

**Universidad de Ciencias y Artes de
Chiapas.**

Faculta de Ingeniería Ambiental

Escuela de ingeniería ambiental

Tesis

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE OXIDACIÓN ANÓDICA
EN RESIDUOS DE ACIDEZ Y ALCALINIDAD GENERADOS
EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL.

Para obtener el título de

Ingeniero ambiental

Presenta:

David Vázquez Jiménez

Directores:

Ing. Celia Fabiola de Jesús Velasco Ortiz

Dr. Hugo Alejandro Nájera Aguilar



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 2021



Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas
Dirección de Servicios Escolares
Departamento de Certificación Escolar
Autorización de impresión



Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
Fecha: 29 de septiembre 2021

C. David Vázquez Jiménez

Pasante del Programa Educativo de Ingeniería Ambiental

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:
Evaluación del proceso de oxidación anódica en residuos de acidez y alcalinidad generados en el laboratorio de Ing. Ambiental.

En la modalidad de: Tesis.

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

DR. Carlos Manuela García Lara

Dr. Hugo Alejandro Nájera Aguilar

Ing. Celia Fabiola de Jesús Velasco Ortiz

Firmas:





Cop. Expediente

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar de mi inteligencia y capacidad. Es por ellos lo que soy ahora.

Agradecimientos.

Un agradecimiento especial a mi madre, quien siempre me apoyó para que esta meta sea posible, agradezco todos los sacrificios que hiciste para que pudiera culminar mi carrera con éxito.

Agradezco de corazón a la Ing. Celia Fabiola Velasco Ortiz, directora de esta tesis, por ser un pilar de mucha importancia brindándome el tiempo y dedicación para que este proyecto pueda ser finalizado. Por su paciencia y apoyo incondicional. Por brindarme los conocimientos y alentarme a seguir adelante.

Agradezco inmensamente al Dr. Hugo Nájera Aguilar, director de esta tesis, por su tiempo y apoyo para que este trabajo sea posible, agradezco por los conocimientos aportados para que este sea un trabajo de calidad.

De igual manera, agradezco al Dr. Carlos Manuel García Lara, por su tiempo en la revisión final de mi trabajo de titulación.

A mi padre que cada día me apoyó para superarme y seguir adelante.

A mis hermanas por apoyarme en las tareas de la casa cuando yo no podía ayudarlas por tener que asistir a la escuela.

A mis amigos, quienes me acompañaron durante mi estancia en la universidad.

A mi colega la Ing. Janeth Cabrera González por estar a mi lado y alentarme.

Finalmente, y no menos importante a mis profesores y al personal de laboratorio quienes durante la carrera siempre me apoyaron y brindaron sus conocimientos.

Contenido

Introducción.....	1
Planteamiento del problema.....	3
Justificación	4
Objetivo del estudio	5
Objetivo general:	5
Objetivos específicos:	5
Hipótesis.	6
Capítulo 1 Marco teórico.....	7
1.1.- procesos electroquímicos de oxidación avanzada	8
1.2.- Fenton	9
1.3.-UV/H ₂ O ₂	9
1.4.- Foto-Fenton	9
1.5.- Oxidación anódica	10
1.6.- Electroodos de grafito.	12
1.6.1- Características y ventajas	12
1.7.- Radical Hidroxilo	12
1.8.- Marco legal	13
Capítulo 2 Metodología.....	14
2.1.- Sustancias químicas del residuo.....	15
2.2.- Recolección de los residuos.	16
2.3.- Caracterización.....	17
2.3.1.- Color	17
2.3.2.- pH	17
2.3.3.- Conductividad	17
2.3.4.- DQO	18
2.3.5.- Sólidos suspendidos totales y sólidos totales.....	18
2.4.- Diseño experimental.	19
2.5.- Montaje experimental.....	19
2.6.- Diagrama del montaje.....	20
2.7.- Dimensiones de los electrodos.	22

2.8.- Realización de los tratamientos	23
2.8.1.- Tratamientos a pH3	23
2.8.2.- Tratamientos a pH5	23
2.8.3.- Tratamientos a pH7	23
Capítulo 3 Resultados y discusión.	24
3.1.- Resultados del almacenamiento.	25
3.2.- Resultados de la caracterización.	25
3.3.- Resultado de las pruebas de sólidos.....	25
3.4.- Resultados de la remoción de color.....	26
3.5.- Resultados del pH	27
3.6.- Resultados estadísticos.	28
3.6.1.- Análisis descriptivo entre tratamientos.....	28
3.6.0.- Media y error estándar.....	31
Capítulo 4 Conclusión.	32
4.1.- Conclusión.	33
Capítulo 5 Anexos.	34
Referencias	36

Índice de tablas.

<i>Tabla 1.- Reportes de oxidación anódica.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2.- Componentes químicos del residuo.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 3.- Diseño experimental.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 4.- Características fisicoquímicas del residuo.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 5.- Resultados de ST y SST del mejor tratamiento.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 6.- Mediciones de pH al inicio y al final de cada tratamiento.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 7.- Análisis de varianza de una vía RM.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 8.- Prueba Tukey.....</i>	<i>29</i>

Índice de Figuras

<i>Figura 1.- Colorimetro Hach.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.- pH ExStik.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.- Equipo Hanna</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4.- Diagrama del montaje.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5.- Montaje de la prueba de oxidación avanzada.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 6.- Fuente de poder.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 7.- Electrodo de grafito.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8.- Medidas de los electrodos de grafito.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 9.- comportamiento de la remoción de color a 0.10A.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 10.- Gráfica de media y desviación estándar</i>	<i>28</i>
<i>Figura 11.- Análisis de la media y el error estándar entre tratamientos.</i>	<i>31</i>

Introducción

En la actualidad existe gran variedad de procesos y tecnologías disponibles para el tratamiento de contaminantes presentes en aguas residuales tanto de origen industrial como doméstico. Los procesos pueden ser de naturaleza física, biológica o química (Teran 2019); los primeros se basan en operaciones unitarias de separación en las cuales no se produce una alteración de la estructura química del contaminante; de ahí que, se realice la recuperación y en algunos casos la reutilización de los subproductos generados durante el proceso. Este método tiene como objetivo separar por medios físicos las partículas en suspensión que existan en el agua a tratar y se realiza a través de técnicas como la decantación, homogenización, cribado o filtración.

Respecto a los procesos biológicos, estos se han empleado para eliminar la materia orgánica biodegradable bajo condiciones aerobias o anaerobias, es por eso que se utilizan microorganismos para degradar la materia orgánica presente. El principal inconveniente de los procesos biológicos es la fragilidad de los microorganismos y los tiempos de retención del efluente, además se tiene que tener en cuenta que no toda la materia orgánica es biodegradable y por lo tanto una parte permanece sin oxidar. Por último, se encuentran los métodos químicos que se utilizan para sustraer los contaminantes que no han sido eliminados en las fases de tratamientos anteriores. Son generalmente tratamientos más costosos que el resto debido a que eliminan contaminantes más específicos y demandan consumo de reactivos y energía.

Con respecto a contaminantes como los colorantes sintéticos producidos en industrias con diferente giro, Abdessamad *et al.*, (2013) puntualizan los impactos adversos sobre la salud humana y el ambiente, toda vez que la remoción de estos en los efluentes es más complicada debido a estructuras moleculares aromáticas que componen muchos de los colorantes y que le confieren una difícil mineralización. Una alternativa para el tratamiento de este tipo de residuos líquidos que contienen moléculas refractarias son los procesos electroquímicos de oxidación avanzada (PEOA), Los PEOA son tecnologías electroquímicas mediante la que se provoca un cambio químico en un líquido por la intervención de energía eléctrica (Barrera C, 2014). Y de los cuales la oxidación anódica es una de las técnicas más estudiadas.

El tratamiento electroquímico del agua se puede subdividir en dos categorías: oxidación anódica directa y oxidación indirecta, usando oxidantes formados anódicamente (cloro, hipoclorito, peróxido, ozono, reactivo de Fenton, peroxodisulfato).

Bes, S. (2015) menciona que la oxidación anódica indirecta frecuentemente llamada oxidación electroquímica mediada (OEM), implica el uso de iones metálicos con un alto potencial de oxidación (plata y cobre) que se pueden generar electroquímicamente en un ciclo cerrado que evita en gran parte emisiones.

En la oxidación anódica directa se requiere de un ánodo que cumpla con las características principales que demanda el procedimiento: alto sobre-potencial de oxígeno también llamado como 'energía libre de formación' del óxido. Por encima de este valor el metal se oxida, pero por debajo del mismo no se produce ninguna oxidación. Este valor depende mucho de la temperatura y normalmente se incrementa al aumentar la misma. Y estabilidad a la corrosión (Metalmeccánica, 2008).

Planteamiento del problema.

Los residuos que se generan en la técnica de acidez y alcalinidad durante las pruebas de calidad del agua en los laboratorios y en las actividades académicas que se desarrollan conforme la NMX-AA-036-SCFI-2001, contienen colorantes como naranja de metilo y fenolftaleína mismos que en su estructura destacan anillos aromáticos que al no realizar un tratamiento adecuado previo a la disposición final se vuelven perjudiciales para el medio ambiente tal y como se representa en el apartado de información toxicológica de las hojas de seguridad. Estas sustancias son moléculas refractarias que le transfieren color y olor al agua. Debido a la variedad de muestras que se utilizan en las pruebas se transfiere una gran cantidad de materia orgánica a este residuo (Abdessamad, *et al.*, 2013).

Dentro de los contaminantes del agua residual están los compuestos orgánicos refractarios de alta toxicidad. Entre ellos están los fenoles, sulfuros, cromo y colorantes, todos considerados refractarios y que son responsables de muchos de los efectos nocivos sobre la flora y la fauna acuática. Los más significativos son la disminución del oxígeno disuelto, la eutrofización, la formación de compuestos recalcitrantes y tóxicos para las células, así como la obstaculización del paso de la luz a los cuerpos de agua incluido el deterioro estético. Una alternativa para remover contaminantes refractarios de medios acuosos es la oxidación anódica, un proceso de oxidación avanzada (Álvarez, 1999).

Justificación

En la actualidad la contaminación del recurso hídrico por la descarga de contaminantes de diversa naturaleza y fuentes, no solo afecta la vida acuática que pueda existir en los cuerpos de agua receptores, sino también la salud de los asentamientos humanos que se desarrollen en su entorno.

Un ejemplo de contaminantes de naturaleza inorgánica, pueden ser los residuos que se producen en laboratorios de docencia e investigación, en pruebas como las de acidez y alcalinidad. Este tipo de residuos deben estar sujetos a condiciones particulares de manejo como lo indica la NOM-052-SEMARNAT-2005. Los residuos de alcalinidad y acidez son residuos que deben ser sometidos a un tratamiento, debido a que los compuestos que lo conforman son de alta peligrosidad para el medio ambiente así como para la salud humana.

Existen tratamientos biológicos, físicos o químicos para eliminar contaminantes de aguas residuales, pero estos tratamientos no son eficientes para eliminar moléculas refractarias, los procesos electroquímicos de oxidación avanzada (PEOA) son adecuados para el tratamiento de aguas con moléculas refractarias. Dentro de los métodos de los PEOA podemos encontrar los procesos Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$), Foto-Fenton, Fotocatalizis, Ozonización (O_3) y la oxidación anódica. La oxidación anódica es un método para la degradación de compuestos refractarios y de la materia orgánica hasta su mineralización. Al respecto, son varios los estudios que al aplicar esta tecnología han demostrado eficiencias importantes en la remoción de contaminantes, seguidas a través del parámetro de color con remociones por arriba del 90% (Linares 2011; Hernández 2015; Velázquez 2015).

La importancia de este tratamiento es cumplir con normas que establecen criterios para poder ser desechados tales como la NOM-002-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Objetivo del estudio

Objetivo general:

Evaluar la eficiencia de remoción de color a través del proceso de oxidación anódica a residuos líquidos provenientes de las pruebas de alcalinidad y acidez que se realizan en el laboratorio de Ing. Ambiental de la UNICACH.

Objetivos específicos:

- Caracterizar los residuos de alcalinidad y acidez con los parámetros de DQO, color, conductividad y pH.
- Evaluar la influencia de las variables de estudio por medio de un análisis bifactorial.

Hipótesis.

Los contaminantes presentes en los residuos generados de las pruebas de acidez y alcalinidad pueden ser degradados electroquímicamente mediante el uso de electrodos de grafito.



Capítulo 1
Marco teórico

1.1.- procesos electroquímicos de oxidación avanzada

Los procesos electroquímicos de oxidación avanzada han recibido cada vez más atención por la eliminación de contaminantes orgánicos persistentes (COP), (Sires, I *et al.*, 2014).

La oxidación electroquímica u oxidación anódica (OA) es el PEOA más popular para eliminar contaminantes orgánicos de aguas residuales. Consiste en la oxidación de contaminantes en una celda electrolítica por oxidación anódica directa (transferencia de electrones directa al ánodo) y/o reacción indirecta con especies electro generadas formadas a partir de la descarga de agua en el ánodo. La acción de estas especies oxidantes conduce a la descontaminación total o parcial. (Nars, B. *et al.*, 2005).

Cortes (2008) menciona que existen dos aproximaciones para los procesos de oxidación anódica en la descontaminación de agua como son:

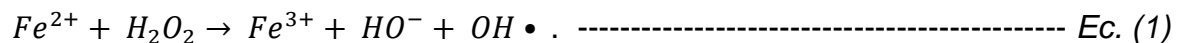
1.- Conversión electroquímica: los compuestos orgánicos refractarios iniciales se transforman en compuestos biodegradables, generalmente ácidos carboxílicos, que posteriormente se pueden tratar por procesos biológicos. Ánodos como los de Pt, IrO_2 o RuO_2 favorecen la conversión electroquímica con baja eficiencia de intensidad de corriente.

2.- Combustión o incineración electroquímica: se da la mineralización completa de los compuestos orgánicos. Este proceso esta favorecido por ánodos de SnO_2 dopado PbO_2 o DDB, que permiten alcanzar eficiencias de corriente más elevadas.

Esta diferencia de actuación de electrodos se puede explicar a partir de la naturaleza de los radicales hidroxilo formados en los dos tipos de ánodos: ánodos que proporcionan la conversión electroquímica de los radicales hidroxilos que se encuentran químicamente adsorbidos en la superficie, es decir, el oxígeno preferentemente se transfiere hacia la red del óxido metálico y disminuye la efectividad de los radicales hidroxilo frente a la oxidación de los compuestos orgánicos; en cambio, en los ánodos que favorecen la combustión electroquímica los radicales se encuentran físicamente adsorbidos, por consiguiente, están adheridos en la superficie, y tienen una mayor reactividad frente los contaminantes orgánicos. Por tanto, es más importante el nivel de efectividad de los radicales que su concentración, esto suponiendo que la concentración de radicales hidroxilos formados en la superficie anódica sea la misma en los dos tipos de ánodos. La eficiencia de corriente viene determinada por la extensión en que se da el proceso de oxidación de los compuestos en relación al proceso de evolución de oxígeno.

1.2.- Fenton

Lo conocidos ensayos de Fenton de fines del siglo XIX demostraron que las soluciones de peróxido de hidrógeno y sales ferrosas eran capaces de oxidar los ácidos tartárico y málico, y otros compuestos orgánicos. Más tarde Haber y Weiss sugirieron que se formaba HO· por la Ecuación 1 dichos radicales podían reaccionar luego por dos vías, la oxidación de Fe(II) (reacción improductiva) y el ataque a la materia orgánica:



El proceso Fenton ha resultado efectivo para degradar compuestos alifáticos y aromáticos clorados, PCBs, nitroaromáticos, colorantes azo, clorobenceno, PCP, fenoles, fenoles clorados, octacloro-p-dioxina y formaldehído. Son muy pocos los compuestos que no pueden ser atacados por este reactivo, entre ellos la acetona, el ácido acético, el ácido oxálico, las parafinas y los compuestos organoclorados. Es un buen oxidante de herbicidas y otros contaminantes de suelos tales como hexadecano o Dieldrin. Puede descomponer solventes para limpieza a seco y decolorar aguas residuales con distintos tipos de colorantes y otros residuos industriales, reduciendo su DQO. También se ha aplicado exitosamente el reactivo de Fenton en la reducción de DQO de aguas municipales y subterráneas y en el tratamiento de lixiviados. Es útil como pretratamiento de compuestos no biodegradables y para el tratamiento de suelos (Ribao, P. 2013).

1.3.-UV/H₂O₂

En este método, los rayos UV suministrados al efluente reaccionan con el H₂O₂ para formar radicales hidroxilos (OH). La utilización de UV/H₂O₂ muestra buenos beneficios: el oxidante se encuentra con facilidad para su adquisición, su temperatura de manejo es constante, es muy soluble con agua y no presenta dificultades de intercambios de masas vinculados a gases (Valles, 2013)

1.4.- Foto-Fenton

En este proceso los iones Fe⁺³ y el H₂O₂ son sujetos a la radiación UV, el peróxido se descompone por la actividad fotocatalítica de los iones Fe⁺³ que provoca la génesis de radicales -OH e iones Fe²⁺ (Giray, S. et al., 2018). La ventaja que tienen los procesos Foto Fenton radica en que no generan subproductos. Así mismo, se podría incrementar su eficiencia con la combinación de fotocatalizadores como el

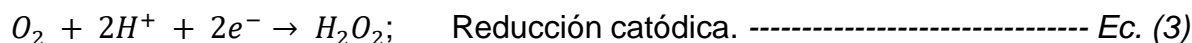
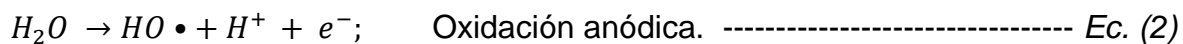
TiO₂, estos procesos resultan muy importantes en la matriz ambiental por sus elevadas eficacias y características de viabilidad (Mirzaei et al., 2017).

Si bien es cierto la reacción de Fenton tiene cualidades de reacción y eficiencia acelerada, una de las desventajas que podemos encontrar es la formación de lodos, los cuales se precipitan al incrementar el pH a la hora de neutralizar el efluente. De este modo en las plantas de tratamiento de lixiviados, el efluente es tratado previamente con floculantes y coagulantes para evitar la generación de lodos en grandes cantidades, de otro modo, requeriría un proceso de separación postratamiento para su disposición final. Lo que se traduce en un aumento de los costos de producción (Yaranga, B. 2020).

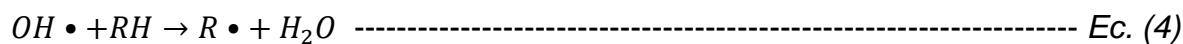
1.5.- Oxidación anódica.

La oxidación anódica se basa en la destrucción de los compuestos orgánicos bajo la acción del ánodo de la celda electrolítica. Cuando se genera H₂O₂ en el cátodo alimentado con O₂ o aire, se utiliza la OA con H₂O₂ electro generado (Ec.3) (Bes, S. 2015).

Domènech (2014) hace mención sobre la aplicación de corriente eléctrica entre dos electrodos. En agua produce reacciones químicas primarias, con la generación de HO•, que oxida la materia orgánica (Ec.2):



Los radicales OH• generados en disolución son los responsables de la oxidación de los compuestos orgánicos por captura de hidrógeno y formación de un radical orgánico que da lugar a una serie de reacciones de degradación oxidativa, alcanzando en algunos casos la mineralización completa de la materia orgánica (Ec. 4).



Como se menciona a continuación, varios autores han reportado diferentes trabajos aplicando un método de oxidación anódica a residuos que contienen moléculas refractarias, con eficiencias de remoción variables tanto en DQO como en color (Tabla 1).

Tabla 1.- Reportes de oxidación anódica.

Referencias	DQO (mg O_2/L)	% Rem. DQO	Color (Pt/Co)	% Rem. Color	Tiempo (minutos)	Tipo de celdas	Tipo de residuo
Donoso, M. (2016)	-----	90	-----	95	120	Acero inox-DDB	Colorantes alimenticios
Linares, I. (2011)	889.5	99	2160	100	150	DDB-Ti	Residual industrial
Peralta, J. (2019)	80	90	----	89	60	DDB-DDB	Residual textil
Hernández, A. (2015)	4477	65	11583	98	90	DDB y Acero inox	Lixiviado tipo III
Velázquez, M. (2015)	1073.33	67	10950	97	150	DDB	Lixiviado pretratado tipo III

Las principales ventajas de los POA se mencionan a continuación (Domènech *et al.*, 2014).

- Transforma químicamente al contaminante además de cambiarlo de fase.
- Generalmente se consigue la mineralización completa (degradación) del contaminante.
- Usualmente no generan lodos que a su vez requieren de un proceso de tratamiento y/o disposición.
- Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten a métodos de tratamiento biológico.
- Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración (por ejemplo, ppb).
- Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pretratamientos alternativos.
- Generalmente, mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
- En muchos casos, consumen mucha menos energía que otros métodos (por ejemplo, la incineración).

- Permiten transformar contaminantes refractarios en productos tratables luego por métodos más económicos.

1.6.- Electrodo de grafito.

Armendáriz (2012) describe las celdas de grafito como un material anisotrópico, por lo que presentan buena conductividad térmica y eléctrica debida a los enlaces covalentes C-C, la conductividad eléctrica es una de las principales características que permiten que el grafito sea un material empleado como electrodo de soporte o trabajo.

1.6.1- Características y ventajas

- Electrodo de alto rendimiento y alta conductividad.
- Presenta un buen comportamiento frente a corrosiones químicas típicas.
- Resistencia a altas temperaturas (grafito material punto de fusión $3850\pm 50^{\circ}$ C)
- Mayor vida útil que la mayoría de electrodos metálicos, debido a su mínima degradación por corrosión. (INGESCO, 2012).
- Bajo costo y alta disponibilidad.

1.7.- Radical Hidroxilo

Los radicales hidroxilos ($\text{OH}\cdot$) se pueden formar a partir del oxígeno, del peróxido de hidrógeno e incluso sólo a partir del agua. Gran parte de la degradación de los contaminantes orgánicos son producidos en la mineralización. La degradación forma una variedad de compuestos inorgánicos, tales como CO_2 , H_2O , NO_3 , haluros, fosfatos. (Terán, 2016)

Hernández (2015) menciona que los radicales hidroxilos oxidantes en medios ácidos o neutros se generan directamente en el ánodo como intermedio de la oxidación directa del agua a oxígeno. A $\text{pH} \geq 10$, los radicales hidroxilos se forman a partir del ion hidrógeno.

1.8.- Marco legal

Los residuos de acidez y alcalinidad son considerados por la NOM-052-SEMARNAT-2005 como un residuo con un código de peligrosidad (C) lo que indica que es corrosivo, debido a que contiene diversos materiales contaminantes, por eso se busca una solución a los problemas ambientales que estos residuos puedan ocasionar al ser desechados sin tratamiento.

En Chiapas y en México no existe una norma que indique las características que deben cumplirse para el desecho de los residuos de acidez y alcalinidad, por lo que se planteó apegarse a la NOM-002-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas.



Capítulo 2 Metodología

El procedimiento seguido en el presente estudio consistió de las siguientes etapas:

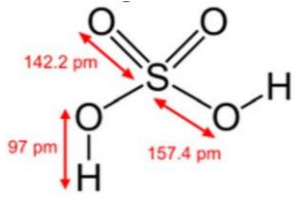
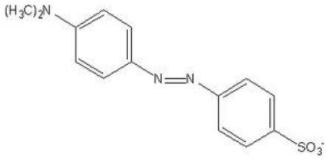
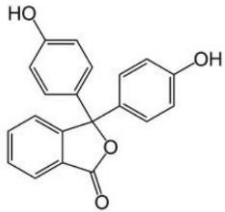
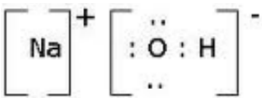
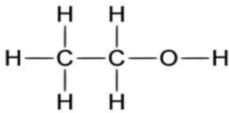
- Investigación en torno a la prueba de acidez y alcalinidad: sustancias utilizadas, recolección de los residuos generados y estimación del volumen almacenado (periodo 2017-2019).
- Caracterización inicial del residuo con los parámetros de pH color, conductividad y DQO.
- Establecimiento del diseño experimental.
- Realización de los tratamientos evaluando su eficiencia mediante la variable de respuesta de Color.

A continuación se describen cada una de ellas.

2.1.- Sustancias químicas del residuo

Las sustancias químicas utilizadas en la prueba de acidez y alcalinidad se indican en la NMX-AA-036-SCFI-2001. En el presente trabajo se han investigado las sustancias químicas que componen este residuo con la intención de evaluar el proceso de Oxidación Anódica en la mineralización y degradación de estos como residuo. La tabla 2 recopila información relativa a estas sustancias y colorantes químicos.

Tabla 2.- Componentes químicos del residuo.

Nombre del compuesto	Formula química	Estructura Química
Ácido sulfúrico concentrado	H_2SO_4	
Naranja de metilo	$C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$	
Fenolftaleína	$C_{20}H_{14}O_4$	
Hidróxido de sodio	$NaOH$	
Etanol	C_2H_5OH	

2.2.- Recolección de los residuos.

La NMX-AA-036-SCFI-2001 establece los lineamientos, las cantidades de muestras y reactivos para la determinación de acidez y alcalinidad, generando de 110 a 150 ml de residuo para la determinación de acidez total, de 110 a 150 ml para acidez al naranja de metilo y de 110 a 150 ml para alcalinidad total.

Para el almacenamiento del residuo se utilizaron 2 recipientes de HDPE (polietileno de alta densidad) con capacidad de 5 L.

2.3.- Caracterización.

Se caracterizó el residuo de acidez y alcalinidad a partir de los principales parámetros fisicoquímicos, con el objetivo de conocer sus propiedades originales y así poder determinar las mejores condiciones a emplear para la realización del proceso de oxidación anódica.

A continuación se detallan las técnicas analíticas para medir los parámetros fisicoquímicos del residuo de acidez y alcalinidad.

2.3.1.- Color

Para la determinación de color se utilizó un Colorímetro HACH DR/820, de acuerdo al método 8025 HACH APHA Pt-Co STANDARD METHODS.



Figura 1.- Colorímetro Hach.

2.3.2.- pH

El pH se obtuvo con un medidor tipo pH100 Medidor de pH ExStik® de la marca Extech, con precisión fotométrica de $\pm 0,005$ A @ 1,0 ABS nominal, rango fotométrico 0-2 A. Con base a la NMX-AA-008-SCFI-2011.

2.3.3.- Conductividad

Para este parámetro se ocupó el equipo pH ExStik®, lo anterior a partir de la NMX-AA-093-SCFI-2018.



Figura 2.- pH ExStik

2.3.4.- DQO

La demanda química de oxígeno se obtuvo por el método de tubo sellado a pequeña escala, usando el equipo HANNA HI 839800 COD Reactor y un Espectrofotómetro THERMO SCIENTIFIC EVOLUTION 201, siguiendo la técnica señalada en la norma NMX-AA-030/2-SCFI-2011.



Figura 3.- Equipo Hanna

2.3.5.- Sólidos suspendidos totales y sólidos totales

La prueba de sólidos totales volátiles se realizó conforme la NMX-AA-034-SCFI-2015.

2.4.- Diseño experimental.

Para los ensayos de oxidación anódica se realizó un diseño experimental factorial de 3^3 , teniendo como variables de estudio al pH y el tiempo de reacción, y como variable de respuesta al color. Como factores controlados se tuvieron la velocidad de agitación (300 rpm), el volumen de residuo y la densidad de corriente constante a 0.10 A. Ver tabla 3. Los datos obtenidos fueron procesados con el software SigmaPlot 12.0.

Tabla 3.- Diseño experimental.

		Tratamientos a pH		
		3	5	7
Tiempo (horas)	0.5	T_1	T_2	T_3
	1	T_4	T_5	T_6
	2	T_7	T_8	T_9

2.5.- Montaje experimental.

El dispositivo experimental utilizado consta de las siguientes partes:

- A) 2 Electrodo de grafito.
- B) 2 Conectores caimán medianos de 10 A. (modelo RADOX 090-730)
- C) 1 fuente de poder (modelo Quad Output DC Power Supply)
- D) 1 placa de agitación.(modelo Corning 6795-420D PV-420D)
- E) 1 agitador magnético para mezclas.

2.6.- Diagrama del montaje.

En la Figura 4 se observa el diagrama del montaje experimental y las posiciones de cada uno de los componentes que lo conforman

Figura 2.- Diagrama del montaje.

Donde:

- A) Electrodos.
- B) Conectores tipo caimán.
- C) Fuente de poder.
- D) Placa de agitación.
- E) Agitador magnético.

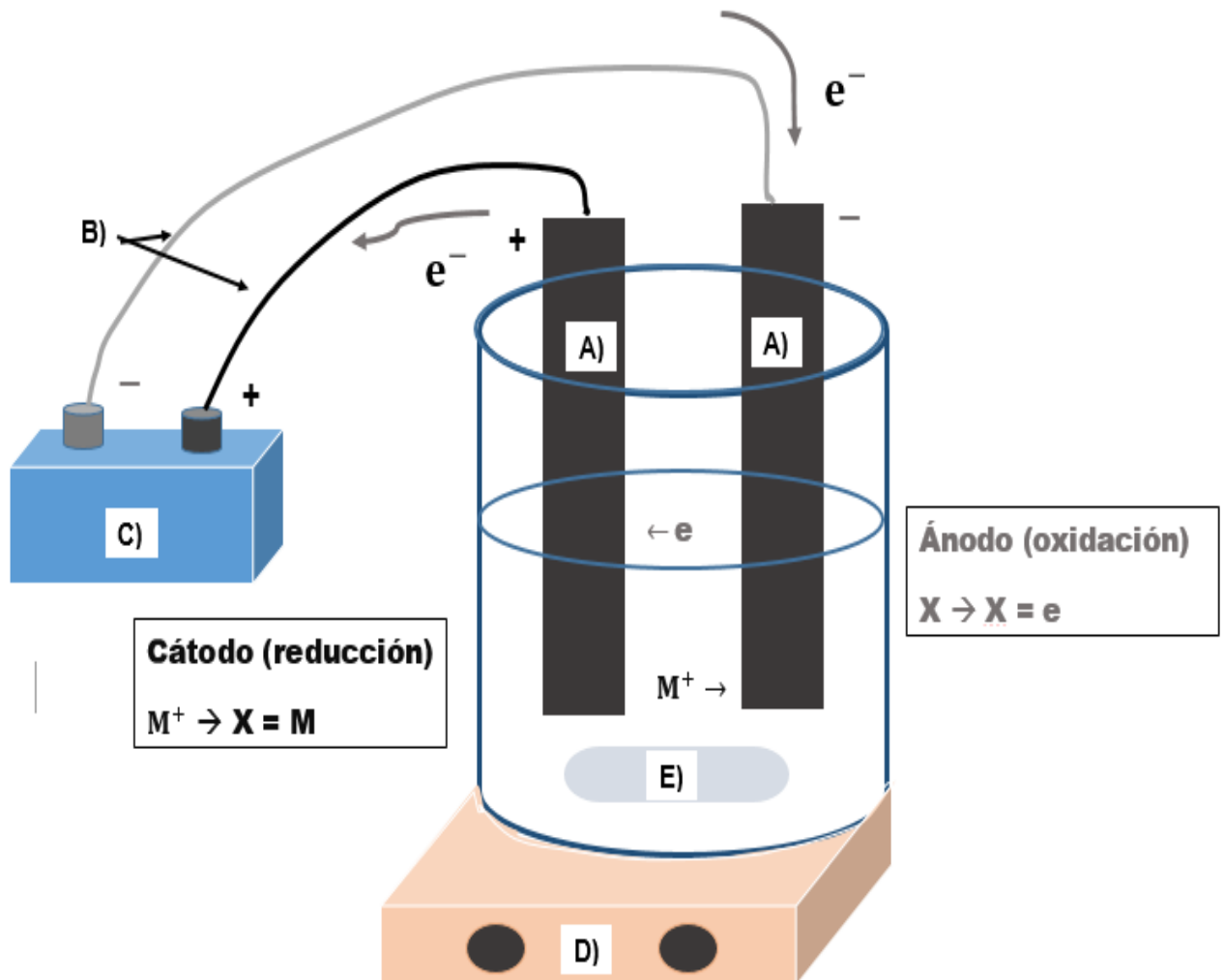




Figura 3.- Montaje de la prueba de oxidación avanzada.

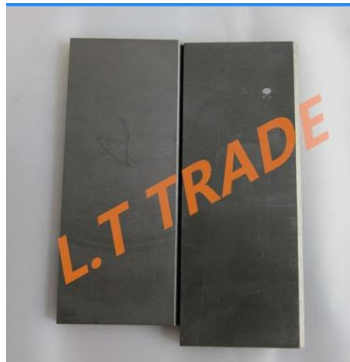
Una fuente de poder modelo Quad Output DC Power Supply de la Marca EXTECH.



Figura 4.- Fuente de poder.

Una fuente de alimentación de corriente continua de cuatro salidas que tiene dos salidas de 0 a 30 V / 0 a 5 A más dos salidas auxiliares fijas de 3 a 6,5 V / 3 A y 15 V / 1 A. Las dos salidas de 30 V se pueden combinar en paralelo para 10 A o en serie para 60 V.

Figura 5.- Electrodo de grafito.

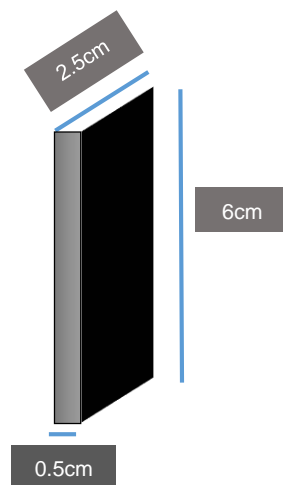


Con respecto a los electrodos empleados, estos consistieron en dos electrodos de grafito; ambos fueron colocados dentro de la celda electroquímica en forma paralela a 2cm de separación. Para mejorar las condiciones de intercambio de electrones, se utilizó 2.1603g de Sulfato de sodio (Na_2SO_4) al 0.1mol/L.

2.7.- Dimensiones de los electrodos.

En la figura 5 se observan las medidas de los electrodos en cm.

Figura 6.- Medidas de los electrodos de grafito.



2.8.- Realización de los tratamientos

2.8.1.- Tratamientos a pH3

Para los primeros tres tratamientos establecidos en el diseño experimental (T_1 , T_4 y T_7), la muestra (150 ml) se estabilizó a un pH3, al cual se agregó el electrolito para lograr un balance de las cargas positivas y negativas. Se introdujo un agitador magnético, se colocaron las celdas de grafito con una separación de 2 cm. Se administró una corriente constante de 0.10mA con agitación de 300 rpm. Se monitoreo el tratamiento, tomando lecturas de color cada 15 minutos. Transcurrido 120 minutos se tomó lectura del pH.

2.8.2.- Tratamientos a pH5

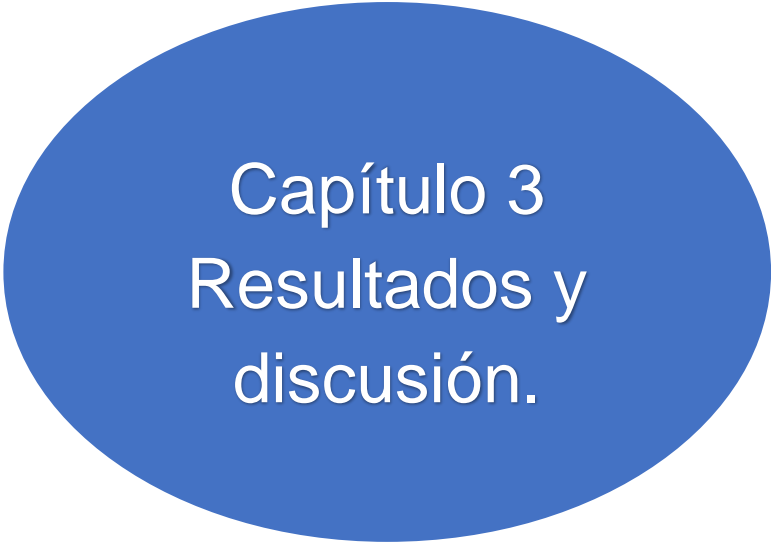
Para los tratamientos (T_2 , T_5 y T_8), la muestra (150 ml) fue usada con el pH que la caracteriza, igual a 5. De igual manera se agregó el electrolito, se introdujo el agitador magnético, se colocaron las celdas de grafito con una separación de 2 cm y finalmente se administró una corriente constante de 0.10A. El color fue monitoreado cada 15 minutos, al término del tratamiento se tomó lectura del pH.

2.8.3.- Tratamientos a pH7

En los tratamientos finales (T_3 , T_6 y T_9), se estabilizó la muestra a un pH de 7, y se continuó con las mismas condiciones de trabajo (uso de electrolito, agitador magnético, celdas de grafito y corriente constante de 0.10A. El color fue monitoreado cada 15 minutos, al término del tratamiento se tomó lectura del pH.

Para todos los tratamientos las muestras para el análisis de DQO se tomaron antes de iniciar el tratamiento, durante el tratamiento y al final de cada tratamiento.

En los tres procedimientos se atribuye que la pérdida de color puede ser un indicador de la degradación de moléculas refractarias, siendo la variable principal considerada para este trabajo por su rápida respuesta a la reacción ante el proceso de OA.



Capítulo 3
Resultados y
discusión.

3.1.- Resultados del almacenamiento.

Los registros de almacenamiento datan del 2017 al 2019 aunque la prueba se lleva realizando años antes.

El laboratorio de Docencia del programa educativo de Ingeniería Ambiental reporta que en un ciclo escolar se atienden aproximadamente a 20 alumnos por grupo, la facultad cuenta con dos grupos en un ciclo escolar. La prueba de acidez y alcalinidad es realizada por cada grupo, más las actividades de tesis, generando alrededor de 1.5L de residuo por ciclo escolar, integrando los seis litros en cuatro ciclos escolares (2 años).

3.2.- Resultados de la caracterización.

Los resultados de caracterización del residuo se presentan en la tabla 4.

Tabla 4.- Características fisicoquímicas del residuo.

DQO(mg O ₂ /L)	Color(Pt-Co)	pH	Conductividad(μs/cm)
0	455	5	1, 800

De la tabla 4 se observa que el residuo presenta características medianamente acidas. Compuestos como el naranja de metilo y fenolftaleína transfieren el color al residuo lo que se traduce en lecturas cercanas a las 500 unidades de Pt-Co.

Teniendo una DQO nula, debido a la intervención de compuestos alifáticos y aromáticos como hace mención la NMX-AA-030/2-SCFI-2011. Algunos de los reactivos que se utilizan durante la determinación de acidez y alcalinidad tales como el naranja de metilo, fenolftaleína y etanol son responsables de la intervención de la oxidación de química del dicromato de potasio.

3.3.- Resultado de las pruebas de sólidos.

Los resultados de las pruebas de sólidos totales y sólidos suspendidos totales se reflejan en la tabla 5.

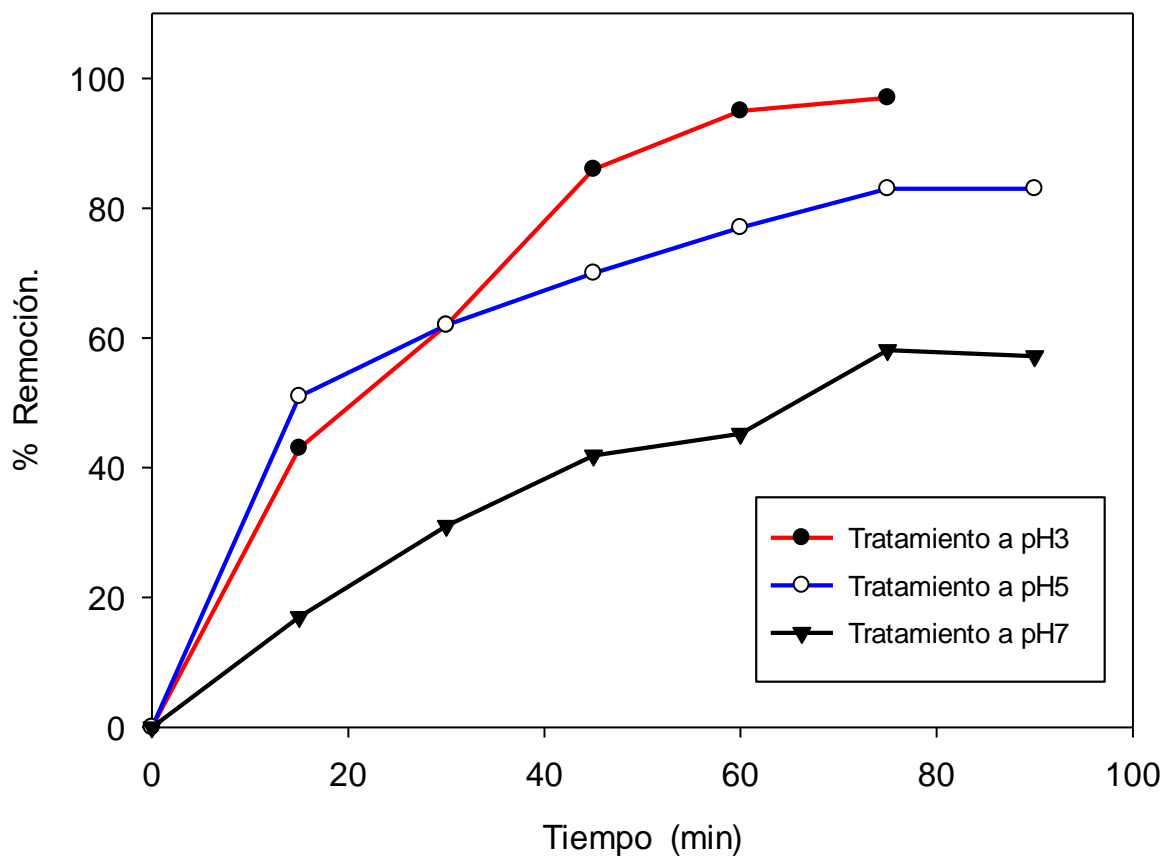
Tabla 5.- Resultados de ST y SST del mejor tratamiento.

	Entrada mg/L	Salida mg/L
ST	1, 715	23, 890
SST	80	440

Al introducir la muestra del residuo al proceso de oxidación anódica se observó que contenía pequeñas partículas. Durante los tratamientos se percibió que las celdas de grafito desprendían pequeñas partículas del material elaborado, lo que puede atribuirse al aumento en la prueba de sólidos. En lo que concierne a la NOM-002-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal no considera a los SST y ST.

3.4.- Resultados de la remoción de color.

Figura 7.- comportamiento de la remoción de color a 0.10A.



La figura 6 muestra el resultado general de la remoción de color. El tratamiento a pH neutro registró una remoción del 58% de color en un tiempo de 90min. El porcentaje de color removido se considera bajo, esto en comparación a los trabajos realizados por Peralta (2019) y Donoso (2016) quienes al trabajar con efluentes de la industria textil y colorantes alimenticios reportan remociones por encima del 80%.

El proceso ensayado a un pH de 5 demostró un mejor desempeño en la remoción de color, esto es, 83% para un tiempo de reacción de 90 minutos, eficiencia cercana a la reportada por Peralta, (2019).

Finalmente, la remoción en color obtenida para la condición a pH 3, demostró los mejores resultados, observando una remoción de 97% en tan solo 75 minutos, y superior al 90% durante los primeros 45 minutos de reacción. En general, este tratamiento (pH 3), alcanzó remociones similares a las reportadas en otros trabajos (Salas 2010; Linares 2011; y Nájera, *et al*; 2018). En estas literaturas se menciona que el pH del medio de reacción tiene una influencia determinante en el proceso de oxidación, de allí que los resultados hayan sido favorables, además de tener presente que un medio ácido generalmente favorece una mayor generación de radicales HO• y mayores velocidades de oxidación.

Basado en los resultados de la figura 6, se estableció que la oxidación anódica para los 9 tratamientos se realizaría en un tiempo máximo de 75 minutos.

3.5.- Resultados del pH

Tabla 6.- Mediciones de pH al inicio y al final de cada tratamiento.

	Tratamientos		
<i>pH inicial</i>	3	5	7
<i>pH final</i>	3.70	4	6

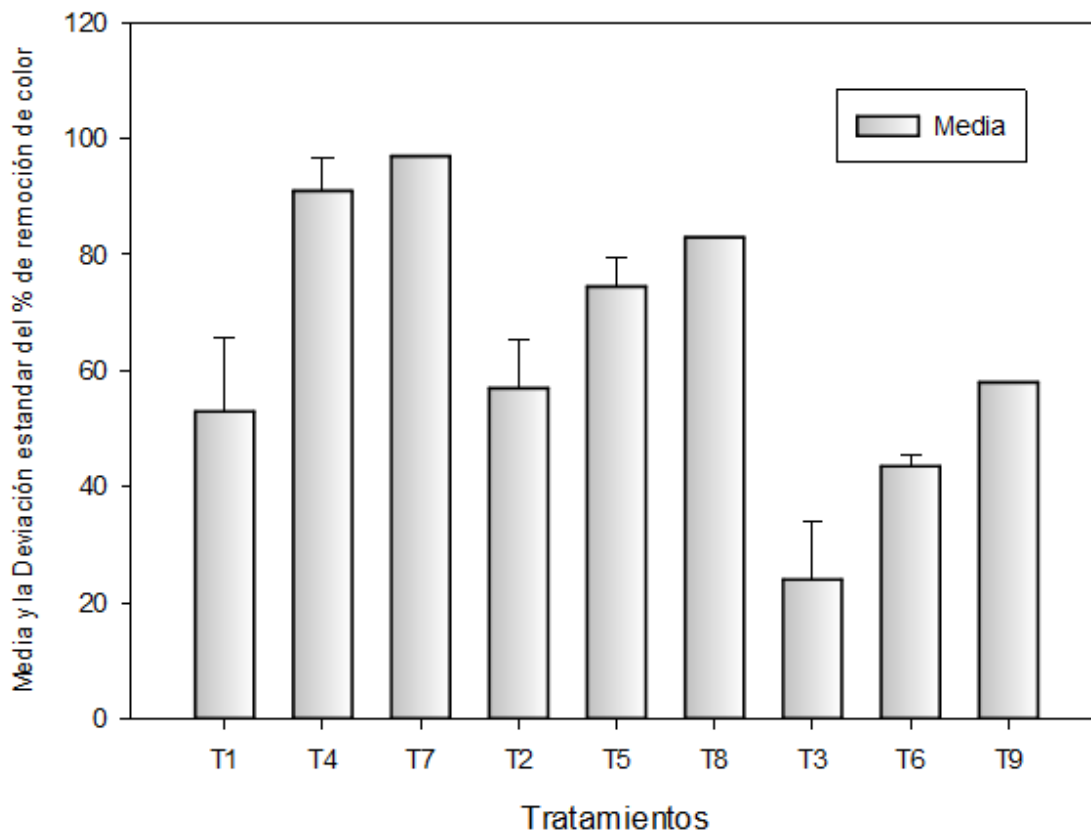
Como se muestra tabla 6, los tratamientos a pH 5 y 7 registraron una pequeña disminución del pH, la disminución de un medio básico se debe a la saturación o incremento del H⁺, la disminución del pH es debido a que en los procesos de oxidación anódica se liberan H⁺ (Sainz, B. 2006).

Al pasar corriente eléctrica al residuo, como el naranja de metilo y el hidróxido de sodio presentes en el mismo y que en su estructura química contienen cationes Na⁺ se desplazan hacia el cátodo donde se reducen y los aniones liberados se desplazan hacia el ánodo donde se oxidan. Al mineralizarse forman sales, siendo responsables del pequeño aumento del pH (Cedron, J. 2011).

3.6.- Resultados estadísticos.

3.6.1.- Análisis descriptivo entre tratamientos.

Figura 8.- Gráfica de media y desviación estándar



Tratamientos	T ₁	T ₄	T ₇	T ₂	T ₅	T ₈	T ₃	T ₆	T ₉
Media	53	90	97	57	74.50	83	24	43.50	58
Error Estándar	9	5	0	6	3.50	0	7	1.50	0
Rango	19	10	0	12	7	0	14	3	0
Desviación estándar	13.43	7.07	0	8.48	4.95	0	9.89	2.12	0

El análisis descriptivo de la figura 10 señala las tendencias estadísticas entre los valores obtenidos de cada tratamiento, de los cuales en T₁, T₂ y T₃ sobresale la media, la desviación y el error estándar por lo que se puede inferir que ambos datos estadísticos son mayores en los primeros tratamientos con solo media hora de oxidación anódica. Para los tratamientos expuestos a una hora de reacción T₄, T₅ y T₆ la desviación y el error disminuyen dejando de ser datos tan dispersos de la media. Los tratamientos con mayor tiempo de reacción T₇, T₈ y T₉ no presentan desviación ni error estándar, es decir, los datos no se encuentran dispersos de la media, son iguales. Sin embargo, al comparar estos últimos tres tratamientos, se observa que en T₉ no se obtiene una remoción aceptable del 80%.

Tabla 7.- Análisis de varianza de una vía RM

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	P
Entre sujetos	1	212.717	212.717	50.285	<0.001
Entre tratamientos	8	9023.027	1127.878		
Residual	8	179.438	22.430		
Total	17	9415.181			

En la tabla 7, el análisis de varianza de una vía RM procesado en el software SigmaPlot realizado sobre los datos obtenidos de los porcentajes de remoción de color, nos permite ver que las diferencias en los valores medios de los grupos de tratamientos son estadísticamente significativas; hay una diferencia (P= <0.001).

Para aislar el tratamiento o los grupos que se diferencian de los demás, se presenta la tabla 8 de comparación múltiple por pares (Prueba Tukey).

Tabla 8.- Prueba Tukey

Comparaciones	Diferencia de medias	P	P<0,050	
pH3vspH7	T1 vs. T3	29	0.028	Yes
	T1 vs. T6	9.5	0.858	Do Not Test
	T1 vs. T9	5	0.996	Do Not Test
	T4 vs. T3	67	<0.001	Yes
	T4 vs. T6	47.5	0.001	Yes
	T4 vs. T9	33	0.013	Yes
	T7 vs. T3	73	<0.001	Yes
	T7 vs. T6	53.5	<0.001	Yes

	T7 vs. T9	39	0.004	Yes
--	-----------	----	-------	-----

pH3vspH5	T1 vs. T2	4	0.999	Do Not Test
	T1 vs. T5	21.5	0.130	No
	T1 vs. T8	30	0.023	Yes
	T4 vs. T2	34	0.011	Yes
	T4 vs. T5	16.5	0.340	Do Not Test
	T4 vs. T8	8	0.935	Do Not Test
	T7 vs. T2	40	0.004	Yes
	T7 vs. T5	22.5	0.106	No
	T7 vs. T8	14	0,514	Do Not Test
pH5vspH7	T2 vs. T3	33	0.013	Yes
	T2 vs. T6	13,5	0.554	Do Not Test
	T2 vs. T9	1	1.000	Do Not Test
	T5 vs. T3	50,5	<0.001	Yes
	T5 vs. T6	31	0.019	Yes
	T5 vs. T9	16.5	0.340	Do Not Test
	T8 vs. T3	59	<0.001	Yes
	T8 vs. T6	39.5	0.004	Yes
	T8 vs. T9	25	0.063	Do Not Test
pH3vspH3	T7 vs. T1	44	0.002	Yes
	T7 vs. T4	6	0.986	Do Not Test
	T4 vs. T1	38	0.005	Yes
pH5vspH5	T5 vs. T2	17.5	0.284	Do Not Test
	T8 vs. T2	26	0.052	No
	T8 vs. T5	8.5	0.913	Do Not Test
pH7vspH7	T9 vs. T3	34	0.011	Yes
	T9 vs. T6	14.5	0.476	No
	T6 vs. T3	19.500	0.193	No

Considerando lo expuesto anteriormente, el procedimiento de comparación múltiple por pares (prueba Tukey) indicó que los tratamientos realizados bajo la condición de pH3 (T_1 , T_4 y T_7) presentaron diferencia significativa con respecto a pH7

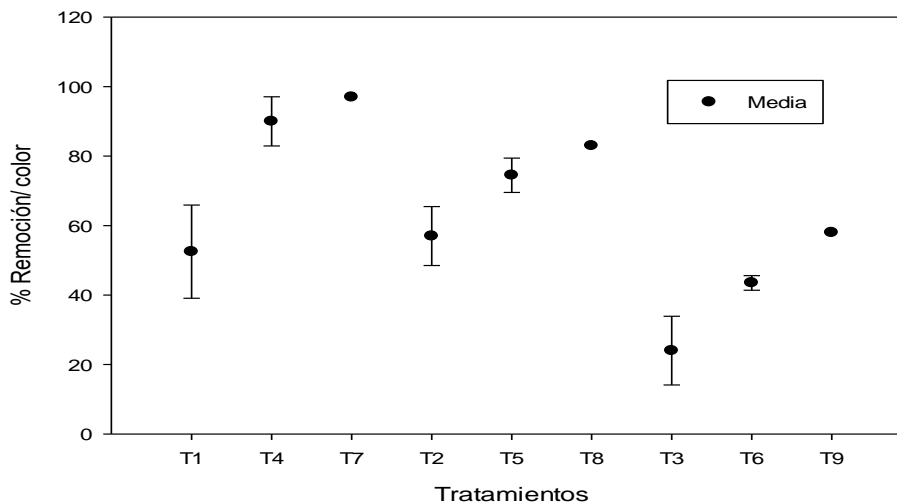
(T_3, T_6 y T_9); De la misma manera hay diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos de pH5 y pH7 (T_2, T_5 y T_8), (T_3, T_6 y T_9) respectivamente.

Por otro lado, se encontró diferencia significativa entre los tratamientos de pH3 (T_1, T_4 y T_7) vs pH5 (T_2, T_5 y T_8), pero la prueba de Tukey indicó que no se encontró diferencia significativa entre los tratamientos que finalizaron con 90 minutos de reacción (T_7 vs T_8), entre estos tratamientos hay una diferencia de medias muy pequeña, igual a 14; por lo que $P= 0.514$.

3.6.0.- Media y error estándar.

Para observar el comportamiento de los datos de error estándar de cada tratamiento se realizó la figura 11.

Figura 9.- Análisis de la media y el error estándar entre tratamientos.



La figura 11, muestra la variabilidad del error estándar y el porcentaje de remoción de color que se encuentra en cada pH (3, 5 y 7) y de la forma con que varían. En este sentido, se observa que los tratamientos con solo media hora de oxidación anódica (T_1, T_2 y T_3) tienden a un error estándar mayor, los resultados de estos tratamientos no se consideran viables.



Capítulo 4
Conclusión.

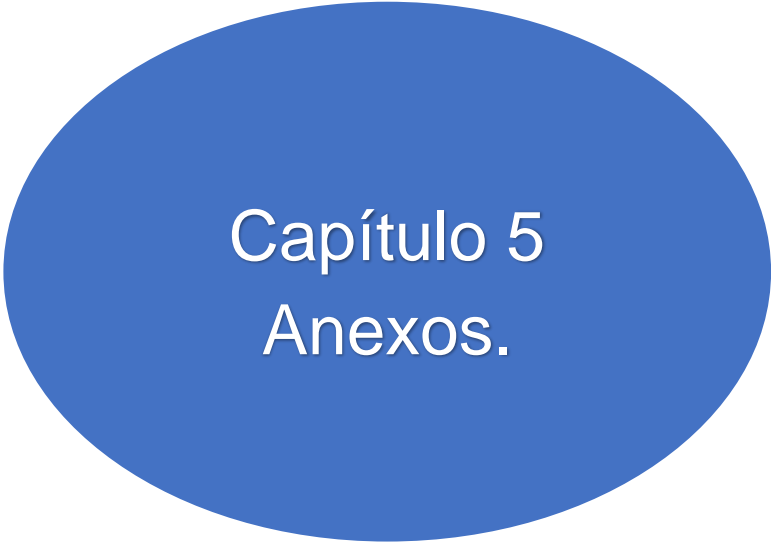
4.1.- Conclusión.

En general la composición química de este tipo de residuos indica moléculas refractarias en su estructura química, una de las características que menciona la literatura para ser tratados mediante los procesos de oxidación anódica.

El proceso de oxidación anódica usando electrodos de grafito como cátodo y ánodo, demostró ser eficiente en la remoción de color, al obtener eficiencia de 97%, bajo las condiciones de pH 3 y con un tiempo de reacción 75 minutos.

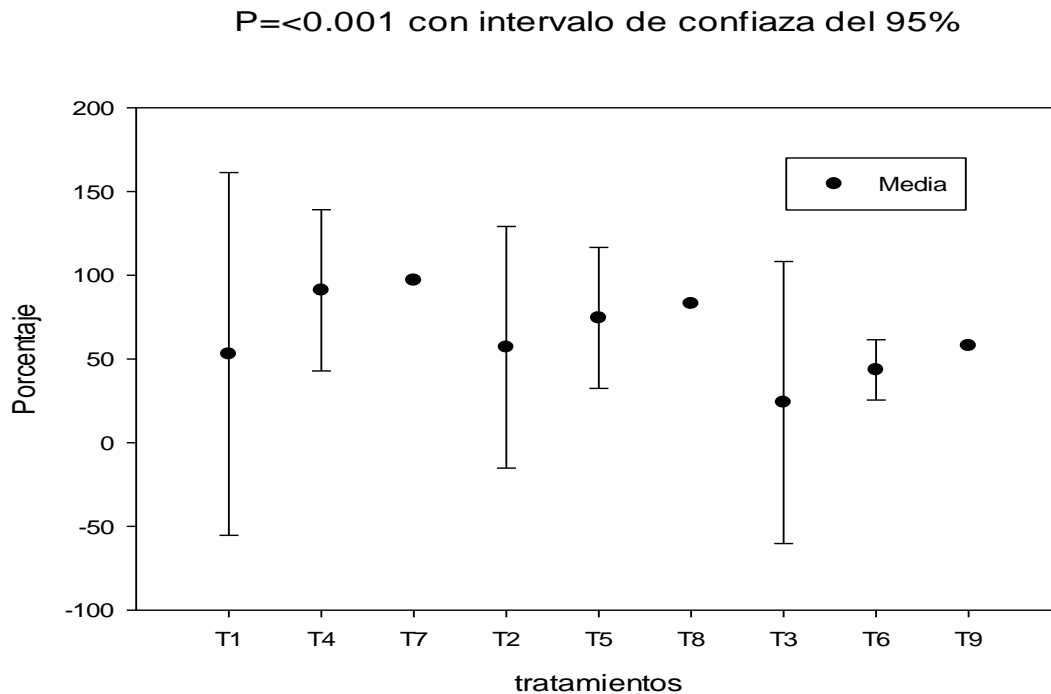
También logró observarse la influencia que puede tener el pH en la oxidación anódica, así como el tiempo de reacción empleado.

En suma, la oxidación anódica a condiciones ácidas y con electrodos de grafito, puede ser usada para el tratamiento de residuos de acidez y alcalinidad que se generen en laboratorios experimentales de tratamiento de aguas, pero deberá tenerse en cuenta la disolución del grafito y su aporte en el incremento de SST en el agua tratada, por lo que una etapa de filtración es recomendable en el efluente final.



Capítulo 5
Anexos.

Figura 8.- Análisis de varianza



El análisis de varianza con los datos recaudados, expresa las diferencias que hay entre los porcentajes de remoción obtenidos y el intervalo de confianza de esa diferencia. Los porcentajes con mayor remoción se manifestaron en los tratamientos T_4 y T_7 (pH 3, 10A) cercanos al 100% de remoción, un resultado semejante al que reportan Linares (2011) y Velázquez (2015). Mientras que el tratamiento a pH 7 las remociones son pocas por lo que se descarta este procedimiento para esta muestra.

Como ya se ha mencionado los mejores resultados se obtuvieron a un pH de 3, aunque estadísticamente se descarta el tratamiento T_1 y T_4 porque se observa que el intervalo de confianza es sesgadamente amplio y se traslapan entre sí.

Se determina que los tratamientos convenientes resultan en un pH3 (T_7) y pH5 (T_8) debido a que las diferencias entre los tratamientos son medianamente considerables y el 95% del intervalo de confianza en los datos no se encuentran dispersos de la media. Obteniendo una remoción total de color con pH3 del 97% y pH5 con 85%.

Referencias

- Teran, M. (2019). Estudio de la aplicación de procesos de oxidación avanzada a aguas contaminadas. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). España.
- Peralta, J. *et al.* (2019, Enero 15). Desarrollo de procesos electroquímicos de oxidación avanzada para el tratamiento de aguas de diferentes orígenes. *Jóvenes en la ciencia*. 5(2019), pp.10-17.
- Ribao, p. (2013, Septiembre). Mejoras en la biodegradabilidad de disoluciones sintéticas de de disoluciones sintéticas de bisfenol a mediante procesos de oxidación avanzada. (Tesis de pregrado). Universidad de Cantabria. España.
- Cedron, J. *et al.* (2011). Química General. Material de enseñanza. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Consulta: 16 de Septiembre de 2021. <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/tema>.
- Giray, S., Morcali, M. H., Akarsu, S., Ziba, C. A., & Dolaz, M. Comparison of classic Fenton with ultrasound Fenton processes on industrial textile wastewater. *Sustainable Environment Research*. 2018.
- Yaranga, B y Scott, J. (2020). Eficiencia de la oxidación Fenton y Foto Fenton en la remoción de DQO en lixiviados del botadero “El Porvenir”, distrito de El Tambo, Huancayo, Junín. (Tesis). Universidad César vallejo. Lima, Peru.
- Donoso M. (2016). Eliminación de colorantes alimenticios en disoluciones acuosas mediante procesos químicos y electroquímicos de oxidación avanzada (tesis de doctorado). Universidad de Extremadura. España.
- Linares, I. *et al.* (2011, Diciembre 14). Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos electroquímicos. *Avances en ciencias e ingeniería*. 5(1). Pp:21-.36.
- Peralta, J. *et al.* (2019, Enero 15). Desarrollo de procesos electroquímicos de oxidación avanzada para el tratamiento de aguas de diferentes orígenes. *Jóvenes en la ciencia*, 5(2019), pp.10-17.
- Mirzaei, A., Chen, Z., Haghghat, F., & Yerushalmi, L. (2017). Eliminación de productos farmacéuticos del agua mediante procesos homogéneos / heterogéneos de tipo Fenton – una revisión. *Chemosphere*.. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.019>.

- Cortés, Y. (2008). Estudio de la degradación electroquímica de la desmetrina en medio acuoso. (Tesis inédita de Maestría), Universidad politécnica de Catalunya, Catalunya. España.
- Barreras, C, 2014. *Aplicación electroquímica al tratamiento de aguas residuales*. Morelos, México. Reverté UAEM.
- Bes, S. *et al.* (2018). Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales. España, Barcelona. PROGRAMA CYTED. p.11. ISBN: 978-84-09-08637-5.
- Hernández, A. (2015). Remoción de materia orgánica y color en lixiviados pretratados tipo III, mediante oxidación anódica empleando un ánodo de diamante dopado con boro. (Tesis de pregrado). Universidad de ciencias y artes de Chiapas. Chiapas, México.
- Velázquez, M. (2015). Influencia de la concentración de cloruros en la remoción de color y materia orgánica (DQO y COT) en lixiviados tipo III empleando el proceso de oxidación anódica. . (Tesis de pregrado). Universidad de ciencias y artes de Chiapas. Chiapas, México.
- Salas, G. (2010). Tratamiento por oxidación avanzada (reacción fenton) de aguas residuales de la industria textil. *Revista peruana de química e ingeniería química*. 13(1). Pp.30-38.
- Domènech X., Wilson F. Jardim y Marta Litter. (2014). PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
- Nájera H. *et al.* (2018). Degradación del Gestodeno (GES)–17 α - Etinilestradiol (EE2) mezcla por oxidacion anodica. *IWA publishing*. 14(6).
- Sirés, I., Brillas, E., Oturan, MA *et al.* (2014). Procesos electroquímicos avanzados de oxidación: hoy y mañana. Una revisión. *Environ Sci Pollut Res* **21**, pp. 8336-8367. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2783-1>.
- Sains, B. (2006). ALTERACIONES DEL EQUILIBRIO ACIDO BÁSICO. *Revista cubana de cirugía*. 45(1). ISSN 1561-2945.
- Nasr, B., Abdellatif, G. Canizares, P., *et al.* (2005). Oxidación electroquímica de hidroquinona, resorcinol y catecol en ánodos de diamante dopados con boro. *Ciencia y tecnología ambiental*. 39(18). pp. 7234-7239. Recuperado de: <https://doi.org/10.1021/es0500660>.

NMX-AA-034-SCFI-2015. ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS – MÉTODO DE PRUEBA.

NMX-AA-030/2-SCFI-2011. Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de tubo sellado a pequeña escala.

NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba.

NOM-052-SEMARNAT-2005. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

NOM-002-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

INGESCO, (2012). Electrodo de grafito. *INGESCO lighting solutions*. 1(2). Recuperado de: <https://www.ingesco.com/es/productos/electrodo-de-grafito>

Metalmechanica, (2008). La medida del potencial de oxígeno en los procesos de tratamientos térmicos de los metales. *Hitchen instruments* Recuperado de: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/26699-La-medida-del-potencial-de-oxigeno-en-los-procesos-de-tratamientos-termicos-de-los-metales.html>.