3957 del 2009	Cumplimiento
DQO	mg o ₂ /L	3101.5	2035	Muestra EC+ carbón activado	1324	1777.5 (mgo ₂ /L)	57.31%	1500	Cumple
				Muestra EC+ arena sílice	2000	1101.5 (mgo ₂ /L)	35.52%	1500	No cumple

*UND, unidades

**Muestra EC, muestra electrocoagulada

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en la tabla 8, como el agua residual de tinta negra después de ser electrocoagulada y posteriormente filtrada con carbón activado en polvo bajan los niveles de DQO dando cumplimiento al valor de los límites permisibles de la resolución 3957/2009, en cuanto al color se puede realizar una comparación visual en la figura 7.

Con arena sílice se puede observar que los niveles de DQO no hay una mejora significativa en remoción comparada con la de carbón activado, sin embargo el color no fue medido por falta de disponibilidad de equipos, se realiza una comparación visual (ver figura 6 y 7).

Figura 6. Comparación visual del agua utilizando arena sílice.



Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Comparación visual del agua utilizando carbón activado en polvo.



Fuente: Elaboración propia

6.2 RESULTADOS TINTA AZUL

6.2.1 Determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua residual.

Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos de agua residual del proceso de teñido en Bombo.

TINTA AZUL							
Parámetro	Método	Unidades	Réplica 1	Réplica 2	Valor Promedio	Valor única-medición	Desviación estándar
DBO ₅	SM 5210	mgo ₂ /L	232	229	230	-	1,8
⁸ DQO	SM5220	mgo ₂ /L	4141	4146	4143	-	3,3
Sólidos Suspendidos	SM 2540 D	mg/L	-	-	-	15620	-
Sólidos disueltos	SM 2540 C*	mg/L	-	-	-	4380	-
Sólidos totales	SM 2540 B	mg/L	-	-	-	20000	-
Conductividad	SM2510	mS/cm	6.84	6.84	6.84	-	0
Turbiedad	SM2130	NTU	17.5	17.5	17.5	-	0
pH	Papel tornasol	Unidades	4	4	4	-	0
Aluminio (Al)	Absorción atómica con llama	mg/L	-	-	-	<50	-
Hierro (Fe)	Absorción atómica con llama	mg/L	-	-	-	4	-
Cromo total (Cr)	Absorción atómica con llama	mg/L	-	-	-	33	-

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 9, se puede apreciar que:

Las réplicas 1 y 2, realizadas durante el análisis de los parámetros fisicoquímicos al agua residual del proceso de teñido, fueron importantes para corroborar la veracidad de los datos ya que como podemos observar en el parámetro de DBO₅ se obtuvo una lejanía con respecto al promedio de uno punto cero ocho (1.08), en

⁸ La curva de calibración se puede observar en el anexo 1.

cuanto a la DQO se obtuvo una lejanía del promedio de tres punto tres (3.3). Para conductividad, turbiedad y pH la desviación estándar fue cero (0) es decir indica que no hay lejanía con respecto al promedio ya que en la réplica 2 tienen el mismo valor de la réplica 1.

Se puede evidenciar que el agua residual del proceso de teñido contiene hierro y aluminio, de los cuales se evaluaron con el fin de conocer cuánto es el aumento de estos metales en el proceso de electrocoagulación ya que los electrodos utilizados son de este tipo de. Para ellos no se realizó replicas ya que estos fueron enviados a analizar en laboratorio certificado (Ver anexo 4).

La DBO₅ tiene un valor promedio de 230 mgo₂/l siendo este un nivel bajo aun de los límites permisibles, sin embargo el valor promedio de DQO es de 4143, siendo este un valor alto respecto al valor promedio de DBO₅ lo que indica que el agua residual de tinta azul es poco biodegradable.

Se puede apreciar que los valores encontrados en sólidos suspendidos de 15620, sólidos disueltos de 4380 mg/L, sólidos totales de 20000 mg/L, del agua residual del proceso de teñido se deben a los residuos que al terminarlo quedan en el Bombo, ya que estos se van introduciendo en el agua durante los procesos del curtido.

En cuanto la conductividad de 6.84 se debe a los sólidos disueltos que esta agua residual tiene, se espera que con la electrocoagulación baje su concentración.

El agua residual del proceso de teñido sale con un pH ácido con un valor de cuatro (4) debido a los químicos que se le dosifican en el mismo proceso de teñido para que la piel absorba el colorante.

6.2.2 Evaluación del efecto de las variables independientes como número de electrodos y metal utilizado en cada electrodo.

Para la evaluación del efecto de las variables independientes como número de electrodos y posición de metal utilizado para tinta azul se procedió de la misma manera descrita anteriormente en la tinta negra.

Tabla 10. Diseño experimental del tratamiento del agua con electrocoagulación

TINTA AZUL									
Número de electrodos	Ánodo (+)	Cátodo (-)	Turbiedad (NTU)	Conductividad mS/cm	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	⁹ SST (mg/L)	¹⁰ SDT (mg/L)	¹¹ ST (mg/L)
2	Fe	Al	1.5	6.64					
4	Fe	Al	2.3	6.5					
2	Al	Fe	1.2	6.2					
¹² 4	Al	Fe	1	6.2	140	3575.5	6010	3990	10000

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 10, se puede observar lo siguiente:

El número de electrodos indica la cantidad de placas que son utilizadas en cada ensayo y de la misma manera se distribuyen los, es decir donde el número de electrodos era dos (2), se utilizó uno (1) como ánodo y uno (1) como cátodo, donde se utilizaron 4 electrodos se distribuyeron dos (2) como ánodo y dos (2) como cátodo.

De acuerdo lo mencionado anteriormente se reportan los resultados obtenidos por ensayo, de esta forma el mejor ensayo corresponde al que obtuvo menores valores en turbiedad y conductividad que como se menciona en los objetivos es a este el que se le evalúan DBO₅, DQO, SST, SD y ST en la tabla 11, este ensayo corresponde a la fila de color azul, la cual muestra un ensayo realizado con cuatro (4) electrodos (dos (2) de aluminio como ánodo y dos (2) de hierro como cátodo), los resultados obtenidos fueron, en la turbiedad uno (1)NTU y en conductividad 6.2 mS/cm.

En los ensayos realizados utilizando el hierro como ánodo y el aluminio como cátodo, se puede observar que los valores de turbiedad bajaron ligeramente dado que el hierro como ánodo sede electrones metálicos por tanto le da una coloración rojiza al agua.

⁹ SST: Sólidos Suspendidos Totales

¹⁰ SD: Sólidos Disueltos Totales

¹¹ ST: Sólidos Totales

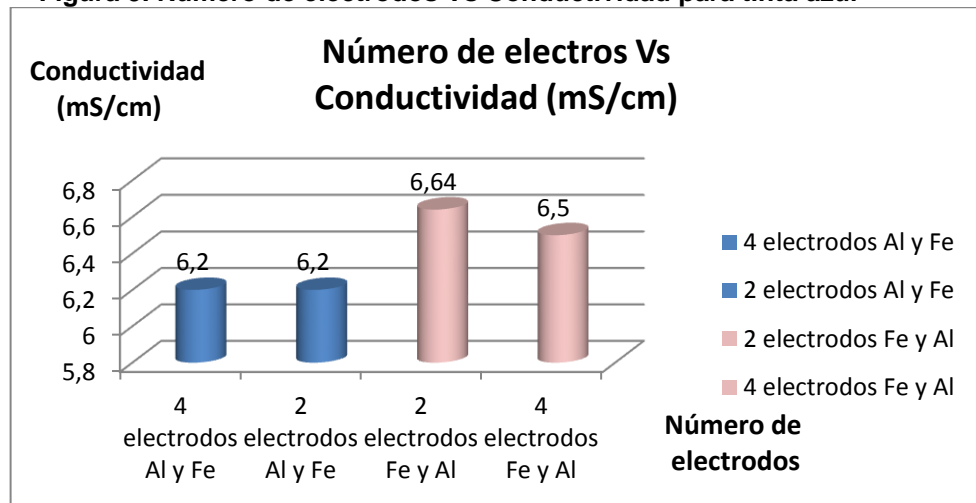
¹² Fila de color azul corresponde al mejor ensayo y fue utilizado en la medición de los parámetros.

Figura 8. Montaje experimental del proceso de electrocoagulación



Fuente: elaboración propia

Figura 9. Número de electrodos Vs Conductividad para tinta azul

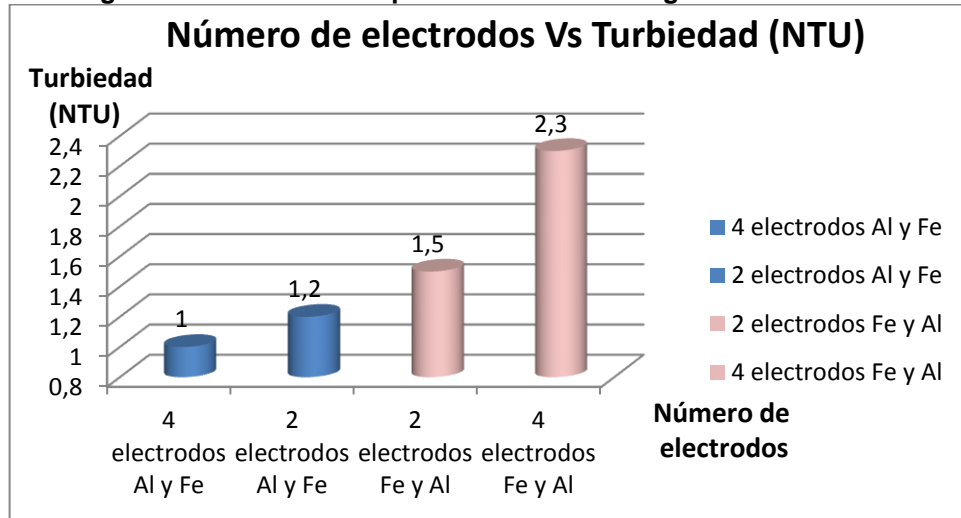


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 9, se puede observar que en la disminución de la conductividad hay mayor incidencia en el tipo de electrodo que del número de electrodos, por lo que teniendo como ánodo el aluminio y como cátodo el hierro se obtuvieron valores de 6.2 mS/cm por eso se tomó como mejor ensayo el que utilizan cuatro (4)

electrodos (dos (2) de aluminio como ánodo y dos (2) de hierro como cátodo ya que para este ensayo la turbiedad bajo a uno (1) ver figura 10.

Figura 10. Turbiedad después de la electrocoagulación tinta azul.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 10, se observó:

Mayor incidencia del tipo de electrodo que del número de placas sobre la turbiedad, siendo más favorable utilizar electrodos de aluminio como ánodo y hierro como cátodo.

En los ensayos donde se utilizó el hierro como ánodo, y el aluminio como cátodo se observó que el sedimento y los floculos eran pesados ya que aún había presencia de sólidos en suspensión, y estas son partículas que impiden el paso de la luz, afectando la translucidez del agua tratada.

En cuanto al color se observó que la posición de los electrodos también fue un determinante ya que cuando se utilizó el hierro como ánodo el agua quedaba después de la electrocoagulación con un tono oscuro, dado que el hierro le aporta coloración al agua.

Por lo tanto el mejor ensayo fue donde los valores fueron más bajos, y esto se

logró en el ensayo donde se utilizó el aluminio como ánodo y el hierro como cátodo, un resultado en turbiedad de uno (1) NTU utilizando 4 electrodos (dos (2) de aluminio como ánodo y dos (2) de hierro como cátodo), siendo esta un determinante para seleccionar el mejor ensayo.

6.2.3 Comparación del mejor ensayo con los límites permisibles.

11. Comparación del mejor ensayo con los límites permisibles (Resolución 3957 del 2009).

Parámetro	Método	Unidades	Muestra sin electro-coagulación	Muestra electro-coagulada	Remoción		Valor Límite según Resolución 3957 de 2009	Cumplimiento
DBO5	SM 5210	mgo2/L	230	140	90	39%	800	Cumple
DQO	SM5220	mgo2/L	4143	3575.5	568	14%	1500	No cumple
Sólidos Suspendidos	SM 2540 D	mg/L	15620	6010	9610	62%	600	No cumple
Sólidos disueltos	SM 2540 C	mg/L	4380	3990	390	9%	no legislado	N.A.
Sólidos totales	SM 2540 B	mg/L	20000	10000	10000	50%	no legislado	N.A.
Conductividad	SM2510	mS/cm	6.84	6.2	0.64	9%	no legislado	N.A.
Turbiedad	SM2130	NTU	17.5	1	16.5	94%	no legislado	N.A.
pH	Papel tornasol	Unidades	7	7	N.A	N.A	5.0-9.0	Cumple
Aluminio (Al)	Absorción atómica con llama	mg/L	< 50	160	N.A	N.A	10	No cumple
Hierro (Fe)	Absorción atómica con llama	mg/L	4	112	108	-2700	10	No cumple
Cromo total (Cr)	Absorción atómica con llama	mg/L	33	2.8	30.2	92%	1	No cumple

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11 se puede observar que:

Los valores reportados de los parámetros en la muestra sin electrocoagular en la tabla 11, corresponden a los valores promedio y valores únicas mediciones de la tabla 9.

La remoción de DBO_5 cumple el límite permisible de la res. 3957/2009 al estar por debajo de 800 mg/LO_2 adicionalmente sino fuera para Bogotá también cumple el decreto 1594/1984 que exige remoción $>80\%$.

La remoción de sólidos suspendidos no cumple con los límites permisibles que exige la resolución 3957/2009 ni el decreto 1594/1984 aunque se puede evidenciar que bajaron de acuerdo al agua original lo que indicaría un proceso adicional a la electrocoagulación o aumentar la conductividad con la adición de sales como lo recomienda la literatura descrita en marco teórico.

La DQO con electrocoagulación es de 3575.5 y tiene 14% de remoción, lo que indicaría que mayores tiempos de electrocoagulación no serían suficientes para alcanzar los límites establecidos por la resolución 3957/2009 y decreto 1594/1984, se requiere de dosificación de sales para subir la conductividad y de un proceso de tratamiento adicional a la electrocoagulación para alcanzar la remoción necesaria en DQO; sin embargo como un ensayo adicional se realizó filtrado con carbón activado ver los resultados descritos en tabla 15.

Los niveles de aluminio y de hierro aumentan en el agua con el proceso de electrocoagulación dado que se utilizaron electrodos de este tipo de material, sin embargo es evidente como el cromo total baja de 33 mg/L a 2.8 mg/L donde a un no se cumple con los límites permisibles pero se alcanza a remover un 92%. Los resultados emitidos por el laboratorio se encuentran en anexo 4, 5 y 6.

Para disminuir los niveles de aluminio y hierro se recomienda utilizar un coagulante tradicional como alumbre o polímeros debido a que estos metales por ser polares pueden coagularse fácilmente por acción de cargas. Esto es similar a los resultados obtenidos en estudios de electrocoagulación donde también aumentan los metales usados en los electrodos, y sugieren un tratamiento adicional para retirarlos.

6.2.4 Resultados de experimentación adicional

Tabla 12. Ensayo adicional utilizando carbón activado en polvo para tinta azul.

Parámetro	Unidades	Muestra Inicial	Muestra EC	Proceso de Filtrado post-Electro Coagulación		Remoción Total EC + Filtrado		Valor Limite según Resolución 3957 del 2009	Cumplimiento
DQO	mgo ₂ /L	4143	3575.5	Muestra EC+ Filtrada con carbón activado	1991	2152 mgo ₂ /L	48%	1500	No cumple
				Muestra EC+ Filtrada con arena sílice	3501	643 mgo ₂ /L	84%		No cumple

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en la tabla 12, que aunque no se obtiene cumplimiento con el valor de los límites permisibles de la resolución 3957/2009, se evidencia que se bajan los niveles de DQO al haber hecho pasar el agua electrocoagulada a través de materiales adsorbentes como carbón activado el polvo.

Con arena sílice se puede observar que los niveles de DQO no hay una mejora significativa en remoción comparada con la de carbón activado, sin embargo el color que no fue medido por falta de disponibilidad de equipos, se realiza una comparación visual (ver figura 8 y 9).

Figura 11. Comparación visual del agua utilizando arena sílice.



Fuente: Elaboración propia

Figura 12. Comparación visual del agua utilizando carbón activado en polvo.



Fuente: Elaboración propia

6.2.5 Tasa de reutilización para la tinta azul.

Cálcular la tasa de recuperación indica la cantidad de agua que se puede obtuvo al final de la electrocoagulación, es importante aclarar que se requiere tratamiento adicional posterior a la electrocoagulación para retirar el aluminio y el hierro remanentes y evitar interferencias indeseables en los procesos donde se va a reutilizar el agua. El porcentaje de recuperación de agua se muestra a continuación mediante la ecuación 7.

Ecuación 7: Tasa de recuperación.

$$Tasa\ de\ recuperación = \left(\frac{0.56\ L}{0.8\ L} \right) * 100 = 70\%$$

En la ecuación 7, se puede observar que al tratar 0.8L de agua residual se obtuvo 0.56L de agua tratada equivalentes al 70%.

Por otra parte el 30% restante equivalente a 0,24L fue el agua que es retenida en los lodos (flotación y de sedimentación).

1.1.1 Resultados básicos de costos

Se calculó la potencia (P) con base en la corriente (I) y el voltaje (V) requerido por el sistema, teniendo en cuenta el costo del KWH a nivel industrial, a continuación se describe el desarrollo:

6.2.5.1 Consumo de energía tinta azul.

6.2.5.1.1 Potencia eléctrica.

El cálculo de la Potencia eléctrica aplicada en los electrodos al tratar 0.8L de agua con tinta azul del proceso de teñido del cuero en bombo por electrocoagulación, se realizó mediante la ecuación 8, descrita a continuación:

Ecuación 8: Potencia eléctrica requerida por el sistema de electrocoagulación.

$$P = 12V * 14.6A = 175 W = 175 \left(\frac{J}{s} \right)$$

6.2.5.2 Costo energía eléctrica.

Una vez conocida la potencia eléctrica (P), se halló el costo de la energía eléctrica necesaria para tratar 1 m³ de agua con tinta azul del proceso teñido de cuero con electrocoagulación, para ellos se utilizó la ecuación 9.

Ecuación 9: Costo energía eléctrica en COP consumidos en el proceso de electrocoagulación.

$$\frac{CECOPT}{m^3} = \frac{\left[175 * 240_s * \left(\frac{1 KJ}{1000 J} \right) \right] * \left[\left(\frac{1 KWH}{3600 KJ} \right) * \left(\frac{\$334.87 COP}{1 KWH} \right) \right]}{0.8_{(L)} * \left(\frac{1m^3}{1000 L} \right)} = \$4,884 \frac{COP}{m^3}$$

En la ecuación 9, podemos apreciar que para tratar 1m³ de agua residual del proceso de teñido de cuero de tinta negra, con electrocoagulación el proceso se consume \$4.884 Pesos Colombianos (COP) en energía eléctrica, ya que es esta el punto de partida para que la electrocoagulación se genere.

7. IMPACTO SOCIAL, HUMANÍSTICO Y AMBIENTAL DEL PROYECTO

El principal descontento de la población en contra de los sectores industriales y de servicios está inclinado al posible impacto ocasionado sobre la salud y el ambiente, por esta razón este proyecto genera la posibilidad de mejorar el impacto ambiental producido por el sector de la industria del cuero, disminuyendo la contaminación de las aguas residuales producidas por el proceso de teñido de cuero en bombo.

Por ejemplo las aguas del Río Bogotá a su paso por el Departamento de Cundinamarca, después de recibir las aguas del Río Tunjuelito, son utilizadas para riego de cultivos que absorben la materia orgánica no biodegradable proveniente de los colorantes, afectando a la población que los consume por ser altamente carcinogénicos. Otros cultivos son afectados por recibir estas aguas contaminadas por lixiviación, las aguas del Río Magdalena que reciben las aguas del Río Bogotá, presentan la misma situación por contaminación de peces, afectando a la población que los consume.

Gracias a la electrocoagulación que es un tratamiento terciario de tecnología de final de tubo, podemos separar parte de la materia orgánica no biodegradable del agua disminuyendo los impactos ambientales causados por esta . Este trabajo no incluye el tratamiento de lodos pero se recomienda su estudio en un trabajo posterior.

El proyecto trae otros efectos a la sociedad ya que propone nuevas tecnologías para la descontaminación de aguas residuales a menores precios y con la efectividad igual o mayor de un proceso ya usado como es el la coagulación química, esto genera mayores ganancias que representa beneficios para los empleados que en su mayoría son del mismo sector.

También podemos prevenir el desempleo por cierres de industrias por incumplimiento de normas ambientales.

Los colorantes del cuero que Proviene de los taninos y tintes, perjudica la actividad fotosintética de las plantas acuáticas y provoca su muerte, esto genera mal olor y mal aspecto de los cuerpos de agua cercanos a la zona lo cual genera

molestia en la población. Con la ayuda de tecnologías como la electrocoagulación podemos prevenir estas situaciones mejorando la calidad de vida de la población que está en la zona de influencia de las industrias, y generar un trato amable entre la población y las empresas.

Según los antecedentes de la zona la mayoría de las empresas que están presentes en el sector de san Benito, gracias a las presión de las autoridades ambientales durante los últimos veinte años han tenido que instalar plantas de tratamientos para adecuarse a la normatividad distrital y evitarse sanciones y cierres por delitos producidos al medio ambiente y a la población, siendo estas en su mayoría ineficientes por solo tener tratamientos básicos y primarios que no se adecuan a un proceso eficiente que disminuya la contaminación de los vertimientos producidos por la industria del cuero en el sector. La electrocoagulación puede ser una tecnología que cause gran impacto dentro del sector ya que es un sistema económico y muy eficiente a la hora de tratar agua residual del proceso de teñido de cuero en bombo que en consecuencia puede producir interés en el sector por la facilidad de acoplarlo a las plantas de tratamiento ya instaladas, esto causaría aumento en la eficiencia de las PTAR y en consecuencia el cumplimiento de los límites establecidos en la normativa distrital.

8. CONCLUSIONES

- La DBO_5 del agua residual tiene valores por debajo de los límites permisibles, haciendo el proceso de electrocoagulación óptimo para el tratamiento debido a la poca materia orgánica biodegradable. placas que con 2 placas, generando mayor incidencia en la posición del electrodo.
- Como primera instancia al realizar los ensayos se encontraron mejores índices de remoción en la turbiedad y conductividad con 4 placas que con 2 placas, generando mayor incidencia en la posición del electrodo.
- En la determinación de los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua, con los límites permisibles que exige la resolución 3957 de 2009 se encontró que la electrocoagulación como único proceso de tratamiento no es viable, debe ser incorporado otro proceso para obtener resultados dentro de los límites permisibles.
- En cuanto a metales como el hierro y aluminio se evidenció un aumento en el agua tratada dado que son los electrodos que se utilizaron en el proceso, sin embargo se pueden retirar con coagulantes tradicionales ya que estos son polares ionizados.
- Al tratar el agua con electrocoagulación se obtuvo un 70% de agua tratada que se puede reincorporar en el mismo proceso ya que el 30% sale en los lodos (flotación y sedimentación).

- En un tiempo de reacción de 4 minutos, un agua con alta conductividad (tinta negra), conlleva a un consumo mayor de energía que el agua con baja conductividad (tinta azul).
- Utilizando una misma fracción de tiempo, en conductividades altas se pueden lograr buenos niveles de remoción en menos tiempo.
- La conductividad está ligada a los niveles de remoción ya que se obtuvieron mejores niveles de remoción en el agua que tenía la conductividad alta (tinta negra).

9. RECOMENDACIONES

- Neutralizar el pH ya que cuando está en condiciones muy alcalinas o acidas no ocurre reacción.
- El estudio en posteriores trabajos para la disposición final de los lodos ya que se generan en dos fases (Flotación y sedimentación) y con su análisis se podría evaluar la posibilidad de recuperar materias primas.
- Evaluar la posibilidad del uso de energía solar u otro tipo de energía alternativa en el proceso de electrocoagulación con el fin de generar un tipo de tecnología limpia.
- Se recomienda el uso de cuatro (4) electrodos debido a que se obtuvo mayores eficiencias en la electrocoagulación. Utilizando dos electrodos es posible que quede menos concentración de metales de los electrodos en el agua, pero con menor eficiencia en la electrocoagulación.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Departamento Administrativo de Medio Ambiente (DAMA), «Guía Ambiental para el Sector de Curtiembres,» Bogotá D.C, 2004.
- [2] A. M. Alzate Tejada, «Proyecto de Gestión Ambiental en la Industria de Curtiembre en Colombia,» Centro Nacional de Producción mas Limpia y Tecnologías Ambientales, Bogotá, 2004.
- [3] A. M. Garzón Rodríguez, «Sistema Integrado de Cuentas Ambientales para el Sector Curtiembres San Benito,» Universidad San Buenaventura, Bogotá, 2007.
- [4] C. S. Álvarez, «San Benito, Corazón del cuero,» *El espectador*, pp. 2-3, 20 Enero 2013.
- [5] A. M. G. Rodríguez, «Sistema integrado de cuentas ambientales para el sector curtiembres de San Benito.,» Universidad San Buenaventura, Bogotá, 2007.
- [6] N. E. Ortiz Penagos, «Recuperación y reutilización de cromo de las aguas residuales de curtiembres de San Benito.,» *Intekhnia*, vol. 7, nº 2, pp. 143-161., 2013.
- [7] L. M. Jaramillo, «Química General,» Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2001.
- [8] Grupo de Gestión Ambiental Empresarial, *Parque Industrial Ecoeficiente de San Benito (PIESB)*, Bogotá: Secretaria Distrital de Ambiente, 2007.
- [9] C. Yagüe Sánchez, *Eliminación de color en aguas de industrias de acabado de piel mediante tecnologías de oxidación.,* Alicante: Universidad de Alicante, 2001.
- [10] SENA, «Cadena Productiva del Cuero,» SENA, Medellín, 2004.

- [11] R. Rivera, «Instrumento de Gestión Ambiental para el Siglo XXI,» [En línea]. Available: http://www.cueronet.com/tecnica/normasiso14000_cap4.htm. [Último acceso: 04 Septiembre 2014].
- [12] CIATEC, *Manual de buenas practicas ambientales*, México, 2006.
- [13] A. P. Restrepo Mejía, Á. Arango RUIZ y L. F. Garces Giraldo, «La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas,» La Sallista, 2006.
- [14] H. Castillo Alvarado y A. Rivera García, *Ambiente y Desarrollo impulsores del Progreso electrocoagulación, electrofloculación, electroflotación y producción insitu de cloro*, Ecuador.
- [15] A. L. Orozco y S. P. Castro, «Remoción de color en aguas residuales del proceso de tinturado de una curtiembre mediante electrocoagulación,» Colciencias, Cali, 2012.
- [16] E. Varela y C. James, «Tratamiento de Aguas Residuales Provenientes de la Cuertiembre por Vía Electroquímica,» Universidad Villa Maria, Córdoba (Argentina), 2010.
- [17] R. A. Arango y L. F. Garcés Giraldo, «Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria Láctea,» *Universidad EAFIT*, vol. 43, nº 147, 2007.
- [18] Jaramillo Terán, Enelio Xavier, «Diseño y Construcción de un Reactor de Electrocoagulación para el estudio de Tratamiento de Agua Residual de Tintura y Acabado Textil,» Universidad Técnica del Norte Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Ibarra (Ecuador), 2012.
- [19] A. A. Castrillón y M. c. B. Agudelo, «Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocuagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavandería con fines de reuso,» Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2007.
- [20] Intechology Chile LTDA, «Sistemas de tratamiento para las aguas residuales mediante la tecnología de electrocoagulación,» Innovaciones tecnológicas, Chile.
- [21] F. G. DÍAZ BLANCO y L. J. HERNÁNDEZ VARGAS, «CONTROL EN LÍNEA DE UNA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR ELECTROCOAGULACIÓN,» UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, BUCARAMANGA, 2010.
- [22] REITEC, «CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA,» Las Palmas de Gran Canaria.
- [23] E. Gilpavas, «Aplicación de la Electroquímica en en Tratamiento de Aguas Residuales,» Universidad EAFIT, Medellín, 2008.
- [24] C. Pérez, S. S. Gelover, S. L. M. Dominguez y A. , «Efecto de la velocidad de flujo y de la cantidad del agua en la pasivación de un reactor de electrocoagulación,» *Tecnología*,

Ciencia, Educación, vol. 27, nº 2, 2012.

- [25] P. Holt, G. Barton y C. Mitchell, «ELECTROCOAGULATION AS A WASTEWATER TREATMENT,» The University of Sydney, Australian, 1999.
- [26] M. Bayramoglu, M. Kobya, O. Taner y M. Sozbir, «Operating cost Analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater,» Separation and purification Technology, 2004.
- [27] M. D. Salazar y G. Cochachi, «Obtención de biodiesel a partir de grasas y aceites extraídos de lodos de las aguas residuales domesticas,» Universidad Nacional del centro del Perú, Huancayo, 2013.
- [28] B. D y K. Kyöläinen, «Electro-flocculation,» [En línea]. Available: https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/puu-0.4400/harjoitustyot/Puu-0_4400_electrofloculation.pdf.
- [29] A. Londono Carvajal, «Conceptos básicos de química coloidal,» Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- [30] V. M, «Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters,» VTTScience, Finlandia, 2012.
- [31] D. V. Robinson, «Electrofloculation in the treatment of polluted water [online],» Electropure Australia Ltd, [En línea]. Available: <http://www.rotaloo.com/electrofloc.pdf>. [Último acceso: 5 Septiembre 2014].
- [32] A. P. Restrepo Mejía, A. Arango Ruíz y L. F. Garces Giraldo, «Challenges and opportunities in water treatment,» La Sallista, 2006.
- [33] M. Mollah, «present and future perspectives of electrocoagulation,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. Vol. 114 , nº 1-3, pp. 199-210, 2004.
- [34] I. D. Martinez, «La electrocoagulación una nueva alternativa para el tratamiento de las aguas residuales,» Medellín, 2005.
- [35] F. N, «Letra A,» de *Diccionario Ambiental*, vol. 1, 2007, p. 21.
- [36] K. I, «Letra A,» de *Diccionario técnico akal de cine*, vol. 1, 2004, p. 26.
- [37] EMC=COSMOS, «La enciclopedia de la ciencia y tecnología en México,» 13 Octubre 2009. [En línea]. Available: http://www.izt.uam.mx/cosmosecm/VOCABULARIO_QUIMICA.html. [Último acceso: 5 Septiembre 2014].
- [38] Kaselco, «Description of Kaselco Electrocoagulation Technology and Equipment,» 15 April 2013. [En línea]. Available: <http://www.kaselco.com/electrocoagulation-technology-and-equipment.html>. [Último acceso: 06 Julio 2014].
- [39] J. A. García Álvarez, «Ques es la corriente directa o continua,» [En línea]. Available:

- http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_corriente_directa/ke_corriente_directa_1.htm.
- [40] E. Villagran y S. Cuello, «Curso de Curtido Orgánico y Artesanal de Cueros,» INTA E.E.A, Argentina.
- [41] A. D, I. A, I. J, M. S y S. R, «Letra E,» de *Diccionario de Ciencias* , Complutence, 2000, pp. 360-361.
- [42] A. López, R. Soto, S. Escribano y Á. Pérez, «Tecnología Industrial II,» [En línea]. Available: <http://technolaserna.wikispaces.com/file/view/Electrolisis.Pilas+galv%C3%A1nicas.pdf>. [Último acceso: 6 Septiembre 2014].
- [43] Textos Científicos.com, «DEFINICIÓN Y PROPIEDADES DE LAS EMULSIONES,» 16 Junio 2005. [En línea]. Available: <http://www.textoscientificos.com/emulsiones/introduccion>. [Último acceso: 6 Septiembre 2014].
- [44] W. Pardavé, «Glosario de Terminos,» de *Estrategias ambientales de las 3R a las 10R. Reordenar, Reformular, Reducir, Reutilizar, Refabricar, Reciclar, Revalorizar energéticamente, Rediseñar, Recompensar, Renovar*, Ecoe Ediciones, 2007, p. 79.
- [45] «Potencia Eléctrica,» 16 Mayo 2012. [En línea]. Available: http://potenciaelectrica-ramls95.blogspot.com/2012/05/potencia-electrica_20.html.
- [46] B. Jimenez, «Evaluación de la contaminación,» de *La contaminación ambiental en México*, México, Limusa S.A, 2005, p. 125.
- [47] Secretaria Distrital de Ambiente, «Resolución 3957 de 2009,» Registro Distrital 4236, Bogotá, 2009.
- [48] E. Happer, «Definiciones básicas,» de *El ABC del control electrónico de las máquinas eléctricas* , Limusa S.A, 200, p. 19.
- [49] Secretaria Distrital de Ambiente, «Guia para la gestión integral de residuos, industria de Curtiembres y Tenerias,» Bogotá, 2010.
- [50] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, «Decreto 3930 de 2010,» Distrital 4236, Bogotá, 2010.
- [51] El Ministro de Salud; El Ministro de Agricultura, «Decreto 1594 de 1984,» Diario oficial 36700, Bogotá, 1984.
- [52] El Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Ministerio de Agricultura, «Ley 99 de 1993,» Diario Oficial No. 41146, Bogotá, 1993.
- [53] APHA, AWWA y WPCF, de *Métodos normalizados para el análisis de agua potable y residual* , Diaz de Santos, 1992.
- [54] R. Muñoz Couto, «Colección de tesis digitales Universidad de las Américas Puebla,» de

Uso de humedales para el tratamiento de aguas residuales municipales en el entorno de la Laguna de Timiahua, Puebla, 2009, pp. 24-25.

- [55] CIATEC, « Manual de Buenas Prácticas Ambientales,» México , 2006.
- [56] Departamento Técnico Administrativo de Medio Ambiente (DAMA), «Guía ambiental para el sector de curtiembres,» Cámara de comercio de Bogotá , Bogotá D.C. , 2004.
- [57] A. M. A. Tejada, *Diagnostico Ambiental del sector curtiembres en Colombia*, Bogotá: Centro Nacional de Producción más Limpia, 2004.
- [58] Vepsäläinen, «Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters,» VVT Science, Finlandia, 2012.
- [59] A. Carvajal, «conceptos básicos de química coloidal,» de *fundamentos sobre química ambiental*, Manizales, Universidad Nacional de Colombia, 2008, p. 104;105.
- [60] Alcaldía Mayor de Bogotá, «Diagnostico Local con Participación Social 2009-2010,» Bogotá, 2010.
- [61] Ministerio de salud, «Decreto 475 de 1998,» DIARIO OFICIAL. AÑO CXXXIII, Bogotá, 1998.
- [62] H. López, «Técnicas de diagnóstico de la calidad laboral., desde el punto de vista de la protección a la salud», Seguridad industrial y protección ambiental para la pequeña y mediana empresa,» 1999.

11. ANEXOS

Se entregara un documento en PDF llamado "anexos.pdf" en él se encuentran los siguientes anexos:

Anexo 1. Determinación de DQO.

Anexo 2. Determinación de DBO_5 .

Anexo 3. Determinación de sólidos.

Anexo 4. Resultado de análisis del agua residual emitido por laboratorio certificado QUIMIA LTDA.

Anexo 5. . Resultado de análisis del agua tratada con electrocoagulación, emitido por laboratorio certificado QUIMIA LTDA.

Anexo 6. Resolución 1003 de acreditación del laboratorio QUIMIA LTDA.

Anexo 7. Registro Fotográfico del proceso de electrocoagulación.