



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE HUATUSCO
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA**

**“EVALUACIÓN DE UN PROCESO ELECTROQUÍMICO
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON
ALTA CARGA ORGÁNICA PROVENIENTES DE LA
INDUSTRIA DEL BENEFICIADO DE CAFÉ”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:
ING. JOSÉ LUIS REMIGIO PLATA**

**DIRIGIDO POR:
DR. JESÚS ATENODORO ALONSO**

**CO-DIRIGIDO POR:
DR. LUIS ANTONIO LÓPEZ ESCOBAR**

HUATUSCO, VER.

DICIEMBRE, 2023

OFICIO DE LIBERACIÓN

I. DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso, creador, juez, protector y proveedor, por las bendiciones recibidas y que me permiten llegar a este momento.

Con mucho amor a mi madre, ejemplo de resistencia, lucha, perseverancia, resiliencia y amor, por ser mi inspiración para todos los proyectos que emprendo.

A mi padre que ha contribuido en mi carácter, temple y determinación.

A mis hermanas Gemina y Ariana que nunca dudan de mí.

A mis sobrinos Jimena y Mateo, que me acompañan en todo momento.

Y finalmente con mucho cariño y amor a mi esposa Yamile, mi complemento antagónico, que impulsa mi carrera en la vida a mi lado, impregnándole el ímpetu necesario a todos los proyectos que emprendo, no eres una gran mujer detrás de mí, eres una gran mujer al lado mío.

Gracias a todos por creer en mí.

II. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor y co asesor de tesis; el Dr. Jesús Atenodoro Alonso y el Dr. Luis Antonio Calderón Palomares por su tiempo y dedicación profesional para lograr este trabajo profesional.

Agradezco y reconozco el trabajo del Dr. Joel De Jesús Mendoza Temis por su invaluable aportación al presente trabajo profesional.

A cada uno de mis profesores de la Maestría en Ingeniería por su profesionalismo y dedicación.

Agradezco a la Dra. Noemí Nava Valente y Dr. Eduardo Hernández Aguilar, asesores externos al Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, por su valiosa aportación en el inicio del proyecto.

Agradezco a todas el personal directivo y administrativo del Instituto Tecnológico Superior de Huatusco que hacen posible esta Maestría en nuestra Honorable Institución.

RESUMEN

En la actualidad existen diferentes métodos para el tratamiento de las aguas residuales.

La electro-oxidación y electrocoagulación, son procesos de tratamientos de aguas residuales cada vez más estudiados, investigados y puestos a prueba para operación en la industria a nivel mundial; ambos se caracterizan por una configuración especial de electrodos.

La electrocoagulación es un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados. La técnica consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, dentro de los más comúnmente utilizados están el hierro y el aluminio. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes, bien sea suspendidas o emulsificadas. Es así como los contaminantes presentes en el medio acuoso forman agregados, produciendo partículas sólidas que son menos coloidales y menos emulsificadas (o solubles) que en estado de equilibrio. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y se pueden remover fácilmente por algún método de separación de tipo secundario.

En el proceso de electrocoagulación hay generación de coagulantes in situ por la disolución de iones de aluminio o de hierro de los electrodos de aluminio o hierro respectivamente. La generación de iones metálicos tiene lugar en el ánodo y en el cátodo hay liberación de burbujas de hidrógeno gaseoso las cuales ayudan a la

flotación de las partículas floculadas, las mismas que serán retiradas posteriormente.

El presente trabajo pretende evaluar la parte de descontaminación y desinfección por electrocoagulación en aguas residuales provenientes de un beneficio de café, cuya característica en particular es la alta carga orgánica que contiene debido al proceso del despulpado. Existe un interés en acoplarlo a un tren de tratamiento que cuenta ya con procesos convencionales.

La relevancia de evaluar esta alternativa radica en que vivimos en un estado cafetalero. En Veracruz destacan 10 regiones productoras de café: en la zona norte se encuentran Huayacocotla y Papantla; en la zona centro están Atzacan, Misantla, Coatepec, Huatusco, Córdoba y Zongolica; y en la sur, Tezonapa y Los Tuxtlá. La superficie de los cultivos de café en Veracruz es de 139 mil hectáreas, sembradas principalmente con variedades de alta calidad de la especie *coffea arabica*: typica, bourbon, mundo novo, caturra y árnica, entre otras.

Las muestras para la evaluación del proceso de electrocoagulación se obtuvieron en el beneficio de café denominado “Catuai Amarillo”, localizado entre las zonas cafetaleras de Córdoba y Huatusco.

Para la evaluación del método químico denominado electrocoagulación se contó con el invaluable apoyo del Dr. Eduardo Hernández Aguilar, catedrático de la Facultad de Ciencias Químicas que nos facilitó el acceso a su laboratorio mediante un convenio de colaboración entre el Instituto Tecnológico Superior de Huatusco y la Universidad Veracruzana.

Esta investigación nos presenta una alternativa confiable e innovadora al tratamiento tradicional de las aguas residuales.

ABSTRACT

Currently there are different methods for treating wastewater.

Electro-oxidation and electro-coagulation are wastewater treatment processes increasingly studied, investigated and tested for operation in worldwide industry; both are characterized by a special electrode configuration.

Electrocoagulation is a process that uses electricity to remove contaminants in water that are suspended, dissolved, or emulsified. The technique consists in inducing electric current in the wastewater through parallel metal plates of various materials, among the most commonly used are iron and aluminum. The electric current provides the electromotive force that causes the chemical reactions that destabilize the forms in which the contaminants are present, either suspended or emulsified. Thus, the contaminants present in the aqueous medium form aggregates, producing solid particles that are less colloidal and less emulsified (or soluble) than in the equilibrium state. When this occurs, the contaminants form hydrophobic components that precipitate and/or float and can be easily removed by some secondary type of separation method.

In the electrocoagulation process there is generation of coagulants in situ due to the dissolution of aluminum or iron ions from the aluminum or iron electrodes, respectively. The generation of metal ions takes place at the anode and at the cathode there is the release of gaseous hydrogen bubbles which help the flocculated particles float, the same ones that will be removed later.

The present work intends to evaluate the part of decontamination and disinfection by electrocoagulation in wastewater from a coffee mill, whose characteristic is the high organic load it contains due to the pulping process. There is an interest in coupling it to a treatment train that already has conventional processes.

The relevance of evaluating this alternative lies in the fact that we live in a coffee growing state. In Veracruz, 10 coffee-producing regions stand out: in the north are Huayacocotla and Papantla; in the central zone are Atzalan, Misantla, Coatepec, Huatusco, Córdoba and Zongolica; and in the south, Tezonapa and Los Tuxtlá. The surface of coffee crops in Veracruz is 139 thousand hectares, planted mainly with high quality varieties of the *Coffea Arabica* species: typica, bourbon, mundo novo, caturra and arnica, among others.

The samples for the evaluation of the electrocoagulation process were obtained in the coffee mill called "Catuai Amarillo", located between the coffee growing areas of Córdoba and Huatusco.

For the evaluation of the chemical method called electrocoagulation, we had the invaluable support of Dr. Eduardo Hernández Aguilar, professor at the Facultad de Ciencias Químicas, who gave us access to his laboratory through a collaboration agreement between the Instituto Tecnológico Superior de Huatusco and the Universidad Veracruzana.

This research presents us with a reliable and innovative alternative to traditional wastewater treatment.

III.....ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	14
CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LA TESIS	15
1.1. ANTECEDENTES	15
1.2 CONTEXTO	15
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.5 HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.6 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	18
CAPÍTULO II MARCO TEORICO	20
2.1 PROBLEMÁTICA DEL AGUA	20
2.2 SITUACION NACIONAL DEL AGUA	20
2.2.1 AGUAS RESIDUALES URBANAS	20
2.2.2 USO DE AGUA EN LA INDUSTRIA	22
2.2.3 AGUAS RESIDUALES CON ALTA CARGA ORGANICA PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA DEL BENEFICIO DEL CAFÉ.	23
2.2.4 TRATAMIENTOS PARA LA ELIMINACION DE MATERIA ORGANICA EN AGUAS RESIDUALES	27
2.2.5 TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES	28
2.3 DEMANDA BIOLOGICA DE OXIGENO	28
2.3.1 DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO DQO	28
2.4 TRATAMIENTOS ELECTROQUIMICOS DE AGUAS RESIDUALES.	29

2.4.1 ELECTROLISIS	31
2.4.2 ELECTRO OXIDACIÓN	32
2.4.2 ELECTROCOAGULACIÓN	34
CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE	40
3.1. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA	40
CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA	43
4.1 CONFIGURACIÓN DE LA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN	43
4.2 RECOPIACION Y ANALISIS DE LA INFORMACION	44
4.3 OBTENCION Y CARACTERIZACION DE LAS AGUAS RESIDUALES	44
4.3.1 CARACTERIZACION DE LAS AGUAS RESIDUALES	47
4.4 ESPECIFICACIONES DE LA CELDA ELECTROQUIMICA	50
4.5 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	53
RESULTADOS	55
CONCLUSIONES	66
FUENTES DE INFORMACIÓN	68
ANEXOS	70

IV. ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Áreas productoras de Café en Veracruz.

Ilustración 2: Metodología de aplicación

Ilustración 3: Composición de un grano de café cereza.

Ilustración 4: Subproductos del café.

Ilustración 5: Diagrama de E-pH para Fe a 25 C°.

Ilustración 6: Diagrama de E-pH para Al a 25 C°

Ilustración 7: Doble capa eléctrica.

Ilustración 8: Reactores para electrocoagulación tipo bach: (a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo, (b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie.

Ilustración 9: Municipio proveedor de Aguas residuales de Cafe.

Ilustración 10: Despulpadora de café del beneficio “Catuai Amarillo”.

Ilustración 11: Muestras del agua del área de despulpado

Ilustración 12: Disposición de las celdas de aluminio en el reactor.

Ilustración 13: Configuración inicial del reactor.

Ilustración 14: pH de Agua cruda sin tratamiento

Ilustración 15: Tratamiento turbidez pH 7

Ilustración 16: Tratamiento turbidez pH 7.5

Ilustración 17: Tratamiento turbidez pH 8

Ilustración 18: Tratamiento DQO pH 7

Ilustración 19: Tratamiento DQO pH 7.5

Ilustración 20: Tratamiento DQO pH 8

Ilustración 21: Tratamiento DBO5 con pH 8

V ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros de caracterización de aguas residuales.	48
Tabla 2: Características iniciales del agua residual	55
Tabla 3: Tratamiento DBO5 con pH 8	64

INTRODUCCIÓN

En México y particularmente en el Estado de Veracruz, el café representa una industria que genera miles de empleos. Para su transformación se utilizan grandes volúmenes de agua y en su mayoría no reciben el tratamiento adecuado.

Cabe destacar que la parte aprovechable del fruto del café para el proceso representa sólo el 20% del volumen total de la fruta, de manera tal que, el procesamiento de extracción del fruto (beneficio) genera un 80% del volumen procesado en calidad de desechos (Orozco, 2005).

En el procesamiento del café por vía húmeda se generan residuos líquidos altamente contaminantes por sus valores de acidez, contenido de sólidos y Demanda Química de Oxígeno (DQO), lo cual genera graves desequilibrios en el ecosistema receptor (Orozco, 2005).

De acuerdo con lo señalado anteriormente, al ser Veracruz productor nacional de café, de la misma manera será la cantidad de aguas residuales generadas, las cuales comúnmente se descargan a los cuerpos receptores sin ningún tratamiento.

Además, si consideramos que los centros de despulpe de café se encuentran ubicados en zonas de montañas donde están los ecosistemas más frágiles, y que el proceso de beneficio se realiza en los meses de sequía, durante los cuales los ríos disminuyen el caudal aumentando la concentración de las sustancias contaminantes (Sotolongo, 2000).

Aunado a ello, el proceso de despulpado y lavado de 1 kg café genera una cantidad de agua y material contaminante equivalente a aquella producida por seis personas en un día (Pujol R., 2001) y una contaminación equivalente a la de 45,5 L de aguas residuales domésticas (Bermúdez R., 1999).

CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LA TESIS

1.1. ANTECEDENTES

En la actualidad los procesos de electrocoagulación han sido estudiados e investigados para el tratamiento de aguas residuales de la industria. Básicamente es el mismo proceso químico llamado coagulación, pero para realizarlo se utiliza la energía eléctrica de corriente directa para aplicar una diferencia de potencial en dos electrodos metálicos y así inducir una corriente eléctrica que genera una reacción química haciendo que la materia orgánica coagule y los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua sean óptimas para cumplir las normas de descargas de aguas residuales en los cauces nacionales.

Es imperante realizar este trabajo debido a la naturaleza económica de la zona centro del estado de Veracruz, en donde las agroindustrias necesitan equipos de tratamientos de aguas residuales que se ajusten a las características de sus materias primas.

Los resultados se utilizarán para determinar la viabilidad del método de tratamiento de aguas residuales “electrocoagulación” y su configuración recomendada para mejorar la calidad del agua que se descarga en los cauces receptores y el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas

1.2 CONTEXTO

Dicha problemática no es propia del estado de Veracruz, sino que es similar en los países productores de café donde se utiliza como proceso de beneficio la vía húmeda.

La problemática de contaminación hídrica, proliferación de insectos y afectación de la fauna de todo el estado de Veracruz, aunado a ello, no están consideradas

en los diagnósticos y acciones de la política pública de las diversas instancias gubernamentales federales o estatales cuyo ámbito de competencia abarca el tema, por ejemplo, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).

También, sabemos que el agua es recurso finito cuya disponibilidad disminuye drásticamente cada año. Por lo anteriormente expuesto es primordial encontrar alternativas de tratamiento de aguas residuales confiables, innovadoras y viables.

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

A pesar de las múltiples investigaciones que se han hecho y se encuentran en proceso alrededor del mundo cada una de ellas tiene la particularidad de que están siendo realizadas para un fin específico como el caso que nos ocupa en el presente trabajo, en otras palabras, el presente trabajo está diseñado para las aguas con alta carga orgánica de la industria del beneficiado del café, con características fisicoquímicas únicas y con una carga orgánica única.

El método que se estudiará tendrá una configuración especial para el tratamiento de las mencionadas aguas residuales, con los electrodos que sean más convenientes para su funcionamiento, para lo cual se realizarán diversas combinaciones para encontrar los adecuados.

En México, el método más utilizado para desinfección de agua para su uso potable es el cloro, lo cuál puede ser cambiado con el uso de tecnologías electroquímicas, aprovechando estas especies formadas por ciertos tipos de electrodos y procesos.

Por lo tanto, en el presente trabajo se pretende evaluar la parte de descontaminación y desinfección electroquímica con diferentes tipos de electrodos,

donde existe un interés en acoplarlo a un tren de tratamiento que cuenta ya con procesos convencionales.

De manera mas especifica, la zona de estudio a analizar, como ya lo mencionamos anteriormente, será la región cafetalera de las altas montañas, en donde el café “Catuai Amarillo” es producido en su mayoría dentro del estado de Veracruz.



Ilustración 1: Áreas productoras de Café en Veracruz.

Fuente: SAGARPA, 2020.

De acuerdo con la ilustración 1, la región de las altas montañas es una gran productora de café “Catuai Amarillo”, con el cual lograremos verificar nuestro estudio.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

GENERAL:

Evaluar el proceso de electrocoagulación para las aguas residuales con alta carga orgánica del beneficio de café “Catuai Amarillo”.

ESPECIFICOS:

- Caracterizar las aguas residuales del beneficio húmedo de café.
- Evaluar el proceso de electrocoagulación en un reactor con celdas de Aluminio.
- Evaluar el reactor de electrocoagulación con diferentes densidades de corriente y pH.
- Determinar la mejor configuración del reactor, comparando los resultados de turbidez, y demanda química de oxígeno.

1.5 HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Después de un análisis teórico sobre la problemática de estudio, se plantean las siguientes hipótesis de investigación:

- a) Es posible reducir la Demanda Química de Oxígeno y la cantidad de materia orgánica en las aguas residuales de la industria del beneficiado de café utilizando el método de electrocoagulación.

1.6 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Consideración los antecedentes de esta tesis, se retomarán técnicas mixtas (cualitativas y cuantitativas) para su estudio; y de manera específica se

considerará la metodología de aplicación de la electroquímica para el tratamiento de aguas residuales de acuerdo con las siguientes etapas:



Ilustración 2: Metodología de aplicación

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO II MARCO TEORICO

2.1 PROBLEMÁTICA DEL AGUA

El crecimiento poblacional y económico ha ejercido mayor presión sobre las reservas de agua en México. La competencia por el recurso es ya causa de conflictos de diferente intensidad y escala: se presenta no sólo entre usuarios de la misma comunidad, sino entre distintas comunidades, municipios, estados e incluso en el ámbito transfronterizo (Pérez MB, 2006).

2.2 SITUACION NACIONAL DEL AGUA

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CNA), la disponibilidad natural media por habitante es de 4 841 m³ /año (del orden de 5 millones de litros / año). Esta cifra por sí sola no nos proporciona evidencia de la disponibilidad de agua en nuestro país, por ello es necesario plantear la relación que existe entre la distribución del recurso y la distribución poblacional en el país. La población se encuentra mayormente concentrada en la zona centro norte del país, donde habita 77% de la población y en donde se recibe sólo 28% de la precipitación pluvial. En esta zona del país se realiza alrededor de 92% del riego. En cambio, en la zona sur la concentración poblacional es menor y la disponibilidad de agua es mayor (Pérez MB, 2006).

2.2.1 AGUAS RESIDUALES URBANAS

La industrialización, la cada vez mayor urbanización, los nuevos estándares de la vida moderna y la agricultura extensiva han dado lugar a una ingente producción de agua residual en los países industrializados (Kapalka, 2010). El agua residual se define como el agua generada en la actividad humana tras haber sido contaminada por los diversos usos a los que ha sido sometida (Kapalka, 2010).

Los componentes que configuran el agua residual que genera una comunidad incluyen:

- Agua residual doméstica (o sanitaria): agua residual procedente de zonas residenciales y de servicios como las instalaciones comerciales.
- Agua residual industrial: agua residual procedente de cualquier actividad industrial o comercial (que no sean aguas domésticas) en la cual predominan residuos industriales.
- Infiltración y conexiones incontroladas: agua que penetra de forma no controlada en la red de alcantarillado, como el agua procedente del subsuelo y el agua pluvial procedente de bajantes de edificios, drenajes de cimentaciones y alcantarillas pluviales.
- Agua pluvial: agua resultante de la escorrentía superficial.

La mayor parte de las aguas residuales contiene, en forma suspendida o disuelta, sustancias indeseables. Independientemente del origen que pueden tener estos residuos, constituyen una fuente potencial de contaminación y como tal deben recibir una atención adecuada (Kapalka, 2010).

Así, los objetivos del tratamiento de las aguas residuales son:

- La eliminación de la materia en suspensión
- El tratamiento de los compuestos orgánicos biodegradables empleando tecnologías aerobias de tratamiento
- La eliminación de los microorganismos patógenos
- La eliminación de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno

- La eliminación de compuestos tóxicos o recalcitrantes

Los tratamientos más habituales se ocupan de la eliminación de materia orgánica biodegradable, sólidos en suspensión y patógenos presentes en el agua residual, aunque en los últimos años ya se han implementado en gran medida tratamientos más restrictivos, que se ocupan también de la eliminación de nutrientes, metales pesados y otros contaminantes prioritarios (Peña MED La, 2013).

Cabe resaltar que, actualmente, se busca recuperar algunos contaminantes del agua, como el nitrógeno y el fósforo, para su uso como fertilizantes.

En México la cobertura de alcantarillado está definida por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), como el porcentaje de la población que habita en viviendas particulares, cuya vivienda cuenta con un desagüe conectado a la red pública de alcantarillado, a una fosa séptica, a un río, lago o mar, o a una barranca o grieta. A diciembre de 2012 se registró una cobertura nacional de alcantarillado de 90.5% (Peña MED La, 2013).

Por ello, cuando se habla de tratamiento de aguas residuales como indicador, se habla del porcentaje de aguas residuales colectadas en los sistemas formales de alcantarillado municipales que reciben tratamiento, sin considerar el tratamiento de las descargas industriales; alcanzando para finales de 2012 un 47.5% de tratamiento, de un caudal de aguas residuales estimado en 210 m³ /s.

2.2.2 USO DE AGUA EN LA INDUSTRIA

El consumo del agua en la industria se mide comúnmente a través de la extracción de masas de agua subterránea; sin embargo, el uso del agua en la industria responde a diversas fuerzas. La más importante es la tecnología involucrada en los procesos, seguida de fuerzas económicas como los costos de insumos, cargos,

impuestos, tarifas y nivel de producción. Los cambios tecnológicos dentro de las empresas son la fuerza impulsora para reducir el uso de agua por primera vez: la recirculación interna de agua, el consumo de nuevos materiales, etc. (Rodríguez-tapia L, 2020).

El agua es un factor único, entre otros, del proceso productivo y debe ser analizada como tal. Los cambios tecnológicos han tenido impactos variados y sustanciales en la forma en que la industria usa el agua. Los cambios que afectan a otros insumos pueden tener un efecto positivo o negativo en el uso del agua en la industria. Los problemas de cada industria o planta son únicos debido a su situación particular. El criterio utilizado por la industria para evaluar las inversiones que ahorran agua es la tasa de retorno de la inversión. Además, se deben considerar las restricciones a las empresas. Estos pueden ser internos como un presupuesto limitado, la calidad del producto, la tecnología actualmente disponible y restricciones externas como fuentes limitadas de agua y limitaciones físicas en particular, ya sea en cantidad o calidad (Rodríguez-tapia L, 2020).

2.2.3 AGUAS RESIDUALES CON ALTA CARGA ORGANICA PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA DEL BENEFICIO DEL CAFÉ.

El cafeto (*Coffea arabica* L.) es uno de los principales cultivos industriales en México. En los negocios de exportación los granos de café son muy apreciados (Espinosa-Solares T., 2005) ., y después del petróleo, es el producto más importante de exportación (DaMatta F. M., 2007).

En México, el cafeto se cultiva en las regiones que poseen el clima adecuado para su crecimiento, y casi toda la producción es llevada a cabo por productores con pequeñas parcelas y escaso capital para invertir en su cultivo y manejo (Wise, 2005) . En los mercados internacionales se reconocen algunos factores

ambientales que influyen en la calidad del café como la altitud de la plantación (Bertrand B., 2006) y la sombra, pero la variedad del cafeto también juega un papel muy importante en cualquier sistema de producción, pues del genotipo y su adaptación al ambiente depende la cantidad y la calidad de frutos a cosechar (Gatzweiler, 2005).

La mayoría de las variedades de *Coffea arabica* en el mundo son parecidas genéticamente, mientras que morfológicamente, presentan diferencias notables y sus frutos contrastan en calidad en pre y postcosecha (Steiger D. L., 2002). En Brasil, los principales cultivares son Mundo Novo, Catuai Vermelho, y Bourbon (Perrone D., 2008).

En México, se cultivan mayormente los cultivares Typica, Bourbon, Caturra Rojo, Mundo Novo, Garnica y Caturra Amarillo, cuya producción promedio de frutos frescos de café (cereza) es inferior a siete sacos de café oro (menor a 2.0 t ha⁻¹ de café cereza, equivalente a 8 qq ha⁻¹), que son las unidades utilizadas en el comercio internacional de este producto (Escamilla E., 2005).

En el beneficio húmedo del café se utiliza agua como medio facilitador o como medio de transporte, por lo tanto, el proceso de separación de los granos de café a partir del fruto durante el beneficio húmedo genera enormes volúmenes de material de desecho.

Estos subproductos de la elaboración del café (pulpa de café y efluentes del proceso) se traducen en malos olores a las zonas aledañas, áreas de reproducción de vectores de enfermedades cuando son arrojados alrededor de las plantas de procesamiento y cuando en época de lluvia las lagunas se desbordan, escapándose la carga contaminante, afectando a las aguas superficiales y del subsuelo, respectivamente (Mburu, 1994).

Para dar al lector un contexto del problema a continuación, se describen brevemente las partes que componen al grano y fruto del café, como lo observamos en la ilustración 3 (Ortega, 2010).

- Epicarpio o piel: Los colores que va tomando desde su etapa juvenil hasta su maduración, son los siguientes: verde, amarillo, rosado y rojo (algunas veces amarillo) sucesivamente. Tomando una coloración castaño oscuro cuando el grano empieza a secarse.
- Mesocarpio: Es la parte carnosa del grano, la cual está compuesta por sustancias pectinas y azúcares, comúnmente se les denomina mucílago o baba.
- Endocarpio o pergamino: Esta es la capa protectora de la semilla, compuesta por material celulósico, cuando el proceso ha sido el correcto para la cereza, este es de color amarillo pajizo.
- Perisperma o película plateada: Es un tejido delgado que cubre a la semilla, su color es gris plateado, rojizo o negro.
- Endospermo o semilla: Es el grano desprovisto de todas sus capas (cubiertas); es denominada café verde u oro cuando éste ya ha sido procesado.
- Embrión o germen: Es la planta en estado latente la cual se encuentra alojada en una de las extremidades de la semilla.

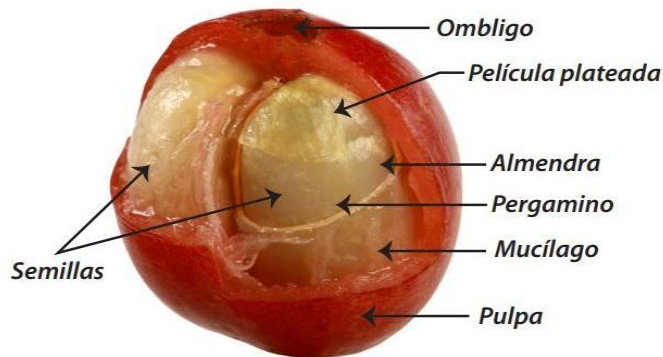


Ilustración 3: Composición de un grano de café cereza.

Fuente: Ortega, 2010.

El café maduro presenta una composición en la cual el grano, que es la parte aprovechable para el proceso, representa el 20% del volumen total de la fruta, de manera tal que, el procesamiento de extracción del fruto (beneficiado) genera un 80% del volumen procesado en calidad de desechos, tal como lo analizamos en la ilustración 4 (Orozco, 2005).

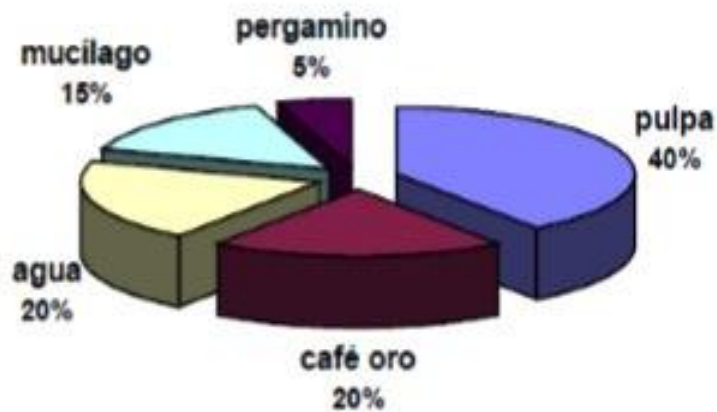


Ilustración 4: Subproductos del café.

Fuente: Orozco, 2005.

La importancia de darle un correcto tratamiento a las aguas de desecho es consecuencia de que la oxidación de la materia orgánica contenida en ellas es llevada a cabo por la microflora bacteriana, que, alimentándose de dicha materia, consume todo el oxígeno disuelto en el agua creando así una situación de ausencia de oxígeno que perjudica la flora y fauna acuática (Hernández & Hidalgo, 2000).

Las principales características del agua residual son su contenido de sólidos, distribución de partículas por tamaño, turbiedad, color, transmitancia/absorbancia, olor, temperatura, densidad y conductividad (Crites, 2000).

2.2.4 TRATAMIENTOS PARA LA ELIMINACION DE MATERIA ORGANICA EN AGUAS RESIDUALES

Cuando el agua está contaminada y la descontaminación se vuelve necesaria, se debe elegir el mejor enfoque de purificación para alcanzar los objetivos de descontaminación (según lo establecido por la legislación).

Un proceso de purificación generalmente consta de cinco pasos sucesivos:

- (1) tratamiento preliminar o pretratamiento (físico y mecánico);
- (2) tratamiento primario (fisicoquímico y químico);
- (3) tratamiento o purificación secundarios (químicos y biológicos);
- (4) tratamiento terciario o final (físico y químico); y
- (5) tratamiento del lodo formado (vertido supervisado, reciclaje o incineración).

En general, los dos primeros pasos se agrupan bajo la noción de pretratamiento o paso preliminar, según la situación (Crini G, 2009).

2.2.5 TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES

- Tratamientos anaeróbicos.
- Tratamientos aeróbicos.

2.3 DEMANDA BIOLOGICA DE OXIGENO

La Demanda Biológica de Oxígeno determinada a los 5 días (DBO5 o DBO) es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para la oxidación de la materia orgánica presente en el agua. Los microorganismos (principalmente bacterias) consumen oxígeno para metabolizar dicha materia orgánica. Cuanto mayor sea el contenido en materia orgánica a metabolizar, mayor será el requerimiento de oxígeno y, por tanto, mayor la DBO. Los microorganismos presentes en el agua residual no solamente son capaces de metabolizar la materia orgánica sino también distintos componentes inorgánicos, como el amoníaco, y por lo tanto este también contribuye al requerimiento de oxígeno. Por consiguiente, la DBO total incluye la DBO asociada a la materia orgánica y la DBO asociada a la demanda biológica de oxígeno nitrogenada (DBON).

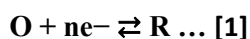
2.3.1 DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO DQO

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) mide la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica presente en un agua residual utilizando un oxidante fuerte (dicromato potásico) en medio ácido. La medida de la DQO es, en general, superior a la DBO, ya que se puede oxidar una mayor cantidad de compuestos por métodos químicos que por métodos biológicos. Desde el punto de vista operacional, la mayor ventaja de la medida de DQO con respecto a la de DBO es la rapidez con la que se obtiene el resultado. Mientras

que las pruebas de DBO requieren de al menos 5 días (DBO5), la medida de DQO solamente requiere de unas tres horas.

2.4 TRATAMIENTOS ELECTROQUIMICOS DE AGUAS RESIDUALES.

La electroquímica es una rama de la química dedicada al estudio de la interacción y correlación de los procesos químicos y eléctricos mediante las reacciones de óxido- reducción (redox). Diferentes técnicas electroquímicas han sido investigadas para distintos tipos de aplicación, podemos encontrar: electrodiálisis, la electrocoagulación, la electroflotación y procesos de oxidación avanzada. Un proceso electroquímico se puede definir mediante la siguiente ecuación (Metcalf & Eddy, 2003).



En donde:

O, es la especie oxidada

R, es la especie reducida

Ne⁻, el número de electrones transferidos por mol

En las reacciones electroquímicas se da básicamente un intercambio entre los electrones de los electrodos y los iones o moléculas de la solución, mediante la aplicación de una diferencia de potencial, que genera una corriente donde los electrones fluyen desde el punto más negativo hasta el más positivo. Este tipo de reacciones se clasifican según el lugar donde ocurran, si se llevan a cabo en la solución se denominan homogéneas y si es en la superficie del electrodo se denominan heterogéneas (Metcalf & Eddy, 2003).

En la actualidad, los procesos electroquímicos han sido de los más utilizados para el tratamiento de aguas residuales; estos ofrecen varias ventajas sobre otros, como el funcionamiento a temperatura ambiente y presión, así como un rendimiento robusto y capacidad para ajustarse a las variaciones en la composición del afluente y el caudal. La naturaleza del proceso electroquímico es la aplicación de electricidad pasar una corriente a través de una placa metálica llamada ánodo y otro cátodo, sobre una solución acuosa (Powell Water, 2001).

El tratamiento es la precipitación de los metales pesados en un electrolito débilmente ácido o neutralizado como hidróxidos. De esa manera, la elección del material del electrodo no solo proporciona opciones de aplicación específicas, pero también juegan un papel significativo papel en la mejora de la competencia del método contra varios tipos de compuestos contaminados.

Hay distintos tipos de tratamientos para cada tipo de agua, por lo general, el agua residual puede contener compuestos orgánicos, que van desde materia orgánica, aceites, grasas, herbicidas e insecticidas y también podemos encontrar compuestos inorgánicos como cloruros, sulfatos, nitratos y carbonatos, dependiendo del proceso en el cual se haya utilizado (Metcalf & Eddy, 2003).

Estas aguas residuales además de contener algunos de los compuestos mencionados, contiene distintos tipos de patógenos como bacterias y virus, los más comunes son *Burkholderia pseudomallei*, *Escherichia coli*, *Legionella*, *Mycobacterium*, *Salmonella* y *Listeria monocytógenes* (Bayramoglu, 2004) , algunas de estas bacterias también se encuentran en el agua potable, por ese motivo se utilizan lámparas de UV y cloro para poder eliminarlas. Los tratamientos para la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos en aguas residuales se pueden clasificar de la siguiente manera: tratamientos físicos, químicos, biológicos,

electroquímicos y los procesos de oxidación avanzada, donde el proceso dependerá del tipo de agua residual que se disponga.

En México para poder utilizar aguas residuales tratadas se deben de cumplir ciertos requerimientos de coliformes fecales, huevos de helminto, grasas y aceites, DBO (Demanda bioquímica de oxígeno) y SST (NOM-003-SEMARNAT-1997) dependiendo del uso al que se vaya a destinar.

En base a que la escasez del agua es un problema mundial y también debido a distintos factores como el aumento de la población se planean estrategias para poder aprovechar el uso de aguas residuales, y para ello es indispensable tecnologías nuevas que den un resultado eficaz en cuanto a descontaminación y desinfección. Los procesos de oxidación avanzada son los candidatos perfectos para cumplir estas especificaciones de tratamiento de aguas residuales.

2.4.1 ELECTROLISIS

Proceso electroquímico en el cual se sumergen 2 electrodos en una solución acuosa llevando un potencial eléctrico que provoca la separación del hidrógeno y el oxígeno. Esto se debe a que el campo eléctrico externo (provocado por la diferencia de tensión entre los electrodos) es mayor al campo eléctrico (molecular) lo que provoca la ruptura del enlace covalente del agua (Metcalf & Eddy, 2003).

La electrolisis del agua es uno de los procesos más importantes para la producción de hidrógeno, pero existen otras tecnologías que también son utilizadas comúnmente en la industria. Las más comunes son (Metcalf & Eddy, 2003):

- Reformado por vapor del gas natural.
- Descomposición catalítica del gas natural.

- Oxidación parcial de aceites pesados.
- Gasificación del carbón.
- Ciclos termoquímicos puros e híbridos.
- Procesos fotoquímicos, fotoelectroquímicos y fotobiológicos.

2.4.2 ELECTRO OXIDACIÓN

La oxidación anódica (AO, Anodic Oxidation), también es llamada oxidación electroquímica (EO, Electrochemical Oxidation) o electrooxidación; es el proceso electroquímico más popular entre los procesos de oxidación avanzada, para la remoción de contaminantes orgánicos en el agua. Algunos grupos de investigación estudiaron la viabilidad de la EO para la descontaminación de aguas residuales, contribuyendo decisivamente a la determinación de las condiciones del funcionamiento para el tratamiento de efluentes reales y en algunos casos pasando de escala laboratorio a sistemas de escala piloto (APHA-AWWA-WEF., 2005).

La EO puede ser directa o indirecta, para el primer caso el contaminante se oxida directamente mediante una reacción de transferencia de carga. En cambio, en la EO indirecta el contaminante se oxida gracias a la acción de especies oxidantes formadas durante la oxidación del agua en el ánodo. El ánodo puede ser de diferentes materiales y su naturaleza condiciona en gran medida la eficiencia del proceso. Los electrodos se pueden englobar en dos grandes grupos: activos y no activos.

Para que un electrodo sea activo, el potencial anódico tiene que sobrepasar al potencial de formación del O^2 ($E^\circ = 1.23V$ vs SHE) para reaccionar con los OH fisiadsorbidos, dando lugar a superóxidos quimiadsorbidos. Estos superóxidos

poseen menor poder oxidante, lo que da lugar a que el contaminante inicial se degrade sólo hasta ácidos carboxílicos de cadena corta (AOCC).

Los electrodos no activos o inactivos (PbO_2 , SnO_2 BDD); diamante dopado con boro se les considera así porque los radicales fisiadsorbidos permanecen estables lo que permite su disponibilidad para lograr la completa mineralización del contaminante.

Se considera que los electrodos no activos no participan de modo directo sino sólo de sumidero final que dan origen a procesos de conversión y combustión, y esto en base al modelo propuesto por Comninellis de electrodos activos y no activos.

Cuando se trata de una conversión, el contaminante se degrada hasta e implica el uso de ánodos activos. Sin embargo, en las combustiones (ánodos no activos) el contaminante inicial se degrada hasta (CO_2 y H_2O) y otros productos inorgánicos. Gracias a la elevada resistencia a la corrosión, baja capacidad de adsorción, así como también su elevado sobrepotencial de desprendimiento de O_2 se ha observado que el ánodo de BDD es el ánodo no activo que da lugar a una mineralización del contaminante de manera más eficiente.

La literatura hace mención que la formación del OH depende de los parámetros y propiedades electrocatalíticas de los materiales usados, ya que, en la mayoría de las ocasiones, los ánodos tienen impurezas en la superficie que afectan el desempeño del electrodo. Por lo tanto, será importante tener en cuenta la condición inicial del electrodo usado durante todo el proceso que se esté realizando. Como ya se ha mencionado, los procesos más comunes para el tratamiento de aguas residuales no solucionan el problema de la desinfección del agua, más sin embargo los procesos de oxidación avanzada como lo son la oxidación anódica y fotocatálisis sí atacan el problema que pueda haber de

eliminación de patógenos dentro del agua, esta es una ventaja hacia los procesos actuales de tratamiento de aguas residuales.

2.4.2 ELECTROCOAGULACIÓN

La electrocoagulación es una técnica utilizada desde hace mucho tiempo y principalmente su uso se basa en el tratamiento de las aguas residuales. Los contaminantes son removidos mediante el principio de coagulación, sin embargo, difiere de la definición normal, ya que no se hace uso de algún coagulante químico si no de una corriente eléctrica que se aplica en un medio líquido contaminado (Holt & Barton).

La electrocoagulación es un proceso de desestabilización de partículas de contaminantes que se encuentren suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados.

Su configuración básica consiste en una celda electrolítica con un ánodo y electrodos metálicos de cátodo (pueden ser el mismo material) conectados externamente a una fuente de alimentación de CC y sumergidos en la solución a tratar. Los electrodos de hierro y de aluminio son los metales utilizados más ampliamente para las celdas de EC (electrocoagulación), ya que estos metales son accesibles, no tóxicos y confiables.

El ánodo sirve como coagulante en una celda de EC, donde se disocia para dar cationes metálicos cuando se pasa DC (corriente directa) a través de la celda (Muftah H. El-Naas, 2016). La disociación del ánodo sigue la ley de Faraday dada por:

$$m = ItMw / zF \dots [2]$$

Donde:

I es la corriente (A)

t es el tiempo de operación (s)

Mw es el peso molecular (g/mol)

F es la constante de Faraday (96,485 C/mol)

z es el número de electrones involucrados en la reacción

m es la masa del ánodo disuelto (g).

El proceso de electrocoagulación se conoce por ser un proceso no destructivo, sin embargo, se puede evaluar su grado de descontaminación de manera general:

$$Esc = \frac{E_{cell} \cdot I \cdot \Delta t}{1,000 \cdot V \cdot \Delta DQO} \dots [3]$$

Dependiendo del pH de la solución y del potencial, el hierro puede formar cationes divalentes o trivalentes. Por otra parte, el aluminio sólo se disuelve como cationes trivalentes. Utilizando los diagramas E-pH de hierro y aluminio, los compuestos estables de cada uno podrían predecirse en diferentes condiciones (Qingji Xie, 2013).

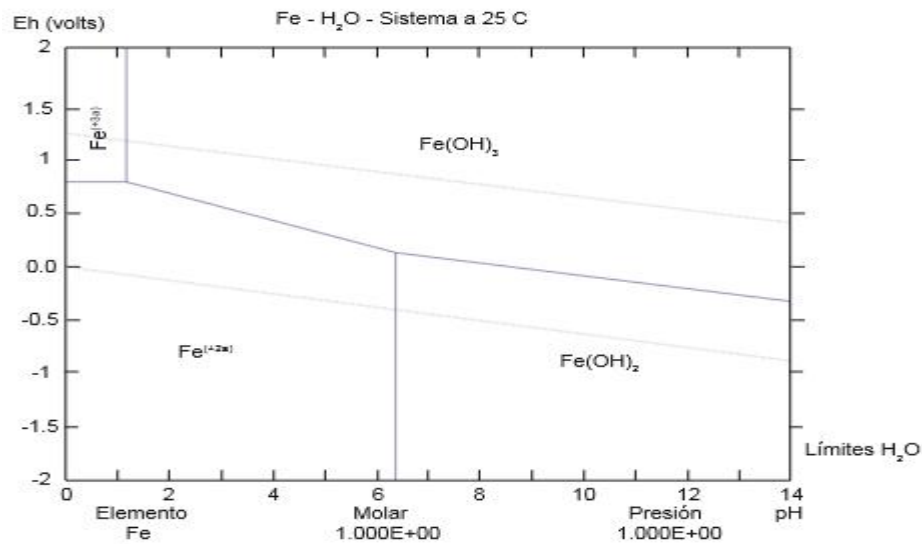


Ilustración 5: Diagrama de E-pH para Fe a 25 C°.

Fuente: Qingji Xie, 2013.

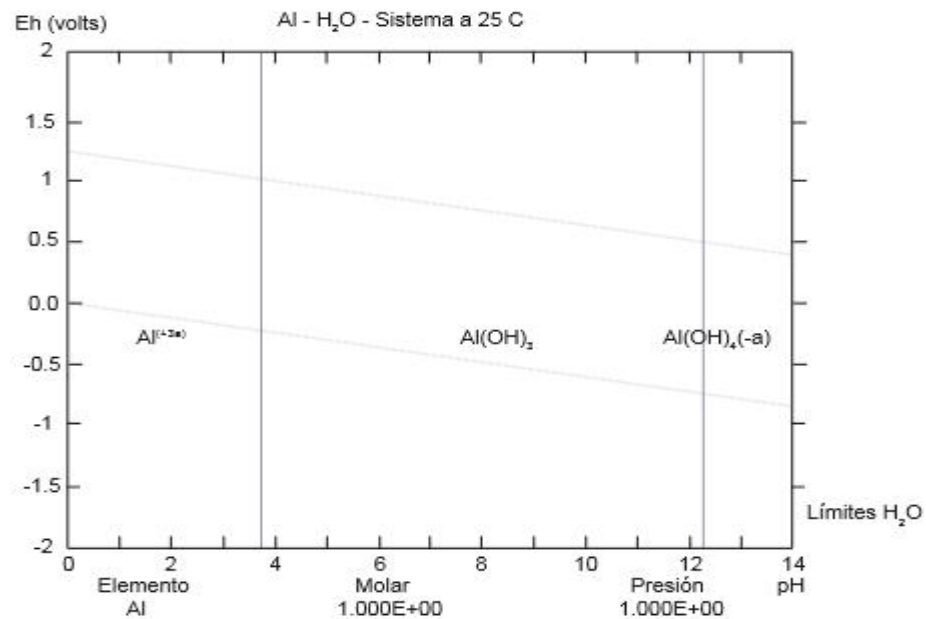


Ilustración 6: Diagrama de E-pH para Al a 25 C°

Fuente: Qingji Xie, 2013.

De manera más detallada, el proceso se efectúa por las cargas eléctricas sobre la superficie de las partículas y la estabilidad que pueden tener dependerá de las fuerzas de interacción de las partículas. La esencia de la electrocoagulación se puede expresar de dos maneras, la primera es cuando las fuerzas repulsivas son dominantes, el sistema permanece disperso. La segunda cuando las fuerzas de atracción son dominantes, las partículas coagulan o fluctúan y tienden a desestabilizarse. Esta suspensión y estabilidad de las partículas coloidales en el agua se atribuye al hecho de que tienen una carga similar (normalmente negativa) de modo que se repelen entre sí y permanecen suspendidas (Qingji Xie, 2013).

Como lo podemos analizar en la ilustración 7, con el fin de poder neutralizar la carga de las partículas, las partículas de una carga inversa se utilizan para ser atraídas a la superficie de los coloides y formar una doble capa eléctrica.

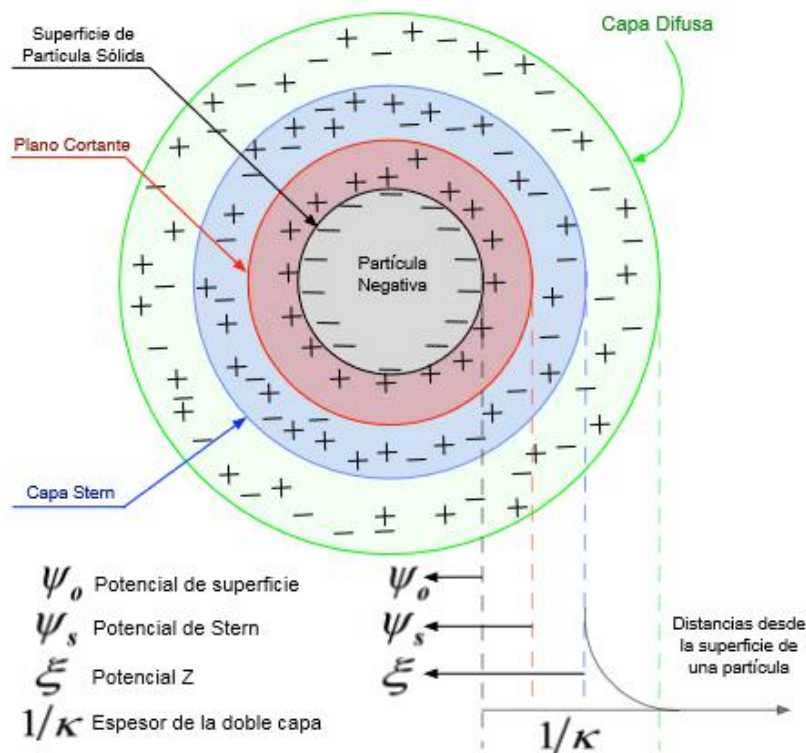


Ilustración 7: Doble capa eléctrica.

Fuente: Qingji Xie, 2013.

La doble capa eléctrica consiste en una región interna (capa de Stern), donde los iones cargados de forma opuesta se unen estrechamente a la superficie de las partículas coloidales y forman una capa externa, que provoca que los iones se muevan libremente debido a la difusión (capa difusa de iones o plano de deslizamiento). La interfaz de las capas interna y externa se conoce como la superficie de corte que define el límite exterior de la capa de Stern (Vepsalainen, 2012).

El potencial máximo ocurre en la superficie de la partícula coloidal y se conoce como el potencial de Nernst, donde disminuye a través de la capa de Stern debido

a la presencia de partículas cargadas de forma opuesta que resulta en lo que se define como el potencial Zeta, medido en la superficie de corte.

El potencial Zeta es la razón principal de la estabilidad del sistema coloidal, ya que representa la diferencia de carga eléctrica entre las capas primera y segunda que da una indicación del grado de repulsión entre las partículas coloidales que llevan la misma carga (Gheraout, 2011).

Cuanto mayor sea el valor del potencial Zeta, mayor será la magnitud de la repulsión entre las partículas y consecuentemente más estable será el sistema coloidal. La corriente suministrada proporciona la fuerza necesaria para provocar una serie de reacciones químicas y cuando esto ocurre los contaminantes forman especies hidrofóbicas que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario (Gheraout, 2011).

El proceso de EC está influenciado por varios parámetros operativos, como la corriente, el pH inicial y el tiempo de electrólisis.

El pH es uno de los parámetros más importantes que influyen en el rendimiento de la CE, sin embargo, debido a los cambios de pH durante el proceso, es importante determinar el pH de precipitación óptimo para cada contaminante en particular. Luego, la eficiencia de eliminación de contaminantes disminuye al aumentar o disminuir el pH de la solución desde el pH óptimo.

CAPÍTULO III. ESTADO DEL ARTE

Actualmente, los procesos para poder analizar las aguas residuales son múltiples, aunado a ello, existen características similares en estos procesos pero lo que los hace únicos, son las propiedades de cada agua residual.

Como sabemos, esta investigación esta enfocada para las aguas con alta carga orgánica de la industria del beneficiado del café, con características fisicoquímicas únicas y con una carga orgánica única, pero para poder saber más diferencias se analizaron diversas aplicaciones de acuerdo con los métodos para analizar dichos residuos líquidos.

3.1. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

Diferentes autores han realizado diversas investigaciones en donde ponen a prueba el método de electrocoagulación para distintos tipos de aguas residuales, en todos los casos existe una remoción exitosa de la materia orgánica, a continuación, una descripción de los trabajos relacionados más relevantes:

Ivonne Linares Hernández et al. 2016 implementó un sistema acoplado, un proceso de Electrocoagulación (EC) - Electrooxidación (EO) monopolar, para el tratamiento de aguas residuales de refrescos. En el proceso de electrocoagulación se obtuvo un 85 % de remoción de DQO con un consumo de energía de 6.6 KWh/kg

Hicham Zazoua et al. 2019 evaluó el proceso de electrocoagulación en efluentes reales, que contienen una mezcla de colorantes reactivos (principalmente azul de metileno), mediante electrocoagulación (EC) acoplada a procesos electroquímicos de oxidación avanzada (EAOPs) como peroxi-coagulación (PC), oxidación anódica (AO), y electro-Fenton (EF), individualmente. Para elegir el proceso de tratamiento

adecuado, los criterios clave deben ser una mayor eficiencia de degradación y un consumo mínimo de energía.

A.K. Darban et al. 2020 revisó la literatura más relevante publicada recientemente. Los principales desafíos asociados con el proceso de electrocoagulación son la pasivación de electrodos y el consumo de energía. Determinó que la electrocoagulación en comparación con otros métodos comunes tiene ventajas como la reducción del consumo de energía y la reducción de los costos operativos.

P.V. Nidheesh et al. 2020 evaluó el proceso de electrocoagulación (EC), se considera un tratamiento eficaz para aguas residuales, ya que puede eliminar una variedad de contaminantes, y es capaz de manejar las fluctuaciones en la calidad y cantidad de contaminantes. El desempeño de del proceso de electrocoagulación se puede mejorar significativamente en combinación con los procesos de degradación.

Mikko Vepsäläinen et al. 2020 evaluó el proceso de electrocoagulación y coagulación química convencional, así como las reacciones secundarias adversas, como la deposición de sales en la superficie del electrodo, que pueden provocar el deterioro de la eficacia de eliminación después de un funcionamiento prolongado. Como en el caso de la coagulación química con sales metálicas, los cationes e hidróxidos de aluminio o hierro son los compuestos activos en EC. La coagulación química y la EC tienen mecanismos de desestabilización fundamentalmente similares y, por lo tanto, es importante analizar la teoría de la desestabilización coloidal con coagulantes de sales metálicas, porque la coagulación química se ha estudiado más extensamente que la EC.

Amina Tahreen et al, 2020 revisaron los estudios recientes sobre los avances de la EC en varios tipos de aguas residuales. Se evaluaron las variables operativas

que son vitales para la EC y la relación fundamental de la EC con la coagulación química convencional, ya que son los factores principales que gobiernan el mecanismo de eliminación de contaminantes del proceso. Por lo tanto, EC necesita más estudios para la optimización de sus parámetros de proceso y modelado para escalar a nivel industrial.

José de Jesús Treviño-Reséndez et al. 2021 realiza una evaluación de las más recientes técnicas de tratamiento de aguas residuales por métodos electroquímicos. Con especial énfasis en la electrocoagulación y la electro-oxidación. Es una revisión de las técnicas mencionadas y de su reciente faceta como técnicas consolidadas para el tratamiento de aguas residuales.

CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

La hipótesis de la presente investigación explora la reducción en la DQO y la cantidad de materia orgánica en las aguas residuales de la industria del beneficiado de café utilizando el método de electrocoagulación. A continuación, se presenta la aplicación de la metodología de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales.

4.1 CONFIGURACIÓN DE LA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN

El reactor utilizado para realizar la electrocoagulación en una operación por batch, en su forma más simple, está formado por una celda electroquímica con un ánodo y un cátodo dispuestos en forma vertical y conectados a una fuente de energía externa. El material anódico se corroe eléctricamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo permanece pasivo.

El diseño formado por un par de electrodos no es el más adecuado a la hora del proceso ya que para obtener una rata adecuada de disolución del metal se requiere de electrodos de gran área superficial, es por esta razón que se utilizan celdas con electrodos monopolares en paralelo o conectados en serie. El sistema para la electrocoagulación requiere de una fuente de corriente directa, un regulador de densidad de corriente y de un multímetro para leer los valores de corriente.

En la ilustración 8, se muestran dos reactores para electrocoagulación con electrodos en paralelo.

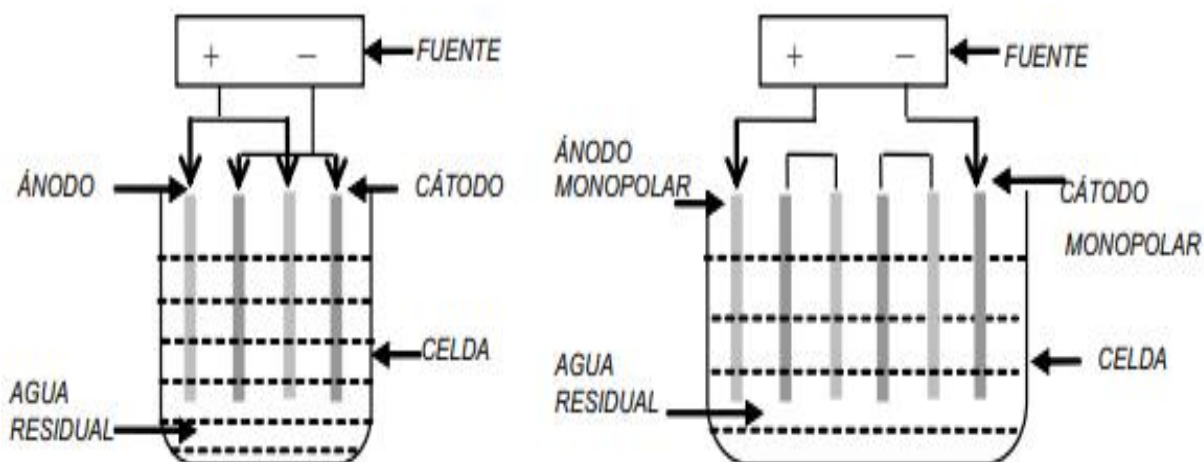


Ilustración 8: Reactores para electrocoagulación tipo bach: (a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo, (b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 RECOPIACION Y ANALISIS DE LA INFORMACION

En esta etapa se a la recopiló información de trabajos afines a la investigación, mismos que luego de ser estudiados y analizados se utilizaron como referencia para el presente trabajo, cabe destacar de que a pesar de que los métodos de tratamientos de aguas residuales electroquímicos y en específico el método de electrocoagulación son métodos que se han estudiado e investigado, los estudios que muestran su efectividad en la industria donde las aguas residuales contienen una alta carga de materia orgánica como en el caso que nos ocupa, son realmente recientes y representan una oportunidad de innovación.

4.3 OBTENCION Y CARACTERIZACION DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las muestras de agua residual fueron obtenidas en el mes de Diciembre del 2021 (corresponden a la época de cosecha) en el ubicado Municipio de Chocamán,

Veracruz. (con coordenadas: Latitud 19°0'32.295" (Norte) Longitud 97°1'15.968" (Oeste)).

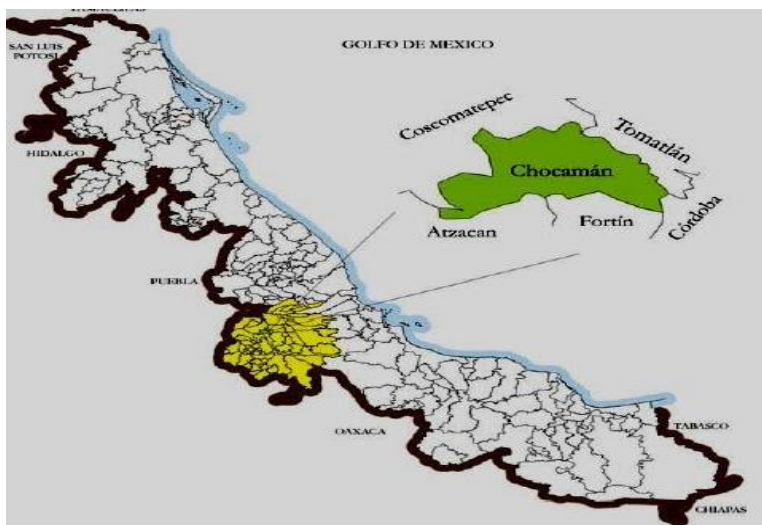


Ilustración 9: Municipio proveedor de Aguas residuales de Café.

Fuente: Google maps

Para el desarrollo de dicha investigación se procedió a visitar diversos beneficios localizados dentro del municipio para brindar una mejor veracidad en los resultados obtenidos, por lo que se decidió realizarlo de manera aleatoria considerando el área del beneficio húmedo de cada beneficio.



Ilustración 10: Depulpadora de café del beneficio “Catuai Amarillo”.

Fuente: Elaboración propia.

Se recolectaron 10 garrafones de acuerdo con los beneficios propuestos, como podemos ver en la ilustración 11, cada uno mantiene la capacidad de 11 litros cada uno (110 litros en total), los cuales fueron transportados a un cuarto de refrigeración ubicado en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana, para ser preservados a una temperatura de 4 °C, hasta su uso.



Ilustración 11: Muestras del agua del área de despulpado
Fuente: Elaboración propia.

4.3.1 CARACTERIZACION DE LAS AGUAS RESIDUALES

Una vez que se lograron recopilar las muestras necesarias para el estudio, las muestras fueron analizadas para determinar sus características fisicoquímicas y poder compararlas entre sí. Las determinaciones realizadas fueron DQO, pH, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales y turbidez (midiendo absorbancias a 620 nm).

La caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos considera una evaluación de los siguientes aspectos:

Físicos	Unidad	Método
pH		Potenciométrico
Sólidos Suspendedos Totales	% m/m	Standard Methods 2540 D
Sólidos Totales Volátiles	% m/m	2540 E SM
Químicos	Unidad	Método
DQO	mg/L	Standard Methods 5220D
Microbiológicos	Unidad	Método
Coliformes fecales	NMP/g ST	1. M

Tabla 1: Parámetros de caracterización de aguas residuales.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describen cada una de estas características:

- **PH**

El pH es el parámetro que indica la concentración de iones hidrógeno en una disolución, este parámetro se midió de forma directa en la muestra con un potenciómetro Orión 250a, el cual se calibró con soluciones tampón 4.0 y 7.0, la resolución de la lectura es de 0.01 unidades de pH y la precisión es de ± 0.01 .

- **SÓLIDOS TOTALES**

Los Sólidos Totales se definen como el material residual después de evaporación y secado de una muestra a cierta temperatura, esta determinación se realizó mediante la técnica gravimétrica descrita en el método estándar 2540 G de la APHA-AWWA-WPFC (1999). Se evapora la

muestra en un crisol a peso constante en una estufa a 103-105°C por un lapso de 24 horas. El aumento de peso sobre el peso del crisol vacío representa los Sólidos Totales; y el cálculo se realiza con la siguiente ecuación:

$$\% ST = [(p3-p1) / (p2-p1)] \cdot 100 \dots [4]$$

Donde:

p1= Peso del crisol a peso constante.

p2=Peso del crisol a peso constante + peso de la muestra antes de evaporación.

p3=Peso del crisol a peso constante + peso del residuo seco.

- **SOLIDOS VOLATILES**

El residuo producido en la determinación de Sólidos Totales según el método descrito anteriormente se calcina a 550°C, durante dos horas. El peso perdido en el crisol tras la incineración del residuo seco representa el contenido en Sólidos Volátiles. De la misma forma que los Sólidos Totales, esta técnica analítica se realizó de acuerdo con el método estándar 2540 G de la APHA-AWWA-WPFC (1999), y el porcentaje se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\% ST = [(p3-p4) / (p3-p1)] \cdot 100 \dots [5]$$

Donde:

p1= Peso del crisol a peso constante.

p3=Peso del crisol a peso constante + peso del residuo seco.

p4=Peso del crisol a peso constante + peso de la muestra calcinada

- **DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO**

La DQO indica la cantidad de materia orgánica que se encuentra contenida en una muestra y que es susceptible a ser oxidada o transformada en biogás por un oxidante fuerte (dicromato de potasio) en un medio potencialmente ácido (H_2SO_4).

Cada una de las muestras fue centrifugada a 5000 rpm. Durante 10 minutos, se retiró el sobrenadante y se hizo pasar a través de papel filtro WHATMAN (0.25 Milipore), a continuación, se preparó una dilución de 1:4 de cada filtrado y se tomaron 2 mL para colocarlos en los tubos de ensayo, que fueron puestos en una placa digestora a 150°C durante 2 horas, por último, las muestras fueron leídas en un espectrofotómetro HACH DR/2500 a 620 nm para su determinación. Las unidades de DQO están dadas en mg/L, se realizó una curva de calibración, la cual mostró un coeficiente de correlación (R^2) de 0.9

4.4 ESPECIFICACIONES DE LA CELDA ELECTROQUIMICA

Un reactor de electrocoagulación en su forma más simple tiene un ánodo y un cátodo, los cuales están conectados a una fuente de poder externa. Cuando el potencial es aplicado el material del ánodo es oxidado, mientras el material del cátodo es reducido. Para el diseño de una celda de electrocoagulación se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipo de operación: Batch o continuo.
- La acumulación de burbujas de O_2 y H_2 en los electrodos debe ser minimizada ya que estas incrementan la resistencia, necesitándose más energía.

- La transferencia de masa entre los electrodos debe ser óptima y para esto se debe garantizar flujo dentro del reactor.
- La conductividad de la solución y la sustancia electrolítica.
- La distancia entre electrodos.
- La geometría del electrodo.
- Geometría del reactor: influye en la formación de los flóculos, el movimiento de las burbujas y el régimen de flujo.
- Escalado del reactor: mediante los parámetros como la relación área-volumen, el número de Reynolds y la similaridad geométrica se realiza el escalamiento desde el laboratorio a la industria.
- Densidad de corriente: depende del contaminante que se desea remover y de la escala a la cual se realizará el montaje. Determina la dosificación del metal a la solución y la densidad de producción de burbujas.
- Material de los electrodos.
- Voltaje aplicado: es directamente proporcional al costo energético y puede variar por factores como la conductividad de la solución, la distancia entre los electrodos y el material o la geometría de estos.
- Tipo de la conexión eléctrica: determinan un mayor o menor gasto de energía.
 - Monopolar: los electrodos están conectados en paralelo y sometidos al mismo potencial, generando mayor gasto de energía.
 - Bipolar: solo los electrodos de los extremos están directamente conectados a la fuente, los electrodos restantes toman la polaridad opuesta al electrodo que tiene en frente.

Los ensayos se llevaron a cabo en una celda de configuración monopolar, empleando electrodos de aluminio, como se observa en la ilustración 12, debido a

que es el arreglo más adecuado para realizar un estudio inicial de las variables del proceso.



Ilustración 12: Disposición de las celdas de aluminio en el reactor.

Fuente: Elaboración propia.

Las especificaciones técnicas del equipo de acuerdo con la ilustración 13, son:

- Recipiente de vidrio con capacidad de 11 Litros para los diseños de experimentos.
- Electrodo (placas planas) de aluminio de dimensiones 9*3 cm² y con un área efectiva de reacción 13.5 cm² por electrodo para los diseños de experimentos.
- Agitador magnético.
- Fuente de corriente directa.



Ilustración 13: Configuración inicial del reactor.
Fuente: Elaboración propia.

4.5 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los criterios analizados para la determinación de las variables del proceso son descritos a continuación, de tal manera, que, con estas variables y criterios, se desarrollen los ensayos que nos brindaran los resultados de la presente investigación:

- Los ensayos preliminares se llevarán a cabo en el reactor de 11 litros de capacidad, con electrodos de Al (aluminio), manteniendo constantes el área sumergida y el voltaje, el tiempo del ensayo será de 30 minutos.
- Se tomarán muestras al comienzo y al final del ensayo para el análisis de concentración inicial y final, de DQO, por triplicado.
- Los electrodos de aluminio son utilizados para el proceso de electrocoagulación debido a que se disuelven dando origen a iones metálicos, los cuales forman hidróxidos o polihidróxidos, y son excelentes agentes coagulantes, que desestabilizan las sustancias coloidales, además, son de fácil adquisición por su relativo bajo costo y disponibilidad, por tal motivo fue el material seleccionado para realizar los ensayos preliminares.
- El voltaje es directamente proporcional al costo energético y puede variar por factores como la conductividad de la solución, la distancia entre los electrodos, el material y la geometría de estos.
- Durante los ensayos preliminares se trabajará con un voltaje constante de 10 voltios, y se realizarán variaciones de este, con el fin de determinar el efecto que tiene en la remoción de DQO y el intervalo en el cual sería evaluado durante los ensayos experimentales finales.

RESULTADOS

Caracterización del agua cruda sin tratamiento:

Las aguas residuales recolectadas al ser analizadas mediante parámetros fisicoquímicos muestran diferentes componentes en su composición, los cuales se presentan a continuación:

CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL AGUA RESIDUAL		
Nitrogeno	85	mg/l
Fosforo	26	mg/l
DQO	5774	mg/l
DBO5	4100	mg/l
Colifomres Fecales	2500	NMP
Huevos de Hemintos	0	Unidades

Tabla 2: Características iniciales del agua residual

Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar dentro de la tabla 2, se analizan las características con la que contaban las aguas residuales al inicio de la investigación, una de las características primordiales es que la sustancia en estudio es un agua atípica, puesto que mantiene un alto contenido de nutrientes como el Fosforo y Nitrógeno. Además de que esta agua residual con alta carga orgánica. La finalidad es conocer su calidad y necesidad de tratamiento para conseguir su estabilización, aunque, para fines del proyecto, se busca reducir los niveles de carga orgánica con la que cuenta nuestra agua para asimilar los criterios propuestos en la normativa.

Las principales problemáticas con las que se contaban dentro de las aguas residuales del proceso del café Catuai son, la alta concentración de materiales residuales orgánicos, así como también, la cantidad promedio de DQO y DBO.

Análisis del pH del agua residual:

Una vez llegada la muestra al laboratorio, se determinaron sus parámetros físicos, en términos de pH, los resultados indicaron valores en el rango de acidificación, puesto nos arrojaron valores que oscilan entre 5.1 a 5.5 de pH, como lo podemos analizar en la ilustración 14, donde se muestran los pH de las muestras obtenidas para el estudio.

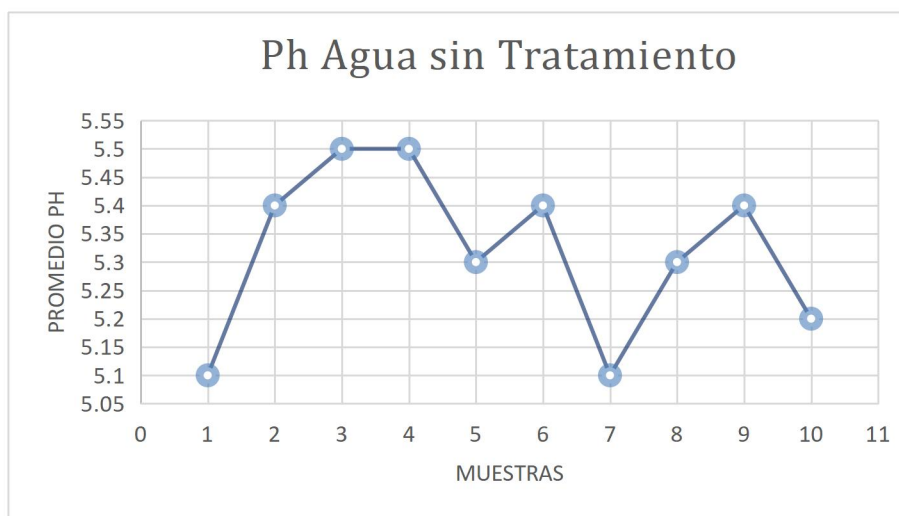


Ilustración 14: pH de Agua cruda sin tratamiento

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de la Turbidez del Agua Residual Tratada:

El principal problema que presentaban las aguas residuales del proceso del café, era la alta concentración de carga orgánica que mantenía, por lo que al someter dichas aguas a diversos pH para pasar de un estado ácido a una base y de esta manera lograr reducir la concentración de materia orgánica proveniente del proceso.

El agua residual recolectada en el beneficio de café, al ser tratada, muestra diversos resultados en su turbidez, de acuerdo con el pH aplicado a partir de la propuesta; para lo cual, por mantener un rango de acidificación en su estado crudo, se proponen implementar pH de 7, 7.5 y de 8 para analizar su comportamiento de acuerdo con los niveles de las unidades nefelométricas de turbidez (NTU).

Turbidez con pH de 7

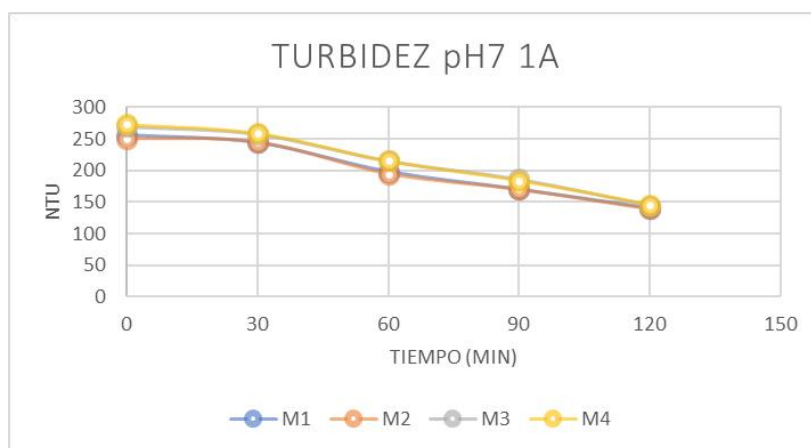


Ilustración 15: Tratamiento turbidez pH 7

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 15 se observan la concentración de materia orgánica que va disminuyendo de acuerdo con el paso del tiempo, en donde tras someter a un pH de 7 durante 120 minutos logra reducir hasta 139 unidades nefelométricas de turbidez (NTU) en la muestra M2, logrando así, disminuir considerablemente la cantidad de carga orgánica.

Para validar los resultados y para comparar las diferencias entre los tratamientos, se realizó un análisis de varianza (Anexo B) para la cantidad de carga orgánica dentro del agua residual. El factor con una dosis de pH 7 se tuvo una F calculada

de 0.133, lo cual demuestra que el factor de cambio de pH es significativo en la disminución de NTU en la muestra.

Turbidez con pH de 7.5

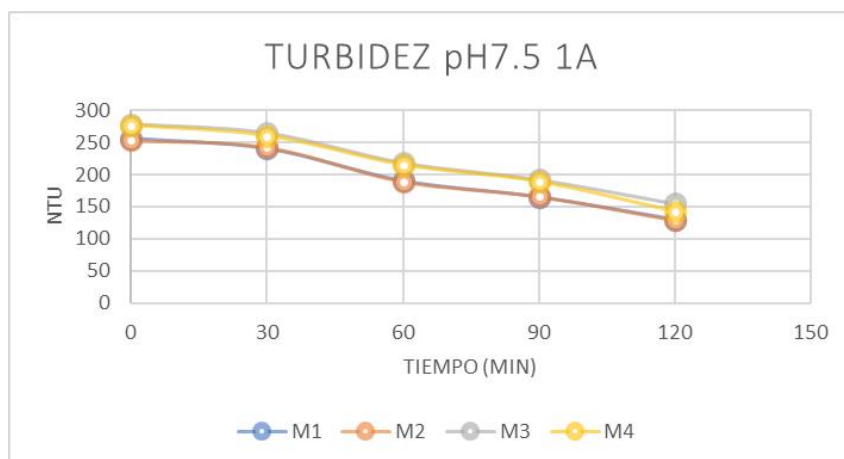


Ilustración 16: Tratamiento turbidez pH 7.5

Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar, dentro de la ilustración 16, nos brinda un panorama de la aplicación de un pH de 7.5 a las muestras recabadas con un pH promedio de 5.5, con la finalidad de contrarrestar las unidades de turbidez por al alta carga orgánica, logrando disminuir aun mas la M2 hasta 129 NTU.

Los resultados se validaron a partir de la comparación de las diferencias entre las medias de los tratamientos, donde se realizó un análisis de varianza (Anexo B) para la verificar la cantidad de carga orgánica observada dentro del agua residual. En este caso el factor fue de una dosis de pH de 7.5, con lo cual la F calculada fue de 0.33, lo cual demuestra que el factor de cambio de pH es significativo en la disminución de NTU de manera específica en la muestra M1 y M2.

Turbidez con pH de 8

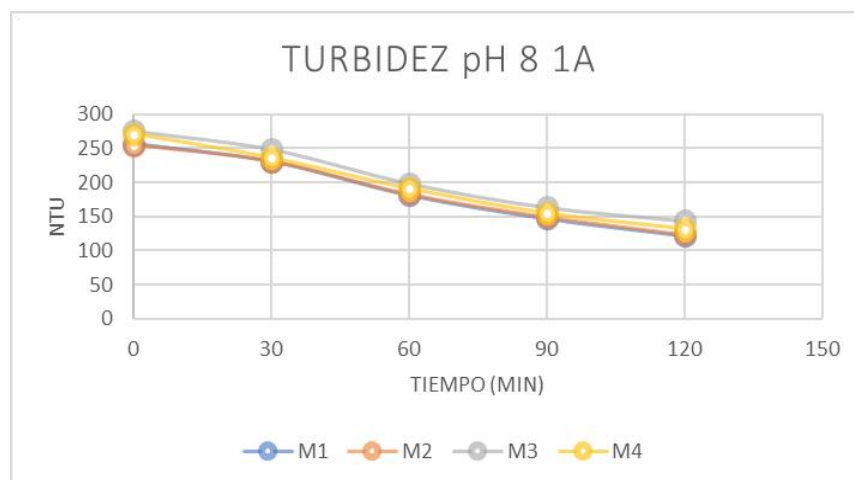


Ilustración 17: Tratamiento turbidez pH 8

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 17 se observan la concentración de materia orgánica que va disminuyendo de acuerdo con el tiempo, en donde tras someter las muestras a un pH de 8 durante 120 minutos se logra reducir hasta 122 y 124 unidades nefelométricas de turbidez (NTU) en las muestras M1 y M2 respectivamente, logrando así, disminuir considerablemente la cantidad de materia orgánica del agua residual.

Dichos resultados se validaron a partir de la comparación entre las diferencias de las medias de los tratamientos, donde se realizó un análisis de varianza (Anexo B) para la verificar la cantidad de NTU observada dentro del agua residual. En este caso el factor fue de una dosis de pH de 8, con lo cual la F calculada fue de 0.33, lo cual demuestra que el factor de cambio de pH es altamente significativo en la disminución de NTU de manera específica en la muestra M1, M2 y M4.

Por último, el análisis estadístico realizado para las muestras de agua residual a partir de la aplicación de concentración de pH, fue satisfactoria al brindar una reducción en la alta cantidad de unidades nefelométricas de turbidez con la que

contaba el agua tratada. A partir de este análisis, se logra concluir que para que se reduzca la acides del agua residual propuesta, se debe buscar la base en el pH.

Análisis del DQO del agua tratada:

Esta etapa, comprende el análisis de los resultados obtenidos a partir de las muestras respecto al factor de cambio y la variable del DQO, con lo cual, se lograron obtener los siguientes datos para la toma de decisiones de acuerdo con cada escenario en comparación con el DQO inicial del agua cruda que era de 5774 mg/L.

DQO con pH de 7

Al aplicar el factor de un pH de 7, se logra observar a partir de la ilustración 18, las muestras propuestas a partir del tratamiento en 120 minutos, se logra disminuir la demanda química de oxígeno hasta 1510 mg/L dentro de la muestra M2, generando un gran impacto para el agua en estudio.

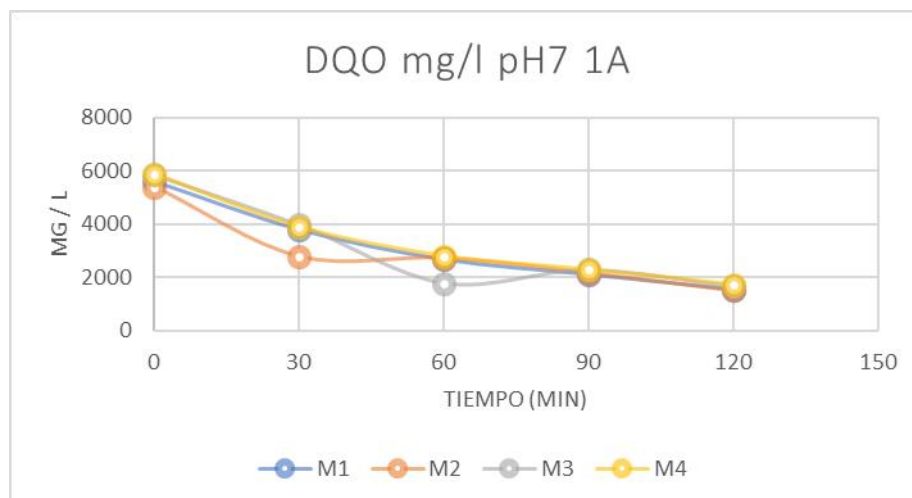


Ilustración 18: Tratamiento DQO pH 7

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados se validaron a partir del diseño experimental análisis de varianza y la prueba de Duncan (Anexo C), en donde se logra generar una F calculada de 0.5, con lo cual comprobamos estadísticamente que las medias de las muestras son similares, por lo que, el DQO obtenido es el mínimo que se puede observar en las muestras del agua residual con el factor propuesto.

Esta información, se puede comparar con la prueba de Duncan, en donde las muestras de acuerdo con sus medias son no significativas por la cantidad de DQO existente al finalizar el tratamiento.

DQO con pH de 7.5

En este experimento, el factor del pH se modifica, ahora se trabajo con un pH de 7.5, con el cual se realizaron pruebas experimentales del análisis de la varianza para validar los resultados, de tal manera, que en la ilustración 19 se logra apreciar una disminución mayor al pasar un tiempo de 120 minutos, con lo cual se alcanzan los 950 mg/L a partir de la muestra M1.

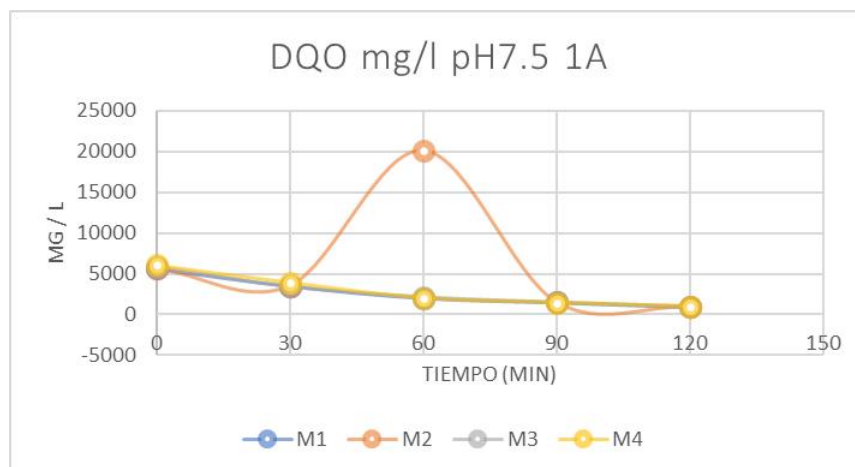


Ilustración 19: Tratamiento DQO pH 7.5

Fuente: Elaboración propia

El tratamiento químico, se comprobó de manera estadística, a partir del análisis de varianza y la prueba de Duncan (Anexo C), en donde la F calculada fue de 0.85, por lo que podemos decir con un 95% de confianza que las medias de las muestras son similares en cantidad de DQO al ser tratadas con un pH de 7.5; y además la prueba de Duncan nos dice que la comparación entre las medias de las muestras no es significativa para el tratamiento respecto a la mínima cantidad de demanda de oxígeno.

DQO con pH de 8

Al aplicar el factor de un pH de 8, se logra observar a partir de la ilustración 20, las muestras propuestas a partir del tratamiento en 120 minutos, se logra disminuir la demanda química de oxígeno hasta 489 mg/L dentro de la muestra M1, generando un gran impacto para el tratamiento del agua en estudio.

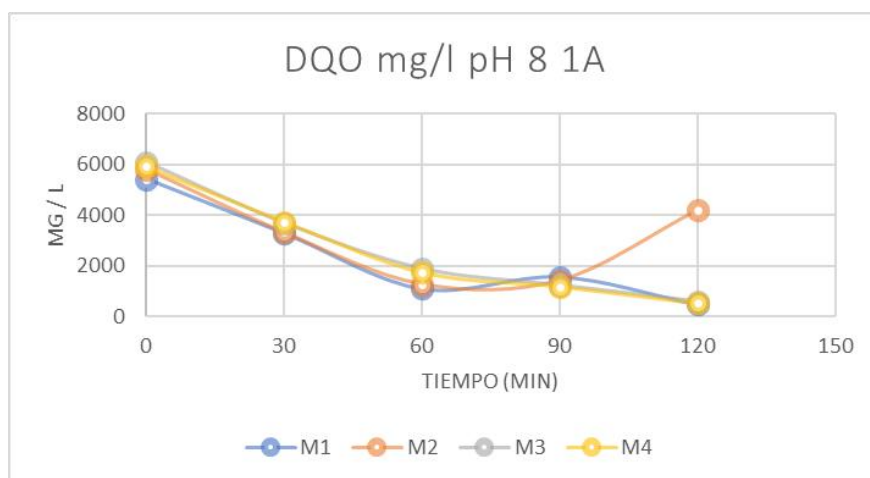


Ilustración 20: Tratamiento DQO pH 8

Fuente: Elaboración propia

Los valores resultantes se validaron a partir del análisis de varianza y la prueba de Duncan (Anexo C), en donde se logra generar una F calculada de 0.14, con lo cual comprobamos estadísticamente que las medias de las muestras son similares, por lo que, el DQO obtenido es el mínimo que se puede observar en las muestras del agua residual con el factor del pH de 8.

Estos valores se compararon con la prueba de Duncan, en donde las muestras de acuerdo con sus medias son no significativas por la cantidad de DQO existente al finalizar el tratamiento del agua residual.

Finalmente, este análisis mantiene la misma tendencia que el anterior, al lograr identificar que con un pH de entre 7.5 a 8 se logra un mejor tratamiento del agua residual, de manera más específica, al erradicar al máximo la cantidad de carga orgánica con la que se contaba y mantener un DQO al mínimo de acuerdo con la contaminación encontrada.

Análisis del DBO del agua tratada:

Una vez identificado el factor con mayor representatividad para brindar mejoras en las muestras de agua propuestas, un factor mas que nos interesa analizar es el DBO como valor que nos indica la cantidad de oxígeno disuelto a partir de la aplicación del factor de cambio para la degradación de materia orgánica mantenida en las aguas residuales.

El factor que mayormente reduce en DQO a partir de la descontaminación del agua residual propuesta es el pH de 7.5 a 8, y es por ello que para este criterio nos enfocaremos en las muestras obtenidas del DBO a partir de la aplicación de la solución de pH 8.

DBO5 pH8 1A				
Tiempo (min)	M1	M2	M3	M4
0	4256	4120	3989	4037
30	2189	1926	1237	2105
60	1539	1429	1745	1489
90	890	829	978	736
120	318	278	307	298

Tabla 3: Tratamiento DBO5 con pH 8

Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar en la tabla 3, los valores obtenidos a partir de la aplicación del factor de pH 8, para el caso del DBO5, se puede analizar que en las muestras M2 y M4, logra reducirse mejor la cantidad de contaminación del agua residual y a la par la cantidad de oxígeno disuelto.

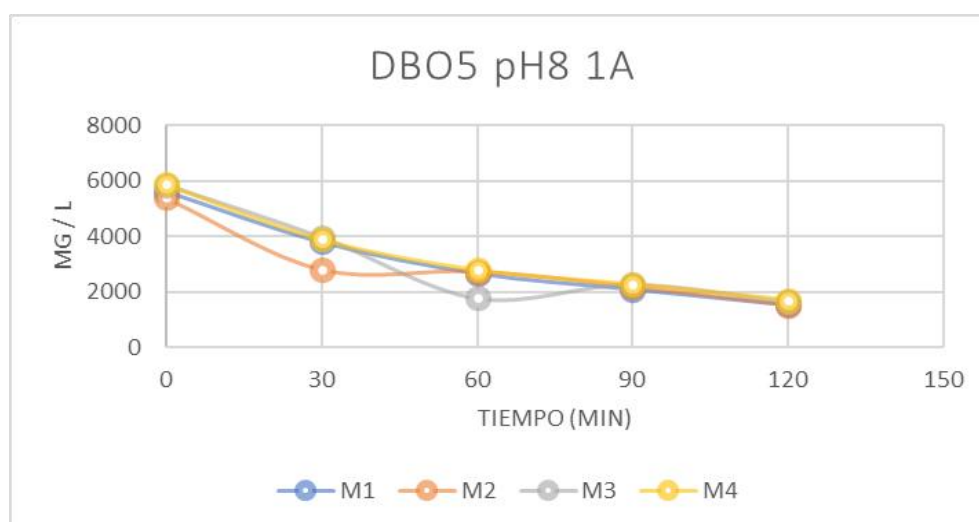


Ilustración 21: Tratamiento DBO5 con pH 8

Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 21, logramos apreciar gráficamente los cambios en el DBO5 dentro de las muestras de agua residual tomadas, en donde la media de acuerdo

con el agua cruda propuesta era de 4100.5 mg/L y al colocar el reactor de pH 8 se reduce.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demostraron que el agua residual del proceso del café se puede desinfectar a partir de la electrocoagulación, con los que se pueden reducir concentraciones elevadas de microorganismos (carga y materia orgánica), las unidades nefelométricas se reducen cuando la concentración de pH logra tornarse de ácido a base, debido a que este factor ayuda a combatir las altas cargas orgánicas encontradas y al mismo tiempo se logra reducir la cantidad de DQO y DBO de las mismas.

El incremento del pH en la concentración de las muestras, logran generar una descomposición de las sustancias orgánicas con las que el agua residual cuenta, de tal manera que incrementó de este factor genera la remoción de bacterias. El pH alcanzado por las muestras para su tratamiento fue de 8, logrando así una limpieza óptima en estas condiciones de agua residual.

El tiempo de contacto recomendado para el proceso de electrocoagulación fue de 2 horas en el cual se identifican significativamente las cargas orgánicas presentes en las aguas residuales, lo cual, hace que el proceso de tratamiento electroquímico del agua sea rápido hasta completar en su totalidad la reducción de materia orgánica.

Los resultados obtenidos en la etapa experimental fueron positivos, de tal manera que, el tratamiento aplicado a partir del factor del pH de 8 logro reducir la cantidad de sustancias y materia orgánica en un 93 % de acuerdo al DBO que se redujo hasta 300.25 mg/L en la muestra del agua tratada de un DBO inicial de 4100.5 mg/L que mantenía el agua recolectada.

Finalmente, se logra el objetivo de la investigación, puesto que el agua analizada, es una sustancia atípica al mantener una alta carga orgánica y el aporte científico al analizarse brinda conocimiento en el estudio de este tipo de aguas residuales.

FUENTES DE INFORMACIÓN

- Bayramoglu, M. (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. . *In: Separation and Purification Technology*. , 37, 117–125.
- Bermúdez R., D. E. (1999). Tecnología Integral de tratamiento Anaeróbico de los residuales del beneficio de café para la obtención de biogás. Informe Técnico de Proyecto Nacional de Energía. *Universidad de Oriente de Cuba*.
- Bertrand B., P. V. (2006). Comparison of bean biochemical composition and beverage quality of Arabica hybrids involving Sudanese-Ethiopian origins with traditional varieties at various elevations in Central America. *Tree Physiology*, 1239-1248.
- Crini G, L. E. (2009). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. . *Environ Chem Lett.*, 145-155. doi:10.1007/s10311-018-0785-9.
- Crites, R. y. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Mc Graw Hill.
- DaMatta F. M., P. C. (2007). Ecophysiology of coffee growth and production. . *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19:485-510.
- Escamilla E., O. R. (2005). El agroecosistema café orgánico en México. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*, 76:5-16.
- Espinosa-Solares T., J. G.-C.-L.-M. (2005). Raw coffee processing yield affected more by cultivar than by harvest date. *The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico* , 89:169-180.
- Gatzweiler, H. L. (2005). The economic value of coffee (*Coffea arabica*) genetic resources. . *Ecological Economics* , 60:176-185.
- Gheraout, D. N. (2011). A review of electrocoagulation as a promising coagulation process for improved organic and inorganic matters removal by electrophoresis and electroflotation. *Desalination water Treat.* , 28, 287-320.
- Hernández, J., & Hidalgo, G. (2000). Evaluación de 3 metodologías para reducir los niveles de Contaminantes en efluentes de tratamiento primario de las aguas residuales del procesamiento de café en costa rica. *Universidad EARTH. Costa Rica*, 85.
- Holt, P. K., & Barton, G. W. (s.f.). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. . *In: Chemosphere.* , 59, 355–367.
- Kapalka, A. J. (2010). Direct and mediated electrochemical oxidation of ammonia on boron-doped diamond electrode. . *Electrochemistry Communications.*, 12(12): 1714–1717.

- Mburu, J. T. (1994). The characterization of wastewater from coffee processing factories in Kenya. . *Kenya Coffee* 59, 1757-176.
- Metcalf & Eddy, I. (2003). *Wastewater engineering : treatment and reuse*. Mc Graw Hill.
- Muftah H. El-Naas, D. T.-M. (2016). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. . *Environmental management* , 1-8.
- Orozco, C. B. (2005). Evaluación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café: características químicas. *Higiene y Sanidad Ambiental*.
- Ortega, M. (2010). Creación de un beneficio de café, en la congregación de El Tronconal, Ver., para comercializarlo en café pergamino. *Colección Parcela Digital*.
- Peña MED La, D. J. (2013). Tratamiento de aguas residuales en México. *Nota Técnica #IDB-TN-521*, 42.
- Pérez MB, S. J. (2006). Los conflictos por agua en México. Diagnóstico y análisis. *Gestión y política publica.*, 15(1):111-143.
- Perrone D., A. F. (2008). Comprehensive analysis of major and minor chlorogenic acids and lactones in economically relevant Brazilian coffee cultivars. . *Food Chemistry*, 106:859-867.
- Powell Water, S. (2001). *Powell Electrocoagulation: Sustainable Technology For the Future*. Colorado.
- Pujol R., Z. L. (2001). Estudio de Impacto Ambiental del Cultivo y Procesamiento del Café. Programa de desarrollo urbano sostenible. . *Sistema Nacional para el Desarrollo sostenible*.
- Qingji Xie, C. Q. (2013). Amperometric sensing of nitrite based on electroactive ferricyanidepoly (diallyldimethylammonium) alginate composite film. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 3.
- Rodríguez-tapia L, M. Y.-t.-a. (2020). Tecnología del agua en la industria papelera en el Valle de la Cuenca Mexicana. 31-39.
- Sotolongo, J. A. (2000). Impacto ambiental de los residuales de café sobre las principales cuencas de interés económico y social de la provincia Guantánamo. . *Soluciones energéticas y medioambientales. Tecnología Química.*, 76-77.
- Steiger D. L., C. N. (2002). AFLP analysis of genetic diversity within and among *Coffea arabica* cultivars. . *Theoretical and Applied Genetics*, 105:209-215.
- Tuomela, T. S. (2005). The interplay of different levers of control: A case study of introducing a new performance measurement system. *Management Accounting Research*.
- Wise, C. M. (2005). Revaluing Peasant Coffee Production: Organic and Fair Trade Markets in Mexico. . *Global Development and Environment Institute. Tufts University.*, 57.

ANEXOS

ANEXO A: Factores de Conversión al Sistema Internacional

Para convertir de	a	Multiplicador:
barrel, petróleo	Metro ³ (m ³)	1.58987 E - 01
Btu	joule (J)	1.05505 E +03
Btu/lbm. °F (capacidad calorífica)	joule/kilogramo.kelvin (J/kg.K)	4.18680 E +03
Btu/hora	watt (W)	2.93071 E - 01
Btu/ft ² .hr. °F (coef. transf. de calor)	joule/metro ² .seg.kelvin (J/m ² .s.K)	5.67826 E +00
Btu/ft ² .hr. (flujo de calor)	joule/metro ² .seg (J/m ² .s)	3.15459 E +00
Btu/ft.hr. °F (conductividad térmica)	joule/metro.s eg.kelvin (J/m.s.K)	1.73073 E +00

caloria	joule (J)	4.18680 E +00
cal/g.°C	joule/kilogramo.kelvin (J/kg.K)	4.18680 E +03
centímetro (cm)	metro (m)	1.00000 E - 02
cm de mercurio (0 °C)	pascal (Pa)	1.33322 E +03
cm de agua (4 °C)	pascal (Pa)	9.80638 E +01
centipoise (cp)	pascal.seg (Pa.s)	1.00000 E - 03
centistoke	metro ² /seg (m ² /s)	1.00000 E - 06
grado Fahrenheit (°F)	kelvin (K)	tk=(tf + 459.67)/1.8
grado Rankine (°R)	kelvin (K)	tk = tr/1.8
dina	newton (N)	1.00000 E - 05
erg	joule (J)	1.00000 E - 07
farad (intl. 1948)	farad (F)	9.99505 E - 01

ANEXO B: ANALISIS ESTADISTICO TURBIDEZ

1. Análisis de estadístico de un factor TURBIDEZ pH 7 1ª

TURBIDEZ pH7 1A				
Tiempo (min)	M1	M2	M3	M4
0	256	251	270	273
30	244	245	258	259
60	198	195	215	215
90	170	170	186	184
120	140	139	144	146

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F Calculada	Probabilidad	Valor crítico para F (Tablas)
Entre grupos	1016.2	3	338.733333	0.13345284	0.938698927	3.23887152
Dentro de los grupos	40611.6	16	2538.225			
Total	41627.8	19				
Sctotal	41627.8					
Sctratamientos	1016.2					
SC error	40611.6					
CM error	2538.225					
F calculada	0.13345284					
F tablas	3.23887152					

PRUEBA DE INTERVALOS MULTIPLES DE DUNCAN

Muestra	Media
M4	215.4
M3	214.6
M1	201.6
M2	200

CM error	2538.225
Syi	22.5309787

$$S\bar{y}_i = \sqrt{\frac{CM_{ERROR}}{n}}$$

Rangos minimos significativos

Rp=r(p,f)Syi.	
---------------	--

R2	67.592936
R3	70.9725828
R4	72.7750611

Comparación de medias

M4-M2	15.4	<	72.7750611	R4
M4-M1	13.8	<	70.9725828	R3
M4-M3	0.8	<	67.592936	R2
M3-M2	14.6	<	67.592936	R2
M3-M1	13	<	67.592936	R2
M1-M2	1.6	<	67.592936	R2

2. Análisis de estadístico de un factor TURBIDEZ pH 7.5 1ª

TURBIDEZ pH7.5 1A				
Tiempo (min)	M1	M2	M3	M4
0	256	253	278	276
30	240	242	264	260
60	190	189	218	215
90	165	166	192	189
120	130	129	155	143

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F calculada	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2703	3	901	0.33073323	0.803230365	3.23887152
Dentro de los grupos	43588	16	2724.25			
Total	46291	19				
Sctotal	46291					
Sctratamientos	2703					
SC error	43588					
CM error	2724.25					
F calculada	0.33073323					
F tablas	3.23887152					

PRUEBA DE INTERVALOS MULTIPLES DE DUNCAN

Muestra	Media
M3	221.4

M4	216.6
M1	196.2
M2	195.8

CM error	2724.25
Syi	23.3420222

$$s_{\bar{y}_i} = \sqrt{\frac{CM_{ERROR}}{n}}$$

Rangos minimos significativos

Rp=r(p,f)Syi.	
R2	70.0260666
R3	73.5273699
R4	75.3947317

Comparación de medias

M3-M2	25.6	<	75.3947317	R4
M3-M1	25.2	<	73.5273699	R3
M3-M4	4.8	<	70.0260666	R2
M4-M2	20.8	<	70.0260666	R2
M4-M1	20.4	<	70.0260666	R2
M1-M2	0.4	<	70.0260666	R2

3. Análisis de estadístico de un factor TURBIDEZ pH 8 1ª

TURBIDEZ pH 8 1A				
Tiempo (min)	M1	M2	M3	M4
0	256	255	275	271
30	230	231	248	236
60	181	183	198	191
90	147	150	163	155
120	122	124	143	132

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F calculada	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2703	3	901	0.33073323	0.803230365	3.23887152
Dentro de los grupos	43588	16	2724.25			
Total	46291	19				
Sctotal		46291				

Sctratamientos	2703
SC error	43588
CM error	2724.25
F calculada	0.33073323
F tablas	3.23887152

PRUEBA DE INTERVALOS MULTIPLES DE DUNCAN

Muestra	Media
M3	221.4
M4	216.6
M1	196.2
M2	195.8

CM error	2724.25
Syi	23.3420222

$$S\bar{y}_i = \sqrt{\frac{CM_{ERROR}}{n}}$$

Rangos minimos significativos

Rp=r(p,f)Syi.	
R2	70.0260666
R3	73.5273699
R4	75.3947317

Comparación de medias

M3-M2	25.6	<	75.3947317	R4
M3-M1	25.2	<	73.5273699	R3
M3-M4	4.8	<	70.0260666	R2
M4-M2	20.8	<	70.0260666	R2
M4-M1	20.4	<	70.0260666	R2
M1-M2	0.4	<	70.0260666	R2

ANEXO C: ANALISIS ESTADISTICO DQO

1. Análisis de estadístico de un factor DQO PH 7

DQO mg/l pH7 1A				
Tiempo (min)	M1	M2	M3	M4
0	5620	5390	5852	5890
30	3802	2794	3974	3898
60	2673	2734	1783	2804
90	2103	2178	2278	2289
120	1538	1510	1654	1723

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F calculada	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	403227.35	3	134409.117	0.05025225	0.98455979	3.23887152
Dentro de los grupos	42795015.2	16	2674688.45			
Total	43198242.6	19				

PRUEBA DE INTERVALOS MÚLTIPLES DE DUNCAN

Muestra	Media
M4	3320.8
M1	3147.2
M3	3108.2
M2	2921.2

CM error	2674688.45
Sy _i	731.394346

$$\bar{S}y_i = \sqrt{\frac{CM_{ERROR}}{n}}$$

Rangos mínimos significativos

R _p =r(p,f)Sy _i .	
R2	2194.18304
R3	2303.89219
R4	2362.40374

Comparación de medias

M4-M2	399.6	<	2362.40374	R4
M4-M3	212.6	<	2303.89219	R3
M4-M1	173.6	<	2194.18304	R2

M1-M2	226	<	2194.18304	R2
M1-M3	39	<	2194.18304	R2
M3-M2	187	<	2194.18304	R2

2. Análisis de estadístico de un factor DQO PH 7.5

DQO mg/l Ph7.5 1A				
Tiempo (min)	M1	M2	M3	M4
0	5629	5689	5829	6103
30	3502	3516	3402	3940
60	2050	20156	2134	2043
90	1504	1534	1479	1470
120	950	963	980	984

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F calculada	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	47929170.6	3	15976390.2	0.85709569	0.483266606	3.23887152
Dentro de los grupos	298242362	16	18640147.6			
Total	346171533	19				

PRUEBA DE INTERVALOS MULTIPLES DE DUNCAN

Muestra	Media
M2	6371.6
M4	2908
M3	2764.8
M1	2727

CM error	18640147.6
Syi	1930.81059

$$\bar{S}y_i = \sqrt{\frac{CM_{ERROR}}{n}}$$

Rangos minimos significativos

Rp=r(p,f)Syi.	
R2	5792.43176
R3	6082.05335
R4	6236.5182

Comparación de medias

M2-M1	3644.6	<	6236.5182	R4
-------	--------	---	-----------	----

M2-M3	3606.8	<	6082.05335	R3
M2-M4	3463.6	<	5792.43176	R2
M4-M1	181	<	5792.43176	R2
M4-M3	143.2	<	5792.43176	R2
M3-M1	37.8	<	5792.43176	R2

3. Análisis de estadístico de un factor DQO PH 8

DQO mg/l Ph 8 1A				
Tiempo (min)	M1	M2	M3	M4
0	5429	5826	6101	5926
30	3295	3330	3693	3749
60	1108	1289	1890	1752
90	1578	1439	1240	1189
120	489	4208	598	529

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F calculada	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1859986.6	3	619995.533	0.14214563	0.933208	3.23887152
Dentro de los grupos	69787079.2	16	4361692.45			
Total	71647065.8	19				

PRUEBA DE INTERVALOS MÚLTIPLES DE DUNCAN

Muestra	Media
M2	3218.4
M3	2704.4
M4	2629
M1	2379.8

CM error	4361692.45
Sy _i	933.990626

$$S\bar{y}_i = \sqrt{\frac{CM_{ERROR}}{n}}$$

Rangos mínimos significativos

R _p =r(p,f)Sy _i .	
R2	2801.97188
R3	2942.07047
R4	3016.78972

Comparación de medias

M2-M1	838.6	<	3016.78972	R4
M2-M3	589.4	<	2942.07047	R3
M2-M4	514	<	2801.97188	R2
M4-M1	324.6	<	2801.97188	R2
M4-M3	75.4	<	2801.97188	R2
M3-M1	249.2	<	2801.97188	R2