

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN DE DETERGENTES EN AGUAS
RESIDUALES DOMÉSTICAS EMPLEANDO UNA CELDA
DIACLEAN® DOTADA CON ELECTRODOS DE DIAMANTE
DOPADO CON BORO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

DAYANA GABRIELA CISNEROS LEÓN
daya_16_@hotmail.com

DIRECTOR: Ph.D. PATRICIO JAVIER ESPINOZA MONTERO
pespinoza646@puce.edu.ec

CODIRECTORA: ING. MARÍA BELÉN ALDÁS M.Sc.
maria.aldas@epn.edu.ec

Quito, Abril 2019

DECLARACIÓN

Yo, Dayana Gabriela Cisneros León, declaro bajo juramento que este trabajo escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

DAYANA GABRIELA CISNEROS LEÓN

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Dayana Gabriela Cisneros León, bajo mi supervisión.

Dr. Patricio J. Espinoza Montero

DIRECTOR DE PROYECTO

M.Sc. María Belén Aldás Sandoval

CO-DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios, por ser el padre amoroso y paciente que siempre está junto a mí enseñándome cada día a hacer su voluntad.

A mi abuelito Carlos León, por ser un padre muy sabio, que sembró en mí el respeto, humildad, honestidad y valentía para poder superarme como persona y como profesional. A mi abuelita, Luz Fuentes, por darme su amor de madre incondicional y ser una mujer luchadora.

A mi padre, Bolívar, por su apoyo durante toda mi vida universitaria, por su ejemplo de lucha, constancia y superación. A su esposa, Mayrita por sus consejos, amor y paciencia. También a mi madre, Olivia, por sus consejos que me han ayudado a tomar buenas decisiones durante toda mi vida.

A mis tí@s por que siempre están pendientes de mí y me han apoyado incondicionalmente durante toda mi vida.

A todos mis prim@s porque siempre me han brindado sus consejos y apoyo. De forma especial a mi prima Samy por ser mi compañera de aventuras y compartir conmigo muchas experiencias, además, por su gran ayuda en la primera etapa de este proyecto.

A Santiago, por haberme apoyado durante la realización de este proyecto, por sus consejos, respeto, cariño y paciencia.

A mi líder espiritual Teresita, por haberme compartido de Dios y mostrarme un padre amoroso y fiel; a pesar de la distancia, siempre llevo guardadas sus palabras de fe en mi corazón.

A todos mis amigos de la carrera, especialmente a sofía, Karen y vanessa por haber compartido muchas experiencias durante el tiempo universitario. Gracias por su confianza y amistad.

A todos los chicos del laboratorio de electroquímica PUCE, por haber compartido conmigo el tiempo de realización de este proyecto, de forma especial a Diego por ser un amigo de gran apoyo durante el desarrollo de este proyecto de titulación, gracias por tus consejos y compartir tus conocimientos.

A la Escuela Politécnica Nacional junto a los docentes, por haber impartido sus conocimientos durante todo el transcurso de la carrera. También, al laboratorio de Ingeniería Ambiental por haberme facilitado equipos, materiales y herramientas necesarias para la realización de este proyecto de titulación.

A la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, especialmente al laboratorio de electroquímica de la Facultad de Ciencias Exactas, por haberme permitido desarrollar la parte experimental de mi proyecto. De igual manera, al laboratorio CESAQ-PUCE, por haberme facilitado reactivos y materiales necesarios para llevar a cabo este proyecto.

Al PhD. Patricio Espinoza, director del proyecto, por poner su confianza y dedicación para la realización de este proyecto, además, por sus consejos y paciencia. A la Msc. María Belén Aldás, co-directora del proyecto, por haber dado su tiempo para atender mis inquietudes durante el proceso de desarrollo de este proyecto.

DEDICATORIA

Con amor a DIOS, por ser mi padre que de forma incondicional me guía, me perdona y derrama muchas bendiciones en mi vida. A Jesús, por ser mi roca y fortaleza para hacer frente a las dificultades en el camino de la vida. Eres lo más importante en mi vida por sobre todas las cosas; mis ojos verán tus promesas cumplidas.

Con gratitud a mis abuelitos Carlos y Luz Angélica, por haber sido unos padres ejemplares y por su apoyo en todos los planes y deseos de mi vida. Por ustedes y con la ayuda de Dios llegaré a cumplir todas mis metas.

A mi padre Bolívar y su esposa Mayrita; sus consejos, amor y apoyo incondicional han sido de mucho valor para mí. Lo mejor de cada uno, me llevo en el corazón.

A mi madre Olivia, por haberme dado el regalo y la herencia más grande que una persona puede recibir; conocer el verdadero amor de DIOS; además, por enseñarme cada día que lo más importante es obedecer a mi papá Dios y que lo demás me será añadido.

A mis hermanos Joselinne, Dilan y Santiago, porque me han enseñado a cultivar amor, perdón, paciencia y humildad. También a mi primo Adrián por ser como un hermano mayor; su lucha y superación son un gran ejemplo para mí.

Con amor a mi sobrina Valentina; por ser la niña de mis ojos que con una sonrisa borra toda tristeza del corazón.

Con gratitud a toda mi familia, tí@s y prim@s, por ser un pilar fundamental en mi vida.

Finalmente, a Santy por ser la persona que me ayudó a confiar más en Dios en los momentos difíciles, porque eres un hijo de Dios y sé que Dios tiene grandes propósitos para tu vida. Siempre te llevo en mis oraciones y en mi corazón.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA	V
CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE ANEXOS	XIII
SIMBOLOGÍA Y SIGLAS	XIV
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
PRESENTACIÓN	XVII
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.1.1 HIPÓTESIS	3
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3 ALCANCE	4
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	4
MARCO TEÓRICO	8
2.1 AGUAS RESIDUALES.....	9
2.1.1 CONTAMINANTES PRIORITARIOS.....	9

2.1.2	TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE AGUAS RESIDUALES	12
2.1.3	LEGISLACIÓN ECUATORIANA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE CUERPOS DE AGUA	13
2.2	SURFACTANTES	14
2.2.1	GENERALIDADES.....	14
2.2.2	COMPOSICIÓN DE LOS DETERGENTES.....	15
2.2.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICO – QUÍMICAS DE LOS SURFACTANTES	16
2.2.4	CLASIFICACIÓN DE LOS SURFACTANTES	18
2.3	PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA APLICADOS AL TRATAMIENTO DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS	19
2.3.1	OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA AVANZADA	20
2.4	OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA MEDIANTE UNA CELDA DIACLEAN® Y ELECTRODOS BDD.....	25
2.4.1	ELECTRODOS DE DIAMANTE DOPADO CON BORO	25
2.4.2	CELDA DIACLEAN®: APLICACIONES Y EFICIENCIA.....	31
	METODOLOGÍA	35
3.1	CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	35
3.1.1	SELECCIÓN DEL SITIO DE MUESTREO	35
3.1.2	TOMA DE MUESTRAS.....	35
3.1.3	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS AGUAS RECOLECTADAS.....	36
3.2	DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN	37
3.2.1	ELECCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO.....	39
3.2.2	DETERMINACIÓN DE LA CORRIENTE ÓPTIMA	40
3.2.3	CONTROL DEL POTENCIAL EN LA CELDA	40
3.3	PROCESO ANALÍTICO	41
3.4	ESTUDIO DEL CONSUMO ENERGÉTICO	42

3.5	ANÁLISIS DE COSTOS	42
3.5.1	COSTO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTRO- OXIDACIÓN	42
3.5.2	COSTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTRO- OXIDACIÓN	43
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1	CARACTERIZACIÓN INICIAL DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	44
4.2	CARACTERIZACIÓN DEL REACTOR	45
4.2.1	ELECCIÓN DEL CAUDAL	45
4.2.2	DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE ÓPTIMA	56
4.3	DEGRADACIÓN DE SURFACTANTES EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	66
4.3.1	ANÁLISIS DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL	66
4.3.2	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TRATADA	68
4.4	ESTUDIO DEL CONSUMO ENERGÉTICO	69
4.4.1	CONSUMO ENERGÉTICO DE LA CELDA ELECTROQUÍMICA DIACLEAN®.....	69
4.4.2	CONSUMO ENERGÉTICO DE LA BOMBA PERISTÁLTICA.....	69
4.5	COSTOS.....	71
4.5.1	COSTO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTRO- OXIDACIÓN	71
4.5.2	COSTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTRO- OXIDACIÓN	72
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
4.6	CONCLUSIONES	73
4.7	RECOMENDACIONES.....	74
	BIBLIOGRAFÍA	76
	ANEXOS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Distribución del uso del agua en el Ecuador.....	8
FIGURA 2. Representación del arreglo de las moléculas de surfactantes en una micela.....	17
FIGURA 3. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada.....	20
FIGURA 4. Estructura electrónica y potencial de oxidación de especies reactivas del oxígeno	22
FIGURA 5. Estructura del diamante puro	26
FIGURA 6. Imagen SEM de diamante dopado con boro (BDD), visualizado a una escala de 3 μm	27
FIGURA 7. Ventana de potencial de varios electrodos	28
FIGURA 8. Mecanismo de oxidación del agua en un electrodo BDD	30
FIGURA 9. Celda electroquímica de flujo continuo	31
FIGURA 10. Ubicación geográfica del lugar de muestreo.....	35
FIGURA 11. Esquema del sistema de recirculación con celda DiaClean [®] y electrodo BDD	37
FIGURA 12. Esquema de los electrodos en la celda DiaClean [®]	38
FIGURA 13. Reactor DiaClean [®] acoplado a un sistema de recirculación	38
FIGURA 14. Celda electroquímica DiaClean [®]	39
FIGURA 15. Electrodos BDD y acero inoxidable.....	39
FIGURA 16. Control del potencial de la celda DiaClean [®]	41
FIGURA 17. Seguimiento de la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min, 4 L/min y 7 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm ²)	47

FIGURA 18. Comportamiento cinético de la reacción de electro-oxidación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm ²).....	48
FIGURA 19. Remoción de DQO presente en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min, 4 L/min y 7 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm ²)	49
FIGURA 20. Comportamiento cinético de la reacción de la remoción de DQO durante el proceso de electro-oxidación de aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm ²)	50
FIGURA 21. Reducción de la turbidez en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min, 4 L/min y 7 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm ²)	51
FIGURA 22. Variación de la conductividad en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min, 4 L/min y 7 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm ²).....	52
FIGURA 23. Variación del pH en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min, 4 L/min y 7 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm ²)	53
FIGURA 24. Variación de la temperatura en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min, 4 L/min y 7 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm ²)	54
FIGURA 25. Seguimiento de la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm ² (flujo de alimentación de 1,5 L/min).....	57
FIGURA 26. Comportamiento cinético de la reacción de la electro-oxidación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 50 mA/cm ² (flujo de alimentación de 1,5 L/min)	58

FIGURA 27. Remoción de DQO en la degradación electroquímica de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm ² (flujo de alimentación de 1,5 L/min).....	59
FIGURA 28. Comportamiento cinético de la reacción de remoción de DQO presente en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 50 mA/cm ² (flujo de alimentación de 1,5 L/min)	61
FIGURA 29. Reducción de la turbidez en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm ² (Flujo de alimentación de 1,5 L/min)	62
FIGURA 30. Variación de la conductividad en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm ² (Flujo de alimentación de 1,5 L/min).....	63
FIGURA 31. Variación del pH en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm ² (Flujo de alimentación de 1,5 L/min)	64
FIGURA 32. Variación de la temperatura en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm ² (Flujo de alimentación de 1,5 L/min)	65
FIGURA 33. Seguimiento de COT en la degradación electroquímica de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 50 mA/cm ² y flujo de alimentación de 1,5 L/min.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Tratamientos convencionales de aguas residuales	12
TABLA 2. Límites máximos permisibles de descarga de aguas residuales	14
TABLA 3. Aplicaciones generales de los surfactantes	17
TABLA 4. Ventajas de los procesos de oxidación electroquímica avanzada	21
TABLA 5. Degradación de contaminantes orgánicos persistentes mediante electro-oxidación con electrodos BDD y celdas electrolíticas.	33
TABLA 6. Metodologías de los parámetros analizados en la caracterización de las muestras recolectadas	36
TABLA 7. Análisis Físico-químico Inicial del Agua Residual Doméstica	45
TABLA 8. Caudales determinados experimentalmente para cada valor de revoluciones por minuto (rpm) de una bomba peristáltica.....	46
TABLA 9. Resultados de los parámetros físico-químicos analizados en la remoción de contaminantes presentes en el agua residual doméstica después de un estudio en la variación de caudal a una densidad de corriente de 14mA/cm ²	55
TABLA 10. Resultados de los parámetros analizados después de un estudio en la variación de densidad de corriente a un flujo de alimentación de 1,5 L/min.....	65
TABLA11. Parámetros fisicoquímicos del agua residual tratada.....	68
TABLA12. Consumo energético para cada densidad de corriente utilizada	70
TABLA 13. Costos de instalación del sistema de recirculación acoplada a una celda DiaClean® y electrodo BDD.....	71
TABLA 14. Costos de operación del sistema de electro-oxidación con flujo de alimentación de 1,5 L/min	72

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 - PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UNA DENSIDAD DE CORRIENTE DE 14 mA/cm ² Y FLUJOS DE ALIMENTACIÓN DE 1,5; 4 Y 7 L/min.....	86
ANEXO 2 - DESVIACION ESTÁNDAR PARA LOS RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UNA DENSIDAD DE CORRIENTE DE 14 mA/cm ² Y UN FLUJO DE ALIMENTACIÓN ÓPTIMO DE 1,5 L/mi	90
ANEXO 3 - PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UN FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE 1,5 L/min Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 7, 14, 20, 30, 40 Y 50 mA/cm ²	92
ANEXO 4 - DESVIACIÓN ESTANDAR PARA LOS RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO UN FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE 1,5 L/min Y DENSIDAD DE CORRIENTE ÓPTIMA DE 50 mA/cm ²	99
ANEXO 5 - CÁLCULO PARA DETERMINAR EL ORDEN DE REACCIÓN Y LAS CONSTANTES CINÉTICAS DE LOS PARÁMETROS PRINCIPALES DE ANÁLISIS	101

SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundario del Ministerio del Ambiente
BDD	Diamante Dopado con Boro (por sus siglas en inglés)
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno
COT	Carbono Orgánico Total
pH	Potencial de Hidrógeno
SENAGUA	Secretaría Nacional del Agua
COP's	Compuestos Orgánicos Persistentes
POP's	Contaminantes Orgánicos Persistentes (por sus siglas en inglés)
PTAR	Planta de Tratamiento de Agua Residual
WWTP	Planta de Tratamiento de Agua Residual (por sus siglas en inglés)
Q	Flujo de alimentación
j	Densidad de corriente
ST	Sólidos Totales
k	Constante cinética
R²	Coefficiente de correlación
A	Amperios

RESUMEN

Los surfactantes son considerados Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP's) y no son degradados completamente por los tratamientos convencionales de aguas residuales, por lo que se requiere desarrollar nuevas tecnologías. El presente trabajo de investigación propone estudiar la degradación de surfactantes que son los principales componentes de los detergentes presentes en aguas residuales domésticas provenientes de una PTAR del conjunto habitacional "Arupos de la Hacienda" mediante electro-oxidación avanzada.

La oxidación electroquímica avanzada de surfactantes se llevó a cabo en una celda DiaClean® con ánodo BDD. Se varió el flujo de alimentación (1,5 L/min; 4 L/min y 7 L/min) manteniendo la corriente constante, y luego se varió la densidad de corriente (7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm²) manteniendo el flujo constante. Para cada ensayo se monitoreó detergentes, DQO, turbidez, pH, conductividad, temperatura y potencial de la celda. Además, una vez encontradas las condiciones óptimas de operación, se analizó COT.

Las mejores condiciones de operación, es decir, un flujo de alimentación de 1,5 L/min y una densidad de corriente de 50 mA/cm², permitió remover del agua residual un 89,7% de surfactantes con una constante cinética de 0,0026 mol/L-min; un 90,7% de DQO con una constante cinética de 0,0022 mol/L-min; además, se alcanzó un 94% de mineralización con una constante cinética de 0,0076 min⁻¹ y un 89,4% de reducción de turbidez, debido a la reacción con radicales hidroxilo electrogenerados en la superficie del BDD durante seis horas de electrólisis. Finalmente, el costo de instalación del sistema propuesto fue de \$ 12 460,00 y el costo de operación fue 0,08 USD L⁻¹.

Se propone este POA como una alternativa prometedora para la remoción eficiente de surfactantes y alta mineralización de compuestos orgánicos presentes en aguas residuales domésticas.

Palabras clave: Surfactantes, BDD, oxidación electroquímica avanzada, radical hidroxilo

ABSTRACT

Surfactants are considered persistent organic pollutants (POP's) and are not completely degraded by conventional wastewater treatments, so it is necessary to develop new technologies. This research project proposes to study the degradation of surfactants that are the main components of detergents present in domestic wastewater from a WWTP at "Arupos de la Hacienda" housing complex through advanced electro-oxidation.

The studies of electrochemical oxidation of surfactants was carried out in a cell DiaClean® with BDD anode. The flow rate (1.5 L/min, 4 L/min and 7 L/min) was ranged, keeping the current constant, and then the current density was varied (7, 14, 20, 30, 40 and 50 mA/cm²) maintaining the constant flow. For each test was monitored surfactants, COD, turbidity, pH, conductivity, temperature and cell potential. Moreover, once found the optimal operating conditions was analyzed COT.

The best operating conditions: flow 1.5 L/min and a current density of 50 mA/cm², an 89.7%, surfactants remission was reached with a kinetic constant of 0.0026 mol/L-min. With respect to cod, 90.7% of the remission was reached with a kinetic constant of 0.0022 mol/L-min; In addition, 94% mineralization (COT) was achieved with a kinetic constant of 0.0076 min⁻¹ and 89.4% turbidity reduction. Finally, the installation cost of the proposed system was \$12 460.00 and the operating cost was 0.08 USD L⁻¹.

This POA is proposed as a promising alternative for the efficient removal of surfactants and high mineralization of organic compounds present in domestic wastewater.

Key words: Surfactants, BDD, electrochemical advanced process, hidroxy radicals

PRESENTACIÓN

En este trabajo se realizó un estudio de la degradación electroquímica de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas provenientes de la PTAR del conjunto habitacional “Arupos de la Hacienda” ubicado al norte del cantón Rumiñahui, utilizando una celda DiaClean® dotada con electrodo BDD. Se detallan a continuación los 5 capítulos correspondientes a este trabajo.

La introducción detallada en el primer capítulo contiene los antecedentes, hipótesis, objetivo general, objetivos específicos, alcance y justificación del estudio.

El segundo capítulo está constituido por el marco teórico y presenta información sobre: aguas residuales, generalidades de los surfactantes y su presencia en el ambiente, procesos de oxidación avanzada y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales, finalmente, se detallan las características de los electrodos BDD que es un material anódico de importancia para el desarrollo de este trabajo de investigación.

En el tercer capítulo, se explica la metodología del trabajo, donde se describe los materiales y reactivos usados, la construcción del reactor y el procedimiento realizado para encontrar los parámetros óptimos en la degradación de surfactantes.

El cuarto capítulo, contiene resultados y discusión que describen las condiciones óptimas como el caudal y corriente y los parámetros de control (temperatura, conductividad, pH, turbidez, DQO, Detergentes y COT), que se llevaron a cabo en el sistema de recirculación planteado en este trabajo de titulación. Además, se muestra la cinética de las reacciones para detergentes, DQO y COT con los parámetros óptimos de operación.

Por último, conclusiones y recomendaciones se encuentran en el quinto capítulo. En este capítulo se presentan las condiciones óptimas con las que se obtuvo mayor eficiencia de degradación de surfactantes y las consideraciones que deben tomarse en cuenta para posteriores ensayos aplicando los Procesos de Oxidación Avanzada.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Con el paso del tiempo, la contaminación de fuentes hídricas por descarga de aguas residuales no tratadas es cada vez mayor, se estima que del total de agua residual (doméstica e industrial) en el Ecuador, solo el 7% recibe tratamiento y el resto se envía directamente a cuerpos de agua (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2011). Una de las principales fuentes de contaminación es la descarga de aguas residuales domésticas, que se generan como resultado de actividades en zonas residenciales o instalaciones comerciales (Cajas, 2018). Además, del total de agua potable distribuido para consumo humano, cerca del 60 al 80% se atribuye al volumen de aguas residuales domésticas (Brière, 2005).

De los principales problemas en aguas residuales domésticas se destaca la presencia de Compuestos Orgánicos Persistentes (COP's) o de alto peso molecular, como los detergentes y otros productos de limpieza, que están formados principalmente por agentes tensoactivos o surfactantes, los cuales no pueden ser eliminados completamente por tratamientos convencionales (Armijos et al., 2017; Martínez, 2017). Esto se ha convertido en un problema ambiental, cuya solución es un reto para científicos e investigadores (Barceló y López, s.f.), ya que necesitan tratamientos altamente eficientes en corto tiempo, de fácil operación y mantenimiento y que no sean muy costosos. En este sentido, el desarrollo de materiales que puedan descontaminar el agua con alta eficiencia y sin la generación de subproductos son una nueva alternativa, como es el caso del diamante dopado con boro (BDD, por sus siglas en inglés) (Daghrir, Drogui & Tshibangu, 2014).

El aumento en el uso de este tipo de compuestos provocan un gran peligro de contaminación ambiental especialmente en el agua (Panizza y Cerisola, 2005; Uc-Peraza y Delgado, 2012), como es el caso de los surfactantes aniónicos, con una producción anual a nivel mundial de más de medio millón de toneladas, de las cuales

el 60% termina en los cuerpos hídricos (Solé et al., 2000) de forma directa e indirecta, en donde sufren una degradación primaria formando compuestos que posrían ser incluso más tóxicos y persistentes (Becerril, 2009). En este contexto, los Procesos de Oxidación Avanzada (POA's) surgen como una alternativa eficiente y novedosa para el tratamiento de aguas residuales que contengan compuestos altamente estables al pH, temperatura, radiación y a medios biológicos agresivos (Armijos, 2016).

La oxidación electroquímica es uno de los POA's que se ha utilizado en el tratamiento de efluentes contaminados con compuestos altamente estables y difíciles de degradar ya que se conoce que se puede alcanzar la mineralización de estos compuestos, gracias a la generación in situ de agentes altamente oxidantes como son los radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$) (2,8 V vs. SHE) (Armijos et al., 2017; Domènech, Jardim y Litter, 2004; Espinoza-Montero, Vasquez-Medrano, Ibanez y Frontana-Urbe, 2013). Además, se conoce que uno de los materiales más utilizados en los procesos de oxidación avanzada electroquímica es el electrodo de Diamante Dopado con Boro (BDD) (El-Ghenymy et al., 2014), ya que gracias a sus características químicas y electroquímicas es capaz de generar radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) en su superficie cuando este es polarizado (Einaga, 2014; García-Morales, Roa-Morales, Barrera-Díaz, Bilyeu y Rodrigo, 2013; Panizza, Delucchi y Cerisola, 2005).

La información sobre aplicaciones de oxidación electroquímica avanzada con electrodos BDD en el tratamiento de aguas residuales que presentan compuestos orgánicos persistentes, es escasa. Por esta razón, es importante desarrollar proyectos técnico-experimentales sobre las aplicaciones de los POA's, para generar mayor información sobre la eficiencia de estos procesos de oxidación avanzada.

Por lo antes mencionado, en este trabajo se propone estudiar la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas por oxidación electroquímica avanzada, empleando una celda electroquímica DiaClean® dotada con electrodo BDD; con la finalidad dar soluciones a problemas de contaminación hídrica por COP's como los surfactantes.

Con este antecedente, se plantea la siguiente hipótesis que se evidenciará en la sección de análisis de resultados del presente trabajo de investigación.

1.1.1 HIPÓTESIS

La degradación electroquímica de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas utilizando una celda DiaClean® con una configuración de electrodos de diamante dopado con boro es eficiente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

- Estudiar la eficiencia de la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas mediante oxidación electroquímica avanzada empleando una celda DiaClean® dotada con electrodos BDD para proponer esta metodología como un nuevo tratamiento terciario de aguas residuales.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características fisicoquímicas de las aguas residuales provenientes de un conjunto habitacional, mediante análisis de calidad del agua para establecer las condiciones iniciales con las que se va a realizar el tratamiento.
- Establecer las condiciones óptimas de operación del reactor mediante ensayos preliminares para el tratamiento de oxidación electroquímica de las muestras de aguas residuales del conjunto.
- Estudiar el efecto de la densidad de corriente en la degradación electroquímica de contaminantes orgánicos mediante la determinación de COT y DQO para conocer la mayor eficiencia de remoción de la celda.

1.3 ALCANCE

El presente trabajo se desarrolló a nivel de laboratorio (4 L de muestra), en donde se llevó a cabo la oxidación electroquímica de contaminantes presentes en aguas residuales domésticas con una celda electroquímica DiaClean®, con un electrodo de BDD como ánodo y un electrodo de acero inoxidable como cátodo, la celda acoplada a un sistema de recirculación con una bomba peristáltica y una fuente de poder. Con este reactor se pueden encontrar los parámetros óptimos de diseño y operación que aseguraran una alta eficiencia en la remoción de contaminantes. Por lo tanto, se trabajó a diferentes revoluciones por minuto que presentaba la bomba peristáltica (10, 20, 35 rpm) lo que corresponde a trabajar con caudales de (1,5; 4 y 7 L/min) y una densidad de corriente de 14 mA/cm²; además, una vez establecido el caudal óptimo se varió la densidad de corriente (7; 14; 20; 30; 40 y 50 mA/cm²). Cada uno de los estudios se realizó durante 6 h de oxidación electroquímica.

El efecto de la variación de la densidad de corriente en el tratamiento de las muestras de agua residuales se siguió mediante análisis de detergentes (Surfactantes Aniónicos), turbidez, conductividad, pH, temperatura y Demanda Química de Oxígeno (DQO) ya que éste último parámetro representa la eficiencia de oxidación de materia orgánica presente en el agua (Morelli y Szajer, 2000). Además, una vez establecidos los parámetros óptimos se determinó también el Carbón Orgánico Total (COT) ya que su medición indica el porcentaje de mineralización de la materia orgánica (Muñoz y Aldás, 2017), y el potencial de celda para determinar los costos de operación a nivel de laboratorio.

La cantidad de surfactantes presentes en las aguas residuales domésticas fue el parámetro de mayor interés en el estudio, debido a su dificultad de degradación.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El crecimiento poblacional a nivel mundial está relacionado con la contaminación de recursos hídricos debido a su uso en diferentes actividades y a la falta de tratamiento de las aguas residuales antes de ser descargadas a un cuerpo de agua. En este

contexto se encuentra el cantón Rumiñahui localizado en el Valle de los Chillos a 2550 m.s.n.m a una hora de Quito aproximadamente, en donde existen áreas residenciales que envían sus descargas a los ríos sin cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental vigente, como es el caso del conjunto “Arupos de la Hacienda” que a pesar de tener una planta de tratamiento no logra cumplir con los límites máximos de descarga de algunos parámetros y especialmente no elimina eficientemente los COP's como los surfactantes y presenta valores mayores a los de la norma (mayores a 0,5 mg/L).

Los surfactantes son contaminantes de naturaleza orgánica, conocidos por su amplio uso en la formación de detergentes y otros productos de limpieza (Cajas, 2018), ya que presentan propiedades deterativas, emulsificantes, humectantes, entre otras (Cevallos y Ramírez, 2005). Al aumentar la demanda de productos de limpieza para uso en el hogar y en la industria, aumenta también la concentración de este tipo de contaminantes en diferentes compartimentos ambientales (suelo, agua, sedimentos), especialmente en el agua, afectando principalmente su tensión superficial. Los surfactantes después de su uso van directamente a cuerpos de agua o tienen un tratamiento deficiente ya que se forman subproductos tóxicos y más persistentes (Ivanković & Hrenović, 2010).

Se han realizado investigaciones en donde sostienen que los COP's como los surfactantes son compuestos que en la mayoría de los casos no pueden ser removidos eficientemente de las aguas residuales mediante procesos convencionales, ya que interrumpen el proceso de sedimentación primaria, además de disminuir la capacidad de transferencia de oxígeno (Jardak, Drogui y Daghrir, 2016; Manassero et al., 2009; Panizza et al., 2005); mientras que con procesos de adsorción se puede lograr la remoción de estos compuestos con altos porcentajes de eficiencia (mayores al 90%) (Jardak et al., 2016); sin embargo, los procesos de adsorción solo concentran el contaminante y no hay transformación.

Por otro lado, se han estudiado los POA's como la oxidación electroquímica que es una alternativa novedosa en la remoción y mineralización de este tipo de compuestos, logrando resultados mayores al 90% en reducción de TOC y DQO en

aguas residuales sintéticas, mientras que en muestras de aguas residuales reales se evidencian eficiencias de reducción de TOC y DQO mayores al 70% (Chang, Gao y Jiang, 2009; Daghrir et al., 2014; Espinoza-Montero et al., 2013; Jardak et al., 2016; Panizza et al., 2005; Valenzuela, Vasquez-Medrano, Ibanez, Frontana-Uribe y Prato-Garcia, 2017).

Uno de los materiales anódicos más usados en procesos de oxidación electroquímica es el electrodo BDD, ya que este tipo de electrodos presentan características especiales tales como: resistencia a la corrosión, resistencia al ensuciamiento, buena resistencia mecánica, buena conductividad térmica, bajo coeficiente de fricción y gran capacidad para generar radicales hidroxilo ($\cdot\text{OH}$) (Armijos-Alcocer et al., 2017; Espinoza-Montero et al., 2013) en su superficie ya que tiene la capacidad de alcanzar el potencial de oxidación del agua (Ochoa, 2009). La característica más sobresaliente del BDD es que no reacciona con los radicales ($\cdot\text{OH}$), sino que los mantiene fisisorbidos en su superficie y ésta no se modifica fácilmente (García-Morales et al., 2013; Polcaro, Vacca, Mascia y Palmas, 2005). Además, los electrodos BDD presentan gran estabilidad cuando se usan, incluso en condiciones extremas de pH (2 -13) y temperatura (menor a 100 °C) (Ammar, Brahim, Abdelhédi y Samet, 2016).

Por otra parte, la celda electroquímica DiaClean®, utilizada en esta investigación, presenta ventajas como la de mantener los electrodos fijos y a una separación entre sí (0,2 cm) ideal para llevar a cabo el proceso de oxidación electroquímica avanzada (Dartsch & Pupunat, 2017). De acuerdo a los resultados obtenidos en un estudio sobre el funcionamiento de la celda DiaClean®, ésta representa una de las celdas más aptas para la degradación de compuestos orgánicos persistentes, gracias a una excelente distribución de corriente, adecuado transporte de masa (Enciso, Espinoza-Montero, Frontana-Uribe, Delgadillo, & Rodríguez-Torres, 2013), y facilidad de instalación, operación y mantenimiento (Armijos, 2016).

Con el desarrollo de este estudio se espera generar conocimientos sobre procesos de oxidación avanzada mediante el uso de una celda electroquímica DiaClean® dotada con electrodos BDD para la degradación de detergentes presentes en aguas

residuales domésticas. De esta forma, se impulsará nuevos estudios que busquen mejorar los procesos de tratamiento de aguas residuales y hacer frente de forma eficiente a los impactos negativos que se ocasionan a partir de este tipo de efluentes enviados a los cuerpos hídricos.

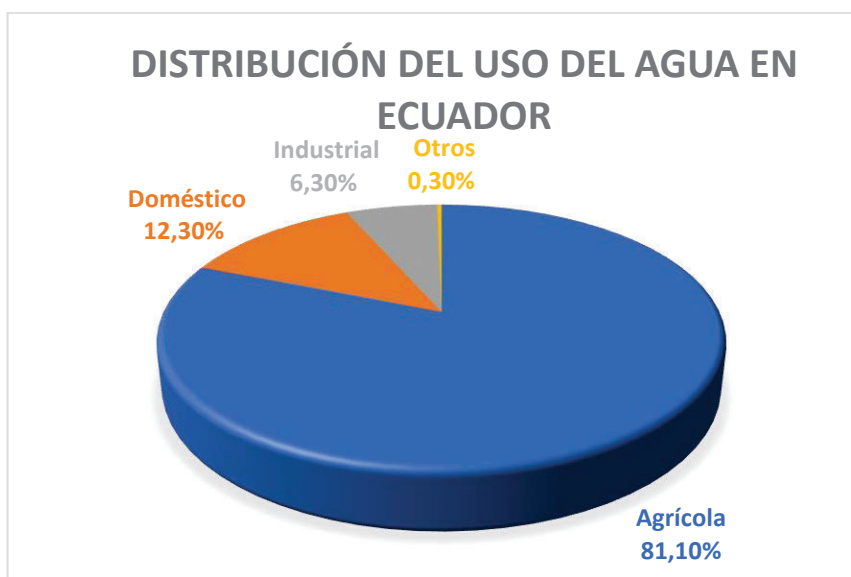
Adicionalmente, es un gran aporte para el país, ya que en futuras investigaciones se pueden estudiar los procesos de oxidación avanzada para aplicarlos a escala real, especialmente en la mejora de la depuración de aguas residuales domésticas e industriales, logrando eliminar otros tipos COP's obtenidos de las diferentes actividades humanas y así entregar un efluente de mejor calidad que beneficiará no solo a la población, sino también al ambiente.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

El agua es un recurso valioso y fundamental para la vida de todos los seres que habitan el planeta, además es un recurso necesario para las actividades humanas, para el crecimiento económico y el bienestar social (Barceló y López, n.d.). En el Ecuador; a pesar de ser considerado como uno de los pocos países que tiene un superávit de agua (Secretaría Nacional del Agua [SENAGUA], 2011), la calidad de ésta se ha visto cada vez más afectada debido al uso inadecuado y poco interés en el tratamiento del agua residual que se genera a causa de las actividades antropogénicas. SENAGUA (2011) registró datos sobre la demanda de agua en el país que indicaron que en el Ecuador el consumo de agua se reparte en el sector agrícola con un 81,1% del caudal utilizado, seguido por el uso doméstico con 12,3%, el sector industrial con el 6,3% y 0,3% para usos recreativos (Figura 1); esto da idea de la cantidad de aguas residuales generadas en estos sectores (CEPAL, 2011; Programa de la Naciones Unidas para el Ambiente [PNUMA] et al., 2008; Torres, 2014).

FIGURA 1. Distribución del uso del agua en el Ecuador



FUENTE: (CEPAL, 2011)

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

De acuerdo al uso del agua se clasifican los efluentes de descarga, cada uno de ellos con diversos contaminantes que son muy difíciles de tratar. Por lo tanto, el tratamiento de aguas residuales debe considerarse una herramienta importante en la sociedad para salvaguardar su ambiente y asegurar el bienestar humano, pues éstas establecen un peligro para la salud pública, lo cual provoca grandes impactos a la población mundial y a la economía de los países. (Silva, Torres y Madera, 2008).

2.1 AGUAS RESIDUALES

Son aquellas aguas que contienen componentes disueltos y en suspensión, luego de ser usadas en las diferentes actividades humanas (Villegas y Vidal, 2009). En este sentido, se conocen diferentes tipos de efluentes que se vierten en cuerpos de agua o en el alcantarillado público de acuerdo a su procedencia, como son: aguas domésticas, aguas residuales industriales, escorrentía por usos agrícolas o ganaderos, y pluviales (Ramalho, 2003).

En Ecuador del total de agua usada, solo el 7% recibe tratamiento convencional antes de ser descargado a un cuerpo de agua (CEPAL, 2011), pero a pesar de esto no cumplen con los límites permisibles de los parámetros necesarios en la determinación de la calidad del agua.

2.1.1 CONTAMINANTES PRIORITARIOS

Los contaminantes prioritarios en un agua residual doméstica son aquellos compuestos principalmente orgánicos que ocasionan potenciales efectos negativos en un cuerpo de agua, altamente usados en los hogares y de difícil degradación con procesos convencionales (Martín De Vidales, 2015; Martínez, 2017; Orjuela y Lizarazo, 2013). Además, su gran uso e introducción al mercado ha llevado a un aumento de su presencia en el ambiente (Martín De Vidales, 2015). Dentro de estos, los compuestos orgánicos persistentes, se encuentran los surfactantes, que son ampliamente usados en diferentes actividades humanas, principalmente en el hogar ya que son constituyentes de productos de limpieza y aseo personal (Knepper y Berna, 2003; Silva et al., 2008; Torres, 2014).

Descripción de los principales parámetros considerados en el análisis del efluente residual doméstico.

Parámetros Físicos

- **Turbidez:** este parámetro se relaciona con la capacidad del agua para transmitir luz (Torres, 2014). La alta turbiedad o la incapacidad de transmitir la luz en un cuerpo de agua se debe principalmente al material en suspensión de diferente tamaño, en donde se encuentra arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica. Además, este parámetro sirve para determinar el grado de tratamiento que requiere un agua residual, la efectividad que tuvo un proceso de tratamiento del agua residual, así como el nivel de potabilidad del agua (Romero, 2009).
- **Sólidos Totales (ST):** Se conoce como sólidos a toda la materia que permanece como residuo luego de un proceso de evaporación y secado a 103 °C. Los sólidos totales se conforman por sólidos disueltos y no disueltos o también conocidos como sólidos suspendidos (Romero, 2009).
- **Sólidos Suspendidos Totales (SST):** corresponden al material no filtrable que presenta una muestra de agua y la determinación de este parámetro es indispensable para conocer el grado de contaminación de aguas residuales y saber la eficiencia de un tratamiento (Romero, 2009).
- **Conductividad Eléctrica:** Es la capacidad que tiene un medio acuoso para transportar corriente eléctrica; y su determinación está afín con la cantidad de sales disueltas y la temperatura a la cual se haga el análisis (Torres, 2014), por esta razón el valor de conductividad obtenido da un estimado de la cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua (Romero, 2009).
- **Temperatura:** la variación de temperatura puede afectar a diferentes procesos de tratamiento por lo que es necesario su control, además en los procesos de oxidación electroquímica se presenta un aumento de temperatura en el agua, por lo cual es necesario mantener estable este

parámetro. En procesos electroquímicos es necesario mantener la temperatura entre 18 – 25 °C (Castañeda-Jimenez, 2014; Domènech et al., 2004; Poyatos et al., 2010).

Parámetros Químicos

- **pH:** el potencial de hidrógeno mide la concentración de iones H^+ y OH^- presentes en una solución, y permite conocer si una solución es ácida o alcalina. Es importante controlar el pH ya que este puede afectar a los métodos de tratamiento y a los equipos metálicos que están en contacto con el agua (Torres, 2014).
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** es la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica e inorgánica oxidable mediante un agente altamente oxidante como es el dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), y se mide en mg/L O_2 (Torres, 2014).
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅):** mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar biológicamente la materia orgánica. Su determinación es importante para dimensionar las plantas de tratamiento de aguas residuales y conocer la eficiencia que tienen los tratamientos (Bolívar, 2004; Muñoz y Aldás, 2017; Torres, 2014).
- **Tensoactivos:** conocidos como agentes de superficie activa, están formados por una parte polar (soluble en agua) y otra no polar (no soluble en agua). Son muy usados, gracias a las propiedades deterativas y de limpieza, para formar detergentes y otros productos usados para la limpieza en el hogar y en la industria (Panizza et al., 2005; Torres, 2014; Villegas y Vidal, 2009).
- **Carbono Orgánico Total (COT):** es la cantidad de carbono que tienen una muestra de agua proveniente de la materia orgánica, es decir, indica la cantidad de compuestos orgánicos presentes en el agua. La mayoría de los contaminantes son de origen orgánico, por lo que, una medida de este

parámetro permite saber el grado de contaminación de un agua y también el grado de mineralización de estos compuestos después de un tratamiento (Bolívar, 2004; Muñoz y Aldás, 2017; Torres, 2014).

2.1.2 TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE AGUAS RESIDUALES

El tipo de tratamiento necesario para tratar un agua residual está ligado al tipo de efluente a tratar y a los límites de vertido a un cuerpo de agua (Ramalho, 2003). Los tratamientos convencionales tienen procesos que pueden ser físicos, químicos y biológicos; estos procesos pueden ser utilizados de diferentes formas dependiendo del agua a tratar. En la Tabla 1, se muestra un resumen de los tipos de tratamientos convencionales más usados para tratar aguas residuales.

TABLA 1. Tratamientos convencionales de aguas residuales

Tratamientos Primarios	Tratamientos Secundarios	Tratamientos Terciarios
Cribado	Lodos activos	Precipitación y coagulación
Sedimentación	Aireación prolongada	Adsorción
Flotación	Lagunaje	Cloración
Homogeneización	Filtros biológicos	Ozonización
Neutralización	Tratamientos anaerobios	Luz ultravioleta

FUENTE: (Cajas Oña, 2018)

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Los tratamientos convencionales se aplican de forma que en cada etapa (primario, secundario y terciario) se consigue eficiencia de remoción de contaminantes del agua. El primer objetivo de las plantas de tratamiento es enviar un efluente que cumpla con los límites permisibles establecidos, cumpliendo así con lo dispuesto en el marco legal ambiental. Sin embargo, existen contaminantes orgánicos que no son eliminados completamente (Guanoluiza, 2013; Orjuela y Lizarazo, 2013; Silva et al., 2008).

2.1.3 LEGISLACIÓN ECUATORIANA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE CUERPOS DE AGUA

En la Constitución Política del Ecuador, la cual se encuentra en vigencia desde el 2008 y modificada el 2015, se establecen disposiciones del Estado referente al tema del ambiente y se aborda el tema de Derecho Constitucional Ambiental Ecuatoriano. Además, por mandato constitucional se conoce que el Estado es el principal garante del cuidado del agua, el cual, junto al Ministerio del Ambiente y administraciones cantonales, se encargan de reglamentar el uso y disposición del agua. (Guanoluiza, 2013; Torres, 2014).

Dentro de las disposiciones para el caso del agua, en el Título VII, Sección sexta, Art. 411, se establece que “El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua” (Constitución de la República del Ecuador, 2008, p. 181).

Uno de los instrumentos legales más aplicados al control y gestión del agua es el Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA). Dentro del libro VI de la Calidad Ambiental se encuentran límites permisibles y prohibiciones para la utilización de los recursos agua, suelos, aire y fuentes de combustión, ruido y desechos sólidos (Ministerio del Ambiente del Ecuador [MAE], 2013; Torres, 2014). El anexo 1, dentro del libro VI del TULSMA, norma la calidad ambiental y de descarga de efluentes del recurso agua.

Además, la presente Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyA) registro oficial 305 del año 2014, establece que “los recursos hídricos son parte del patrimonio natural del Estado y serán de su competencia exclusiva, la misma que se ejercerá concurrentemente entre el Gobierno Central y los Gobiernos Autónomos Descentralizados, de conformidad con la Ley”. En la tabla 2, se muestran los límites máximos permisibles de algunos parámetros,

incluidos los surfactantes o tensoactivos, para la descarga de efluentes líquidos en el sistema de alcantarillado público y cuerpos de agua bajo los criterios del Texto Unificado de Legislación Secundaria (TULSMA) (Guanoluiza, 2013; MAE, 2013).

TABLA 2. Límites máximos permisibles de descarga de aguas residuales

PARÁMETRO	UNIDADES	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE	
		Sistema de alcantarillado público	Cuerpo de agua dulce
Aceites y Grasas	mg/L	100	0,3
DBO ₅	mg/L	250	100
DQO	mg/L	500	250
pH	-	5-9	5-9
Cobre	mg/L	1	1
Sólidos Totales	mg/L	1600	1600
Sulfatos	mg/L	400	1000
Sulfuros	mg/L	1	0,5
Temperatura	°C	< 40	< 35
Tensoactivos	mg/L	2	0,5
Fluoruros	mg/L	-	5
Compuestos Fenólicos	mg/L	-	0,2
Cloro Activo	mg/L	-	0,5

FUENTE: TULSMA Libro VI, 2015

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

2.2 SURFACTANTES

2.2.1 GENERALIDADES

El término surfactante (o también conocido como tensoactivo), se desarrolló a partir de 1950 haciendo referencia a lo que se conoce como Agente de Actividad Superficial (Surface Active Agent, en inglés), y que esta adoptado por la Real Academia Española (Jiménez, 2009). Los surfactantes son bien conocidos por sus

propiedades de limpieza gracias a que son capaces de alterar la tensión superficial de una superficie acuosa o una interfase (aceite-agua; aire-agua), logrando así la solubilidad en agua y disponibilidad de los compuestos orgánicos (Jiménez, Medina y Gracida, 2010). Se consideran contaminantes emergentes ya que no están regulados y la información sobre sus efectos en la salud y el ambiente van tomando gran interés (Becerril, 2009).

Su excesivo uso principalmente en productos de limpieza y de cuidado personal, se ha relacionado con el aumento en la contaminación de cuerpos hídricos, esto debido especialmente a las descargas de aguas residuales municipales que no tienen un correcto tratamiento (Jardak et al., 2016; Manassero, Passalia, Negro, Cassano y Zalazar, 2010).

Este tipo de compuestos pueden convertirse en contaminantes persistentes ya que pueden permanecer en el ambiente de forma indefinida y presentar un alto riesgo de contaminación para las aguas de consumo, ya que estos efluentes contaminados pueden alcanzar los cuerpos hídricos superficiales (Manassero et al., 2009); además, su degradación primaria ocasiona la formación de componentes de mayor toxicidad (Jiménez, 2009), lo que hace más difícil su eliminación con procesos de tratamiento de aguas residuales convencionales (Martínez, 2017).

Pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de molécula en base al tipo de disociación en solución (Salazar, 2014). Dentro de los surfactantes más utilizados están los aniónicos como los alquifenoles etoxilados, con una producción anual a nivel mundial de más de 500.000,0 toneladas, de las cuales el 60% termina en los cuerpos hídricos (Solé et al., 2000).

2.2.2 COMPOSICIÓN DE LOS DETERGENTES

Los detergentes están formados químicamente por varios compuestos, los cuales se clasifican en tensoactivos, coadyuvantes y aditivos, siendo los tensoactivos los principales componentes y se encuentran en mayor proporción.

Los coadyuvantes mejoran las propiedades de los tensoactivos, haciendo que sus

funciones de limpieza y deterativas sean más eficaces. Sin embargo, esto lleva a tener un problema mayor el momento de tratar aguas con estos contaminantes ya que como resultado se tienen cantidades considerables de fósforo, el cual es el principal causante de la eutrofización de ríos y lagos (Jiménez, 2009).

Los aditivos, por otra parte, son compuestos complementarios de detergentes, pero tienen propiedades ajenas a la función deterativa. Dentro de este grupo se hallan los blanqueadores, agentes inhibidores de la corrosión, fragancias, tinturas, suavizantes y agentes para el control de espuma (Varó y Galván, 1998).

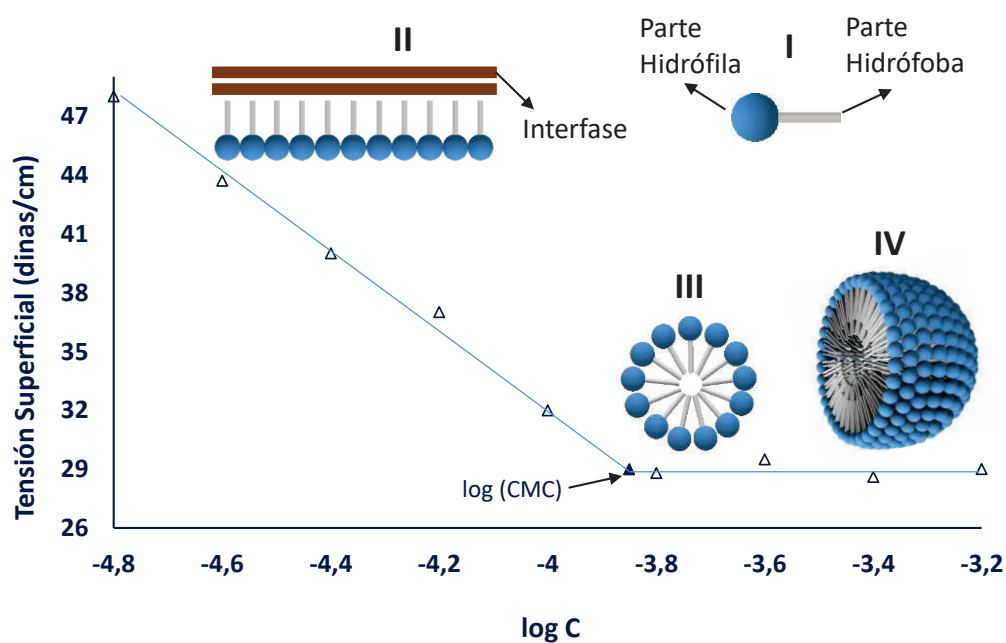
2.2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICO – QUÍMICAS DE LOS SURFACTANTES

Un surfactante es una molécula anfipática, compuesta por una parte hidrófila que a menudo se conoce como el grupo de cabeza polar y una parte hidrófoba que corresponde a la cola (Bergh, 1999; Jiménez, 2009). Por ende, la parte polar (hidrófila) tiene atracción por solventes polares, especialmente el agua, mientras que la cabeza apolar (hidrófoba) tiene afinidad para los solventes orgánicos que son rechazados por el agua (Salazar, 2014).

Su principal característica es la tendencia de adsorber en interfases y superficies, además de la capacidad de formar agregados, llamados micelas que se comportan como moléculas grandes que influyen tanto en la solubilidad de hidrocarburos orgánicos y aceites en solución acuosa como también en la viscosidad (Bergh, 1999; Morelli y Szajer, 2000).

En la figura 2 se muestra una representación del arreglo de las moléculas de surfactantes en una micela: I) surfactante II) antes de la concentración micelar crítica (CMC), el surfactante se encuentra en forma de monómeros III) por encima de la CMC, formación de micelas IV) luego de alcanzar la CMC se forman estructuras como cilindros de micelas; mientras que en la tabla 3 se da una clasificación en la aplicación de los tensoactivos (Jiménez et al., 2010).

FIGURA 2. Representación del arreglo de las moléculas de surfactantes en una micela.



FUENTE: (Jiménez et al., 2010)

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

TABLA 3. Aplicaciones generales de los surfactantes

Aplicaciones
Emulsionantes para sistemas agua-aceite
Humectantes para aplicación cosmética
Emulsionantes en interfaces aceite-agua
Detergentes, desinfectantes, limpieza
Solubilizadores

FUENTE: (Jiménez et al., 2010)

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

En este sentido, las particularidades y funciones para cada grupo de surfactantes están directamente relacionadas con su estructura química (Jiménez, 2009), al igual

que las aplicaciones generales en diferentes sectores como: productos farmacéuticos, curtiembres, cosméticos, textiles, agricultura, biotecnología, alimentos, detergentes, pinturas, microelectrónica, recuperación de petróleo, minería, pulpa y papel, entre otros (Jardak et al., 2016).

2.2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SURFACTANTES

Según la carga del grupo hidrofílico, los surfactantes se pueden clasificar en iónicos y no-iónicos. Los surfactantes iónicos con carga negativa se conocen como aniónicos y con carga positiva como catiónicos; los no-iónicos son aquellos que no presentan carga; mientras que los surfactantes anfóteros hacen referencia a la presencia simultánea de cargas positivas y negativas (Morelli y Szajer, 2000).

- **Surfactantes aniónicos:** se caracterizan por presentar una zona polar cargada negativamente (Jiménez, 2009) y son los más abundantes y ampliamente utilizados en la formulación de detergentes domésticos, y productos de limpieza industrial. Más del 90% de surfactantes producidos son aniónicos, y los más representativos son los alquilbenceno sulfonatos (LAS) por sus grandes propiedades de limpieza y bajo costo. Se estima que en 2003 el consumo global de LAS fue de 18,2 millones de toneladas (Jardak et al., 2016). Representan el 70% de la fracción de producción de todos los tipos de surfactantes a nivel mundial (Varó y Galván, 1998).
- **Surfactantes catiónicos:** son aquellos compuestos que tienen su zona hidrofílica cargada positivamente (Jiménez et al., 2010) y se ionizan en solución acuosa para producir iones orgánicos con carga positiva (Knepper y Berna, 2003). Son ampliamente usados en el campo de suavizado de telas, industria textil, biocidas, construcción de carreteras, desinfectantes, biocidas, emulsionantes, acondicionadores del cabello, industria cosmética y agente humectante, entre otros (Jardak et al., 2016). Su producción anual a nivel mundial es aproximadamente 350.000,0 toneladas, lo que representa cerca del 4-6% de la producción total de los surfactantes (Jardak et al., 2016)

- **Surfactantes no iónicos:** Son aquellos compuestos que no se ionizan en solución (Jiménez, 2009) ya que presentan un grupo hidrofílico no dissociable, lo que hace que sean menos sensibles a electrolitos y además, son compatibles con otros tipos de surfactantes para la formación de mezclas complejas (Jardak et al., 2016; Jiménez, 2009). Son ampliamente usados en el campo de la industria, en aplicaciones domésticas, tienen buenas propiedades deterativas, humectantes y emulsificantes (Jardak et al., 2016; Knepper y Berna, 2003). Estos surfactantes representan cerca del 23% del total de surfactantes producidos (Knepper y Berna, 2003; Varó y Galván, 1998) siendo los más usados los alquifenoles etoxilados y alcoholes etoxilados (Jardak et al., 2016).
- **Surfactantes anfotéricos:** Constituyen la menor fracción de la producción total de surfactantes (1-2%) (Knepper y Berna, 2003), constan de grupos funcionales que pueden ionizarse positiva o negativamente, lo que les permite ser compatibles con surfactantes aniónicos y catiónicos, además, este tipo de surfactantes pueden ser aplicados en sistemas de medio ácido o alcalino. Presentan propiedades específicas que son aprovechadas como composiciones de detergentes, productos cosméticos, formación de shampoo, además de poseer propiedades antibacterianas (Jiménez, 2009; Knepper y Berna, 2003).

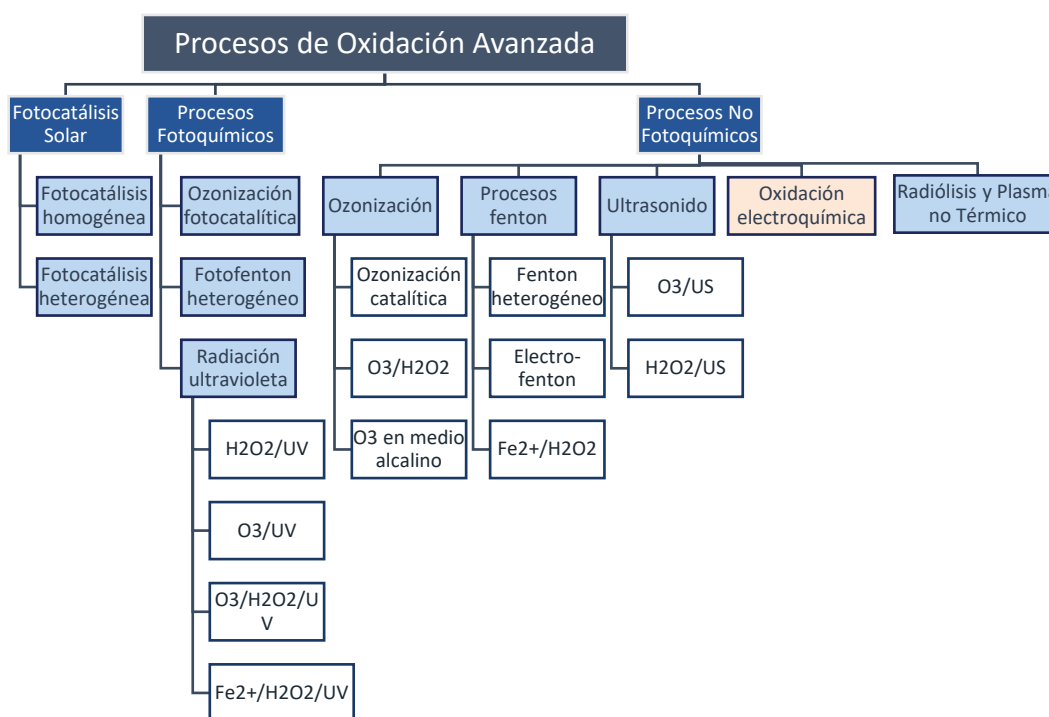
2.3 PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA APLICADOS AL TRATAMIENTO DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS

Los POA's son aquellos tratamientos terciarios que tienen como principal función la generación de especies altamente oxidantes, principalmente el $\cdot\text{OH}$, que es la molécula con el mayor potencial de oxidación en la naturaleza luego del flúor (F_2), éste al estar en contacto con los contaminantes orgánicos e inorgánicos los oxida y los elimina. Esta oxidación se ve reflejada en la remoción de DQO y la mineralización a CO_2 y H_2O se manifiesta en la remoción de COT. Estos procesos se han desarrollado como nuevas alternativas eficientes en la remediación

ambiental, específicamente en el tratamiento de aguas residuales que contengan compuestos orgánicos persistentes (Cano y Barrera, 2014). Además, una de las ventajas de los POA's es que existen diferentes formas de producir los $\cdot\text{OH}$, Fig. 3 (Ochoa, 2009).

Una clasificación de los procesos de oxidación avanzada distribuidos según el criterio de uso de energía lumínica para la generación de radicales $\cdot\text{OH}$ se muestra en la Fig. 3

FIGURA 3. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada



FUENTE: (Amado, 2014; Ochoa, 2009; Poyatos et al., 2010)

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

2.3.1 OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA AVANZADA

Un proceso de oxidación electroquímica avanzada se realiza bajo condiciones normales de presión y temperatura (1 atm y 25 °C, respectivamente) y corresponde a reacciones de oxidación y reducción de manera simultánea, con la oxidación se lleva a cabo la generación del $\cdot\text{OH}$ y la oxidación directa de los contaminantes, en

este caso los procesos de reducción no son de interés (Martínez, 2017; Torres, 2014). La electro-oxidación empleando electrodos de BDD es un proceso de oxidación avanzado, en el cual se oxida el agua hasta generar radicales $\cdot\text{OH}$ (proceso lento) que luego son empleados como oxidantes en el tratamiento de aguas residuales, ecuación 2.1 (Guanoluiza, 2013).



Además la oxidación electroquímica avanzada es un proceso químicamente verde ya que el reactivo que se utiliza es el e^- (Marselli, Garcia-Gomez, Michaud, Rodrigo y Mo, 2003).

El tratamiento de aguas residuales mediante oxidación electroquímica ha tomado gran interés gracias a ciertas ventajas que presentan en comparación a los tratamientos convencionales (Martín De Vidales, 2015). En la tabla 4, se presentan las ventajas de la aplicación de este proceso electroquímico.

TABLA 4. Ventajas de los procesos de oxidación electroquímica avanzada

Ventajas de los procesos de oxidación electroquímica
<ul style="list-style-type: none"> • El electrón es un reactivo de bajo costo y químicamente verde.
<ul style="list-style-type: none"> • No causa efectos negativos al ambiente.
<ul style="list-style-type: none"> • Operación y mantenimiento sencillo.
<ul style="list-style-type: none"> • No solo cambia de fase al contaminante, sino que lo transforma químicamente.
<ul style="list-style-type: none"> • Generalmente se alcanza la mineralización completa de contaminantes orgánicos presentes en el agua.
<ul style="list-style-type: none"> • No se producen lodos residuales.
<ul style="list-style-type: none"> • No se electrogeneran subproductos peligrosos de reacción, o se forman en bajas concentraciones.
<ul style="list-style-type: none"> • Es muy útil para tratar contaminantes persistentes que son difícilmente degradables mediante métodos biológicos.
<ul style="list-style-type: none"> • La velocidad de reacción depende de la intensidad de corriente (A/m^2), la cual es de fácil regulación.

FUENTE: (Martín De Vidales, 2015)

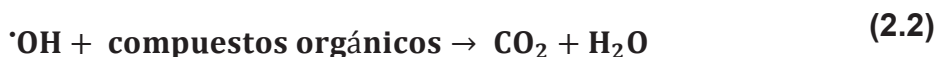
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

La electro-oxidación avanzada se ha transformado en una opción ambientalmente

sana y atractiva para la degradación de compuestos orgánicos recalcitrantes (Ochoa, 2009).

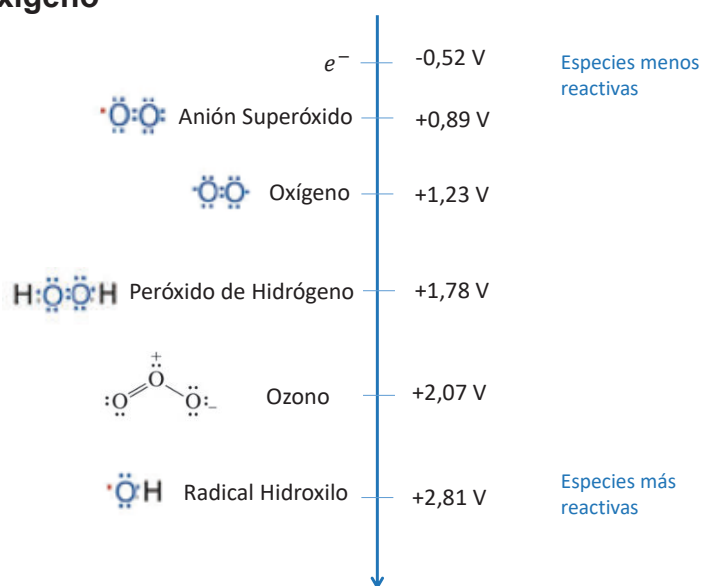
Radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$)

El radical $\cdot\text{OH}$ es un agente oxidante muy reactivo y con un alto potencial oxidativo (2,8 V vs. SHE) (García-Morales et al., 2013). Estos radicales son muy importantes en la naturaleza gracias a su gran capacidad de degradar y oxidar un amplio rango de contaminantes (García-Morales et al., 2013; Ochoa, 2009). En el caso de contaminantes orgánicos persistentes, el radical $\cdot\text{OH}$ es muy eficiente en la acción de eliminarlos completamente en medio acuoso (Armijos, 2016; Espinoza-Montero et al., 2013) ya que genera como subproducto después de la reacción dióxido de carbono y agua (Heredia y Jacho, 2018), como se observa en la ecuación 2.2.



En la figura 4, se muestran diferentes especies reactivas del oxígeno con su distribución de electrones, que es lo que les permite reaccionar fácilmente con otros compuestos cambiando su composición química (Ochoa, 2009) y el potencial redox.

FIGURA 4. Estructura electrónica y potencial de oxidación de especies reactivas del oxígeno



FUENTE: (Ochoa, 2009)

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Para la generación de radicales $\cdot\text{OH}$, el proceso de oxidación electroquímica se lleva a cabo en una celda o reactor electroquímico, en donde se necesita de una fuente de poder para alimentar al sistema con energía eléctrica, la cual va conectada a los electrodos (ánodo y cátodo). En esta investigación se tiene como ánodo un electrodo de diamante dopado con boro, el cual es cargado positivamente y como cátodo uno de acero inoxidable, el cual está cargado negativamente.

El uso del electrodo BDD en procesos de oxidación electroquímica permite que se genere la reacción de oxidación del agua de forma más lenta, haciendo posible la generación de compuestos fuertemente oxidantes como el radical hidroxilo (Martín De Vidales, 2015; Martínez, 2017; Ochoa, 2009).

Densidad de corriente eléctrica

Es una magnitud vectorial, que calcula el movimiento promedio de las cargas en un material y se expresa como unidad de corriente eléctrica por unidad de superficie, tal como se expresa en la ecuación 2.3.

$$I = \int j ds \quad (2.3)$$

Donde:

I = corriente eléctrica [A]

j = densidad de corriente [$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$]

ds = superficie [m^2]

En los procesos de electrólisis es importante determinar el corriente límite que se puede aplicar para así tener establecido un régimen óptimo de electrólisis.

Electrodos

Los electrodos son superficies conocidas como sistemas físicos en donde se producen las semi-reacciones de oxidación o reducción. Para la electrólisis se presentan las reacciones redox en electrodos separados que permitan tener un circuito cerrado de transferencia de electrones, y se conoce como ánodo y cátodo.

- **Ánodo:** electrodo cargado positivamente y en donde ocurren reacciones de oxidación, es decir, que las sustancias pierden electrones.
- **Cátodo:** electrodo cargado negativamente y en donde ocurren reacciones de reducción, es decir, que las sustancias ganan electrones.

Para mayor eficiencia de un proceso electroquímico, se debe considerar las características de los electrodos y las condiciones de operación como son: tipo y concentración de contaminantes, tipo de electrolito, diseño del reactor o tipo de celda utilizada, densidad de corriente, entre otros (Chang et al., 2009).

En cuanto a las características de los electrodos tienen que mostrar una alta resistencia mecánica a la erosión y a la corrosión. Además, la conductividad eléctrica debe ser alta ya que beneficia al proceso en referencia a costos ya que no incrementa el gasto de energía, esto debido a la transformación de energía eléctrica en calor.

Por último, un componente a ser considerado es la vida media del electrodo, ya que el periodo de vida de un material se quiere sea lo más elevado posible, con el objetivo de reducir costos de operación y mantenimiento en una planta de tratamiento de aguas residuales (Cano y Barrera, 2014).

Potencial de la celda

Tomando en cuenta que en estos procesos las reacciones redox resultan de la suma de semi-reacciones, se puede deducir que el potencial de la celda se determina a través de la contribución de cada electrodo. El potencial de una celda es la diferencia de voltaje que existe en el sistema y de forma experimental se determina con un multímetro. La corriente eléctrica aplicada fluye en la celda del ánodo al cátodo debido a la diferencia de potencial eléctrico que hay entre los electrodos. El voltaje medido a través de los electrodos de una celda electroquímica se conoce como potencial de la celda y esto permite tener un control en el gasto de energía requerido para llevar a cabo el proceso de oxidación de contaminantes en un determinado tiempo (Guanoluiza, 2013).

2.4 OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA MEDIANTE UNA CELDA DIACLEAN® Y ELECTRODOS BDD

La oxidación electroquímica avanzada representa una alternativa muy atractiva frente a los métodos tradicionales para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con compuestos orgánicos persistentes (Panizza y Cerisola, 2005; Panizza, Michaud, Cerisola y Comninellis, 2001). Su eficiencia en la oxidación de contaminantes depende de varios factores, en especial del tipo de material del electrodo (Panizza y Cerisola, 2005); en este contexto se han desarrollado estudios que comparan la oxidación de contaminantes orgánicos con diferentes materiales anódicos y se han sugerido los ánodos dimensionalmente estables, película fina de ánodos de óxido, metales nobles y ánodos basados en carbono (Lissens, Pieters, Verhaege, Pinoy y Verstraete, 2003).

En estos estudios varios de los materiales anódicos han presentado una rápida pérdida de su actividad debido a que en su superficie se adsorben residuos como es el caso del carbón vítreo, otros ánodos presentan desprendimiento de iones tóxicos de PbO_2 (dióxido de plomo) como resultado de la oxidación y otros mostraron una limitada vida útil como en el caso de ánodos de SnO_2 (dióxido de estaño) (Panizza et al., 2001). Por el contrario los ánodos basados en carbono como es el caso de los electrodos BDD que han presentado recientemente un gran interés gracias a su alta eficiencia en la oxidación parcial y total de contaminantes orgánicos (Lissens et al., 2003; Panizza et al., 2001).

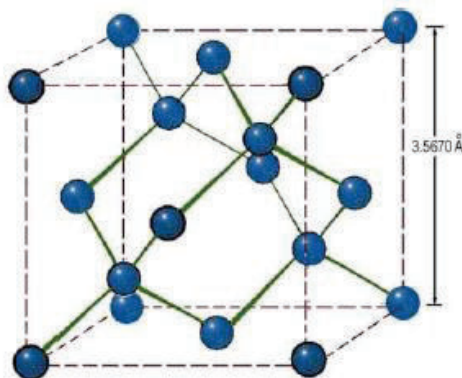
2.4.1 ELECTRODOS DE DIAMANTE DOPADO CON BORO

El electrodo de BDD, surge como nuevo material anódico el cual presenta propiedades únicas gracias a su composición estructural. El diamante sin dopar presenta una alta resistencia a la conducción eléctrica, alta dureza, es inerte químicamente, tiene una alta conductividad térmica y presenta una alta movilidad electrónica (Amado, 2005; Panizza y Cerisola, 2005).

El diamante se forma por enlaces tetraédricos entre átomos de carbono, como se

muestra en la figura 5.

FIGURA 5. Estructura del diamante puro



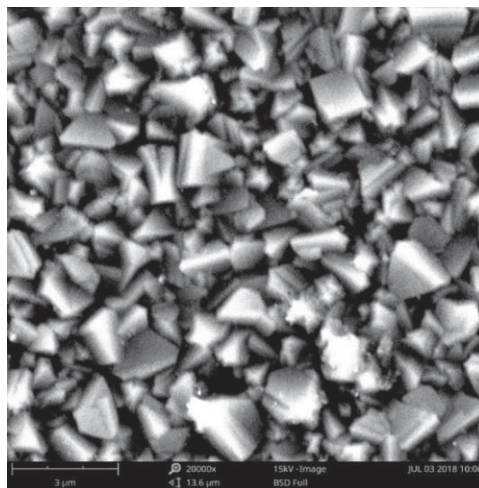
FUENTE: (Amado, 2014)

Cuando el diamante es dopado con boro (átomos de boro reemplazan el lugar de ciertos átomos de carbono durante la formación de este material) (Amado, 2014), aún conserva la mayoría de sus características fisicoquímicas, pero se vuelve un material altamente conductor y adopta otras propiedades electrónicas semi-metálicas que lo hacen apto para la aplicación especialmente en electroquímica (Einaga, 2014; Lissens et al., 2003; Montilla, Quijano, Alonso y Morallon, 2014; Panizza y Cerisola, 2005).

Estos nuevos materiales anódicos, están desarrollados por la deposición de una capa de diamante dopado en un sustrato, que generalmente es silicio, esto ayuda al flujo de corriente que se transmite al electrodo y a su vez sirve como soporte mecánico (Cano y Barrera, 2014), formando así un material resistente y dimensionalmente estable (Ochoa, 2009).

Para conocer la morfología y tener información cualitativa de un electrodo BDD se utiliza un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés), el cual permite identificar y se muestra en la figura 6.

FIGURA 6. Imagen SEM de diamante dopado con boro (BDD), visualizado a una escala de 3 μm



FUENTE: (Macpherson, 2014)

Estos materiales conductores son capaces de donar o recibir electrones gracias a que presentan un espacio entre la banda de valencia y la banda de conducción. En la banda de valencia los electrones se mueven de forma normal mientras que en la banda de conducción, los electrones se mueven de tal manera que conducen corriente (Ochoa, 2009).

Propiedades Electroquímicas de los Electroodos BDD

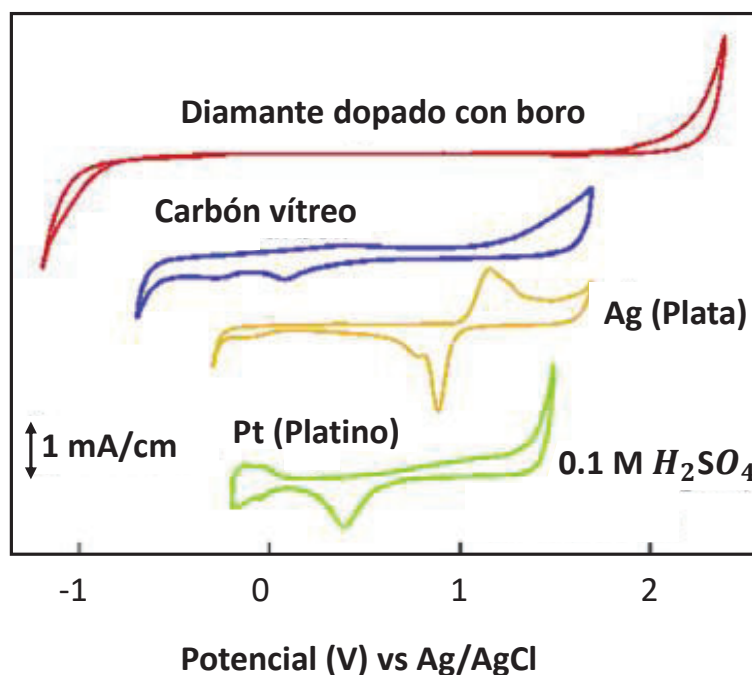
El diamante altamente dopado con boro presenta propiedades tecnológicamente importantes que lo distinguen del resto de electrodos convencionales, como son:

-Una ventana de potencial extremadamente amplia: en el caso de los electrodos BDD la evolución del hidrogeno comienza aproximadamente en -1.25 V y la evolución del oxígeno en $+2.3$ V (Panizza Y Cerisola, 2005); esto permite que no solo se genere oxígeno en la oxidación del agua, si no también oxidantes fuertes como los radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$), ozono (O_3) y peróxido de hidrogeno (H_2O_2) (Einaga, 2014).

En la figura 7, se muestra la comparación de la ventana de potencial del electrodo

electrodo BDD con otros electrodos convencionales, en donde se observa que estos electrodos se caracterizan por una baja densidad de corriente necesaria para la oxidación del agua (Montilla, Gamero-Quijano y Morallón, 2014).

FIGURA 7. Ventana de potencial de varios electrodos



FUENTE:(Einaga, 2014)

-Estabilidad a la corrosión en medios muy agresivos: gracias a que la morfología de los electrodos BDD es estable, puede ser utilizado durante largos ciclos térmicos en la evolución de hidrógeno y oxígeno incluso en medios ácidos (Ochoa, 2009; Panizza y Cerisola, 2005).

-Superficie inerte o químicamente no reactiva: esta característica permite no tener cambios físicos o químicos en su superficie por parte de los contaminantes contenidos en el agua, además de sus bajas propiedades de adsorción, lo que ayuda a que no se depositen subproductos de las reacciones de óxido-reducción, como es el caso de la polimerización, lo que termina en el incremento de la vida útil de este tipo de electrodos (Einaga, 2014; Ochoa, 2009; Panizza y Cerisola, 2005).

-Bajo coeficiente de expansión térmica y elevada conductividad térmica: facilita la liberación de calor que se genera durante el proceso de electrólisis o en otras aplicaciones químicas y electroquímicas (Cano y Barrera, 2014).

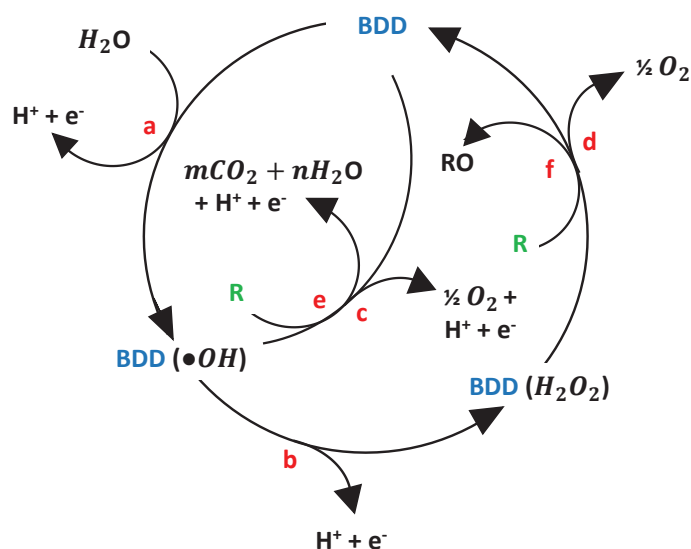
Gracias a estas propiedades los electrodos BDD prometen ser un material muy eficaz para ser aplicado en diferentes áreas, como son: electro-síntesis, generación de ozono, análisis electroquímico y sensores, medicina y biosensores y en tratamiento de agua, en donde se incluye la purificación de aguas residuales y la desinfección de agua potable (Einaga, 2014; Panizza y Cerisola, 2005).

Principio del funcionamiento de los electrodos BDD

Los ánodos BDD se conocen como electrodos no activos, es decir, que los electrones no interaccionan con la superficie. Este tipo de electrodos no presentan sitios catalíticos activos (Ochoa, 2009), por lo tanto, los radicales hidroxilo que se forman durante la oxidación del agua son fisisorbidos o ligeramente adsorbidos en la superficie (Montilla et al., 2014).

Estos agentes altamente oxidantes, pueden provocar la reacción de oxidación de compuestos orgánicos presentes en aguas residuales que no pueden ser eliminados en su totalidad por tratamientos convencionales (Lissens et al., 2003). Al entrar en contacto el agua con los electrodos, el agua empieza su proceso de oxidación y el ánodo de BDD permite la formación de los radicales hidroxilos como un intermediario antes de formarse el oxígeno. En la figura 8, se muestra el mecanismo de oxidación del agua y la etapa en donde son formados los radicales $\cdot\text{OH}$ y listos para oxidar la materia orgánica.

FIGURA 8. Mecanismo de oxidación del agua en un electrodo BDD



FUENTE: (Amado, 2014)

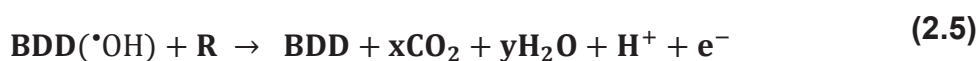
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

La reacción intermedia para la generación de radicales hidroxilos utilizando un ánodo BDD, se presenta en la ecuación 2.4. $H^+ + e^-$



Muchas investigaciones han reportado que durante la electrólisis con ánodos BDD y en altos potenciales, se logra mineralizar por completo diferentes contaminantes orgánicos mediante la electro-generación de radicales $\cdot\text{OH}$, obteniendo como resultado CO_2 y H_2O (Lissens et al., 2003; Panizza y Cerisola, 2005; Panizza et al., 2001).

En la ecuación 2.5 se muestra la reacción de oxidación final de un compuesto orgánico genérico (R) mediante los radicales $\cdot\text{OH}$ fisisorbidos en el electrodo BDD.



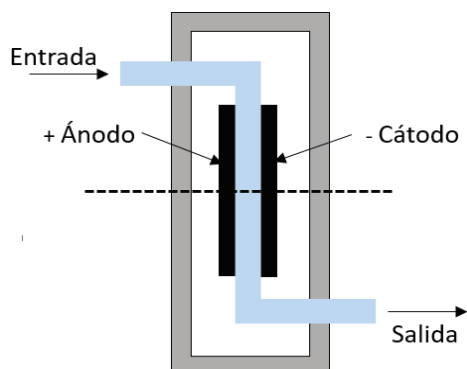
2.4.2 CELDA DIACLEAN®: APLICACIONES Y EFICIENCIA

Uno de los materiales electródicos que han presentado mayor eficiencia en oxidación de contaminantes orgánicos es sin duda el BDD, sin embargo, su disposición en el tipo de celda electrolítica es otro parámetro de diseño importante a ser evaluado para que juntos representen una herramienta ideal en la remediación ambiental (Armijos, 2016)

Actualmente se están estudiando diferentes tipos de reactores electroquímicos que permitan la remoción de contaminantes orgánicos mediante el uso de electrodos BDD (Ochoa, 2009). Existe una gran variedad de sistemas en donde se acoplan reactores tipo Bach o de flujo continuo. Varios autores han determinado que los reactores de flujo continuo pueden ser usados con diferentes procesos de oxidación avanzada con una alta eficiencia en la electro-degradación de contaminantes orgánicos recalcitrantes (Brillas, Sirés y Oturan, 2009). En este sentido, la celda DiaClean® ha sido estudiada y por ser una celda sin división se requiere una menor cantidad de energía, ya que el voltaje necesario para romper la resistencia existente entre el cátodo y el ánodo es menor que en una celda dividida (Ochoa, 2009).

En la figura 9 se muestra un esquema del tipo de celda sin división con flujo axial simple que fue usada en este proyecto experimental dotada con un electrodo anódico BDD y un cátodo de acero inoxidable.

FIGURA 9. Celda electroquímica de flujo continuo



FUENTE: (Martín De Vidales, 2015)

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Bajo estas consideraciones el reactor DiaClean® ha tomado un papel muy importante en la electro-oxidación especialmente aplicado para conseguir la desinfección de agua potable y tratar aguas residuales. Entre otras aplicaciones de la celda comercial DiaClean® se tiene la desactivación de microorganismos, eliminación de gérmenes con mayor eficiencia que el cloro, en industria de alimentos, en torres de enfriamiento, piscinas y spas, agronomía, al igual que aplicaciones en plantas y en acuicultura (WATERDIAM, 2015).

Se considera un tipo de reactor que junto a los procesos de oxidación avanzada representan una gran eficiencia en diferentes campos de la remediación ambiental, esto debido a que presenta una operación simple, completamente automatizada, se puede trabajar en modo Batch o en modo continuo, no necesita químicos, bajo mantenimiento asegurando una correcta limpieza de los electrodos, bajo consumo de energía y bajo costo de instalación (WATERDIAM, 2015).

En trabajos como el de Basha et al., (2011) se puede observar el bajo costo de energía con que se removió DQO de un efluente industrial textil; 94,3% removido con $4.32\text{kWh (kg DQO)}^{-1}$, llevando a un ahorro en costos de operación. Por otro lado, en los resultados de la investigación de Dartsch y Pupunat (2017), muestran la aplicación de la celda DiaClean® y electrodos BDD en la preservación de frutas cítricas reduciendo el uso de fungicidas los cuales presentan un alto riesgo para el ambiente y la salud humana.

En relación a la electro-oxidación de compuestos orgánicos recalcitrantes como son los surfactantes presentes en aguas residuales domésticas o industriales, no existe mucha información en cuanto a la aplicación de procesos de oxidación avanzada con electrodos BDD y la celda electroquímica DiaClean®, sin embargo, estudios como los de Panizza, Delucchi y Cerisola (2005); Louhichi et al., (2008) y Schwalz et al., (2009), reportan altas eficiencias de remoción de surfactantes aniónicos (mayores al 90%) (Schmalz, Dittmar, Haaken & Worch, 2009), presentes en aguas residuales reales y sintéticas mediante la electro-degradación con electrodos BDD.

En la tabla 5 se resume los resultados de más investigaciones que usaron el proceso de oxidación avanzada electroquímico con electrodos BDD para la degradación de

compuestos orgánicos recalcitrantes.

TABLA 5. Degradación de contaminantes orgánicos persistentes mediante electro-oxidación con electrodos BDD y celdas electrolíticas.

Contaminante	Condiciones experimentales	Resultados	Ref.
Surfactante aniónico	$j = 4 \text{ mA/cm}^2$; [Surfactante] ₀ = 20 mg/dm ³ ; pH = 7; Q = 2,7 Ah/dm ³	83% COT removido; > 80% surfactantes removidos; SEC = 10 – 20 kWh/m ³	(Lissens et al., 2003)
Surfactante catiónico	$j = 4 \text{ mA/cm}^2$; [Surfactante] ₀ = 20 mg/dm ³ ; pH = 7; Q = 2,7 Ah/dm ³	68% COT removido; > 80% surfactantes removidos; SEC = 10 – 20 kWh/m ³	(Lissens et al., 2003)
Agua sintética	[LAS] ₀ = 750 mg/dm ³ ; [Na ₂ SO ₄] = 0.5 N; I = 25 mA cm ⁻² ; Caudal = 180 dm ³ h ⁻¹ .	Remoción completa del surfactante; 100% eficiencia	(Panizza et al., 2005)
Agua residual de lavado de autos	[DQO] ₀ = 920 mg/dm ³ ; [Surfactantes aniónicos] = 40 mg/dm ³ ; $j = 25\text{-}75 \text{ mA/cm}^2$; Flujo = 60-180 dm ³ /h.	Remoción de DQO > 95%; Remoción de surfactantes > 90%	(Panizza et al., 2005)
Agua de lavado de autos	$j = 15\text{-}60 \text{ mA/cm}^2$	Eficiencia de corriente inicial aprox. 40%	(Panizza y Cerisola, 2005)
Agua residual industrial	$j = 7\text{-}36 \text{ mA/cm}^2$; [DQO] ₀ = 1500-8000 mg/L	Eficiencia de 85 – 100%	(Panizza y Cerisola, 2005)
Surfactantes aniónicos (SDBS)	$j = 30 \text{ mA/cm}^2$; [SDBS] = 0,3 g/dm ³ ; [Na ₂ SO ₄] = 0,1 M; Q = 35 Ah/dm ³ ; [DQO] ₀ = 700 mg/dm ³	100% DQO removido; > 90% COT removido	(Louhichi, Ahmadi, Bensalah, Gadri y Rodrigo, 2008)
Efluente secundario de una PTAR	Caudal = 720 L/h; $j = 2.5\text{-}120 \text{ mA/cm}^2$, pH = 7.9; [DQO] ₀ = 8,9 – 10 mg/L; t = 60 min	Formación de cloro; > 90% de DQO removido	(Schmalz et al., 2009)
Agua sintética con herbicida	Celda electroquímica sin división; [Herbicida] = 50 mg/L; $j = 0.5\text{-}1,5 \text{ mA/cm}^2$; t = 300 min	> 99% herbicida removido; 65.39 – 82,34% COT removido; 56 – 65 % DQO removido	(Valenzuela et al., 2017)

(Continuación Tabla 5)

Agua residual doméstica	[DQO]₀ = 80 mg/L; [COT]₀ = 20 mg/L; Color = 100 TCU; pH = 7; j = 26,5 mA/cm²; t = 120 min; Caudal = 120 mL/min	78.2% DQO removido; 70% COT removido; 89,5% color removido; costo = 7,98 \$/m ³	(Daghrir et al., 2014)
Surfactante no iónico (Nonilfenol Etoxilato-7)	Celda DiaClean®; pH = 9,25; j = 40 mA/cm ² ; [NP ₇ EO] ₀ = 500 mg/L; Caudal = 12,6 L/min; t = 8 h	90% COT removido; 90% DQO removido; SEC = 2,09 kWh/L	(Armijos-Alcocer et al., 2017)
Efluente de tratamiento secundario de una PTARM	Celda DiaClean® 401 y 1001; t = 3 h; Caudal = 50 dm ³ /h; [DQO] ₀ = 25 mg/dm ³ ; [COT] ₀ = 15 mg/dm ³ ; E-coli = 5400 – 9100 UFC/mL; j = 0.11 mA/cm ²	Desinfección completa, desactivación de E-coli en Q = 0,031 Ah/dm ³ . Oxidación directa por (•OH)	(Cano et al., 2016)

Donde: j = densidad de corriente; [SDBS] = Concentración de dodecibencenosulfonato de sodio; PTAR = Planta de tratamiento de aguas residuales; Q_e = carga eléctrica; t = tiempo de electrólisis; TCU = unidad de color verdadero; CFU = Unidades formadoras de colonias (E-coli); DQO = Demanda química de oxígeno; COT = Carbono orgánico total; SEC = Consumo de energía específico.

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

3.1.1 SELECCIÓN DEL SITIO DE MUESTREO

Para el desarrollo de este trabajo de investigación el sitio seleccionado para el muestreo de agua residual doméstica fue el efluente doméstico del conjunto habitacional “Arupos de la Hacienda” ubicado al norte del cantón Rumiñahui. Este conjunto consta de una planta de tratamiento convencional y envía sus aguas al río San Pedro. En la figura 10 se observa la ubicación del sitio de muestreo.

FIGURA 10. Ubicación geográfica del lugar de muestreo



ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

3.1.2 TOMA DE MUESTRAS

Para la toma de muestras en campo se tomaron medidas de seguridad en cuanto a la vestimenta, mascarillas, y guantes para poder acceder al lugar de muestreo.

Durante tres días se tomaron muestras puntuales de agua en las horas pico de descarga del condominio que corresponde a las 07h00, 13h00, y 18h00, para analizar en qué horario presenta mayor concentración de detergentes. Las muestras se obtuvieron en base a lo establecido en la norma técnica NTE INEN 2176 referente a técnicas de muestreo (Guanoluiza, 2013), para luego ser transportadas al laboratorio, en donde se almacenaron en refrigeración para finalmente hacer la caracterización de las aguas residuales (Servicio Ecuatoriano de Normalización [INEN], 1998).

3.1.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS AGUAS RECOLECTADAS

Se escogió el horario de descarga de agua residual con mayor grado de contaminación de detergentes. Luego de establecer el horario de muestreo se realizó un análisis referente a los siguientes parámetros: DQO, DBO₅, sólidos totales, temperatura, pH, turbidez y conductividad. Las metodologías, materiales, equipos y reactivos usados en la caracterización fisicoquímica de las aguas recolectadas se describen a continuación.

Metodología empleada en la caracterización fisicoquímica de las muestras recolectadas

En la tabla 6 se detalla en resumen las metodologías utilizadas en el análisis de los parámetros físico-químicos en las aguas residuales domésticas.

TABLA 6. Metodologías de los parámetros analizados en la caracterización de las muestras recolectadas

Parámetro	Método	Equipo
DQO	Espectrofotometría HACH	-Reactor de DQO, HACH, 0°C – 150°C. -Espectrofotómetro HACH DR/4000 U
Surfactantes	Método HACH 8028	-Espectrofotómetro HACH DR/4000U
DBO	APHA 5210 B	-Botellas ámbar para DBO -Equipo OxyTop -Incubadora

(Continuación tabla 6)

Sólidos totales	Gravimétrico	-Mufla MF-03/05 -Estufa BINDER
Potencial de Hidrógeno	APHA método 4500-H	-Mettler Toledo SevenCopact
Conductividad	HACH-8160	-Conductímetro Metrohm 912
Turbidez	HACH DR/850 - 95	-HACH DR/850

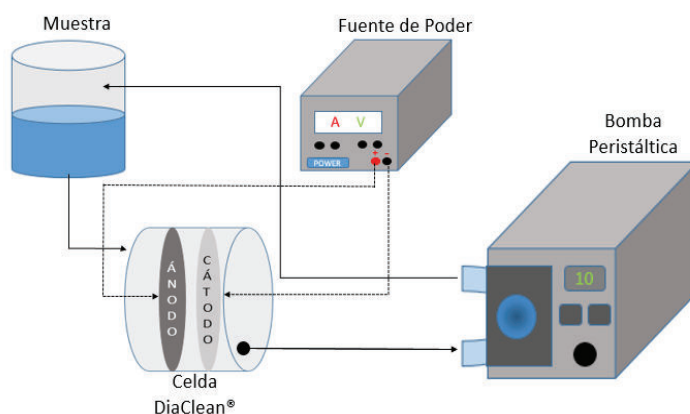
FUENTE: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1996.

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

3.2 DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN

El reactor de trabajo operó en un sistema de recirculación. Este sistema se compuso por una bomba peristáltica MasterFlex I/P modelo 77600-62, la cual controlaba el caudal con el que se trabajó. Se acopló la celda DiaClean® de flujo axial simple; los electrodos que componen la celda son circulares con un área igual a 70 cm², separados entre sí a 0,2 cm. El ánodo fue un electrodo de diamante dopado con boro (BDD) y el cátodo fue acero inoxidable. También se acopló un potenciostato GW INSTEK SPS-3610 (10 A) para controlar la corriente aplicada a la celda y finalmente un reservorio en donde se colocó el agua residual a tratar. El esquema del sistema de recirculación con celda DiaClean® y electrodo BDD se muestra en la figura 11.

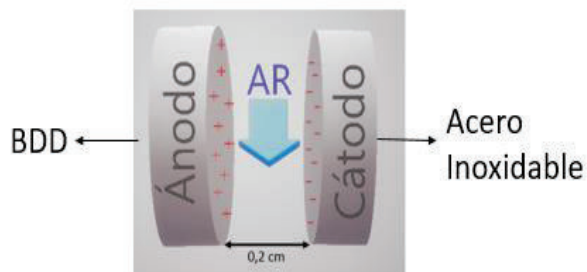
FIGURA 11. Esquema del sistema de recirculación con celda DiaClean® y electrodo BDD



ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

En la figura 12 se observa la distribución de los electrodos dentro de la celda, la cual no presenta división y es de flujo axial simple.

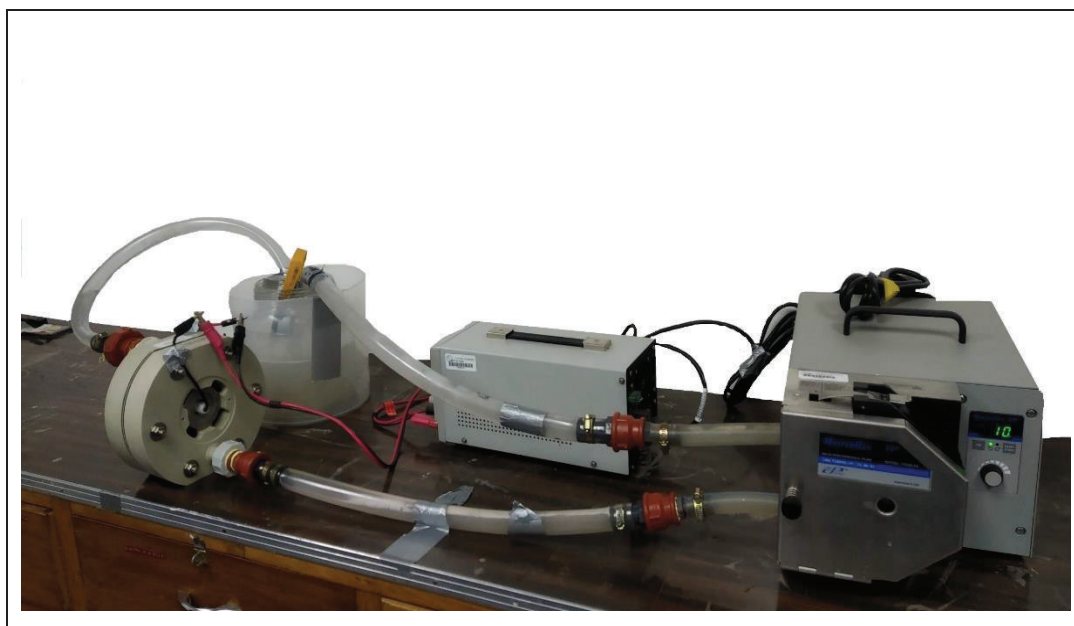
FIGURA 12. Esquema de los electrodos en la celda DiaClean®



ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

En la figura 13, se observa el sistema de recirculación con el que se trabajó en el laboratorio de electroquímica – PUCE.

FIGURA 13. Reactor DiaClean® acoplado a un sistema de recirculación



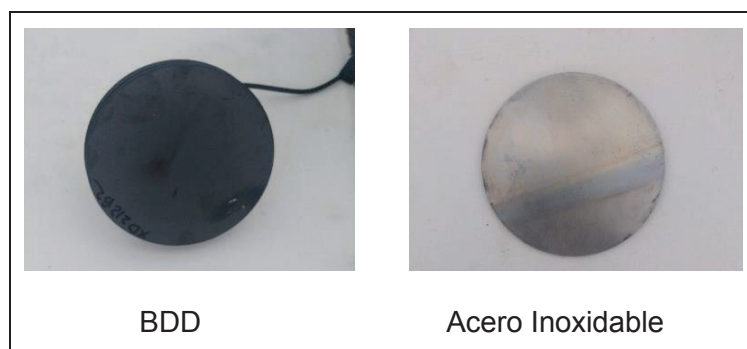
FUENTE: Cisneros, 2019

La degradación de surfactantes se llevó a cabo en la celda DiaClean® compuesta con electrodos BDD y acero inoxidable.

En la figura 14, se muestra la celda electroquímica que se utilizó para este trabajo.

FIGURA 14. Celda electroquímica DiaClean ®**FUENTE:** Cisneros, 2019

El electrodo que se usó como ánodo fue de diamante dopado el cual es capaz de soportar una densidad de corriente de hasta 1 A/cm^2 y tiene un sustrato de soporte de p-silicón. El ánodo y cátodo tienen una superficie igual a 70 cm^2 . En la figura 15 se observa los electrodos circulares BDD y acero inoxidable usados en la celda DiaClean ®.

FIGURA 15. Electrodo BDD y acero inoxidable**FUENTE:** Cisneros, 2019

3.2.1 ELECCIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO

Para establecer los caudales de trabajo se realizó un ensayo en donde se registró el tiempo promedio en el cual un volumen de 200 mL pasó a través del reactor en cada valor de rpm de la bomba peristáltica. Una vez determinado en tiempo promedio se calculó el caudal para cada valor y se escogió los caudales que presentaron mayor diferencia.

Posteriormente se realizaron ensayos con una densidad de corriente continua de 14 mA/cm^2 . A esta densidad de corriente se evaluó los tres caudales escogidos en los ensayos previos $1,5 \text{ L/min}$, 4 L/min , 7 L/min .

Durante el desarrollo de esta investigación se trató un volumen total de agua residual de 4 L . Una vez encendida la bomba peristáltica se contabilizó 60 segundos para que el agua residual ocupe todo el sistema de recirculación, a continuación, se encendió el potencióstato y se controló la corriente aplicada (1 A) para cada uno de los caudales establecidos. Se monitoreó el proceso de electrólisis mediante el análisis de detergentes, DQO y turbidez cada hora durante 6 horas.

Este proceso se repitió para cada flujo de caudal alimentado al reactor. Para determinar el caudal óptimo se comparó los resultados de los parámetros fisicoquímicos (DQO, detergentes y turbidez) de las muestras de agua residual doméstica antes y después del tratamiento.

3.2.2 DETERMINACIÓN DE LA CORRIENTE ÓPTIMA

Una vez escogido el caudal óptimo se procedió a estudiar la variación de densidad de corriente para determinar la de mejor remoción de surfactantes a escala de laboratorio.

En estos ensayos se estudió seis densidades de corriente 7 , 14 , 20 , 30 , 40 y 50 mA/cm^2 , lo que corresponde a aplicar corrientes de $0,5$, 1 , $1,5$, 2 , 3 y 4 A respectivamente. La determinación de la densidad de corriente óptima se realizó tomando en cuenta los resultados de los mismos parámetros fisicoquímicos que se estudiaron anteriormente para definir el caudal óptimo y adicionalmente se monitoreó pH, conductividad, temperatura, y potencial de la celda.

3.2.3 CONTROL DEL POTENCIAL EN LA CELDA

La celda recibe un flujo de corriente que viene de una fuente de poder el cual aplica el potencial necesario para que circule la corriente establecida en este trabajo. Durante el proceso de electrólisis es necesario controlar la potencia generada en la

celda DiaClean® y se acopló un multímetro el cual midió el potencial en voltios durante todo el proceso. En la figura 16 se puede observar el sistema de control de potencia en la celda.

FIGURA 16. Control del potencial de la celda DiaClean ®



FUENTE: Cisneros, 2019

3.3 PROCESO ANALÍTICO

Una vez determinado el caudal y corriente óptima a la cual se obtuvo mayor eficiencia de degradación de detergentes se realizó un análisis de los siguientes parámetros: DQO, surfactantes, pH, conductividad, turbidez, temperatura y además, carbono orgánico total (COT), ya que su medición indica el porcentaje de mineralización de la materia orgánica (Muñoz y Aldás, 2017).

Finalmente se realizó el estudio de la cinética de degradación empleando los datos de los diferentes valores de corriente y se lo hizo en función de la concentración de Detergentes y DQO. De esta manera, se determinó el orden de reacción y la constante cinética. Los datos se ajustaron a la ecuación de primer orden como se observa en la ecuación 3.3. (Ochoa, 2009)

$$C_t = C_o e^{-kt} \quad (3.1)$$

Donde,

C_t es la concentración del parámetro en estudio a un tiempo específico, C_o es la concentración inicial (mg/L), k es la constante de velocidad (min^{-1}) y t es el tiempo de reacción (min).

3.4 ESTUDIO DEL CONSUMO ENERGÉTICO

Con el objetivo de evaluar el consumo energético se aplicó la ecuación de Martínez-Huitle y Brillas (2009), la cual relaciona el consumo energético con el volumen de muestra tratada en cada corrida, tal como se describe en la ecuación 3.4.

$$\text{Consumo Energético} = \left[\frac{V * A * t}{1000 * Vs} \right] \quad (3.2)$$

Donde **V** es el promedio de potencial medido (voltios), **A** es corriente aplicada en (amperios) **t** es el tiempo de reacción y **Vs** corresponde al volumen de muestra total tratada en (m³) (Ochoa, 2009).

Como parte del estudio del consumo energético también se tomó en cuenta el consumo por parte de la bomba peristáltica y se lo determina según la ecuación 3.5.

$$\text{Consumo Energético Bomba} = P * t \quad (3.3)$$

Donde **P** es la potencia de la bomba peristáltica la cual es 1 HP = 760 watts y **t** es el tiempo de reacción.

3.5 ANÁLISIS DE COSTOS

Para el análisis de costos del sistema de oxidación electroquímica en el tratamiento terciario de agua residual doméstica se consideró dos costos: el costo de instalación y el costo de operación y mantenimiento del sistema.

3.5.1 COSTO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTRO-OXIDACIÓN

El costo de instalación corresponde a todo el material necesario para que el sistema de recirculación junto a la celda DiaClean® y su sistema eléctrico funcionen correctamente. Este costo se obtuvo de las facturas de compra y documentos de cotización de todos los equipos utilizados en este reactor piloto: bomba peristáltica y accesorios, fuente de poder, manguera y acoples para cerrar el circuito, reservorio y celda DiaClean® con los electrodos.

3.5.2 COSTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTRO-OXIDACIÓN

Se tomó en cuenta el costo por consumo energético de la celda DiaClean® y la bomba peristáltica que se usó para tratar 4 L de muestra a un flujo de alimentación de 1,5 L/min y densidad de corriente de 50 mA/cm² con lo cual se obtuvo los porcentajes más altos de degradación de surfactantes y remoción de DQO en seis horas de electrólisis.

En el costo de operación se obtuvo con el consumo energético total durante el tiempo que se llevó a cabo el proceso de electro-oxidación de aguas residuales domésticas en este proyecto de investigación. Este valor se obtuvo mediante el control de la potencia en la celda y la potencia de la bomba peristáltica, lo cual nos permite conocer la cantidad de energía eléctrica consumida tal como se describe en el estudio de consumo energético (**apartado 3.4**).

El costo de la energía eléctrica se obtuvo del “PLIEGO TARIFARIO PARA LAS EMPRESAS ELECTRICAS DE DISTRIBUCIÓN” publicado por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad para el periodo enero-diciembre del 2018 (Heredia y Jacho, 2018). Se tomó en cuenta la tarifa general del kWh (\$ 0,063) en donde se incluyen instituciones educativas privadas, que fue en donde se realizó todos los ensayos (Empresa Eléctrica Quito, 2016) (ARCONELC, 2018).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN INICIAL DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

El análisis físico-químico de las aguas residuales recolectadas se realizó para conocer el estado inicial de los parámetros establecidos y saber si cumplen o no con la normativa ambiental vigente.

Previamente se realizó un monitoreo de las aguas residuales durante 4 días en tres horarios diferentes (07h00, 13h00, 18h00), lo que sirvió para definir el horario en el cual se obtuvo mayor concentración de surfactantes. Es así que se estableció un intervalo entre las 12h00 y 13h30 para tomar una muestra representativa. Posteriormente en ese horario establecido se tomaron todas las muestras de agua para la fase de tratamiento mediante electro-oxidación avanzada.

Una vez establecido el horario de muestreo se realizó un análisis físico-químico a una muestra compuesta para conocer si cumple o no con los límites máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce establecidos por el TULSMA.

Se consideró realizar análisis de parámetros respecto a la carga orgánica del agua residual doméstica, ya que éstas se caracterizan por un alto grado de contaminación de naturaleza orgánica y, además, los surfactantes ya hemos mencionado que están formados por una parte hidrocarbonada, por lo que resulta importante conocer los niveles de surfactantes, DBO y DQO principalmente.

Es importante tener presente que las aguas residuales domésticas que se utilizó en este estudio presentan un tratamiento convencional previo a su descarga, por lo tanto, los niveles de los parámetros físico-químicos no van a estar muy altos del límite máximo permisible.

Como se muestra en la tabla 7 algunos parámetros si cumplen con la normativa, los cuales se descartan en los posteriores análisis.

Los resultados de este análisis muestran que los parámetros que no cumplen con la normativa son DQO, DBO y Surfactantes.

TABLA 7. Análisis Físico-químico Inicial del Agua Residual Doméstica

Parámetro	Unidades	Medición	Límite máximo permisible	Cumplimiento
DQO	mg/L	370,4	250	NO
DBO ₅	mg/L	138	100	NO
Surfactantes	mg/L	1,732	0,5	NO
Turbidez	NTU	121	-	No Aplica
pH	-	7,54	5 - 9	SI
Sólidos Totales	mg/L	656,2	1600	SI
Conductividad	us/cm	838,6	-	No Aplica
Temperatura	°C	22,1	< 35	SI

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL REACTOR

4.2.1 ELECCIÓN DEL CAUDAL

Para establecer los caudales de trabajo se varió los valores de revoluciones de la bomba peristáltica entre 10 y 35 rpm y calculando diferentes valores de tiempo (t_1 , t_2 y t_3) para obtener un tiempo promedio ($t_{promedio}$) como se detalla en la tabla 8 y así encontrar los valores de caudal con una mayor diferencia entre sí para ser utilizados en los posteriores ensayos.

En los procesos de electro-oxidación avanzada una de las variables más importantes es el caudal de alimentación al sistema ya que influye en el tiempo de residencia del agua en el reactor y esto a su vez en la velocidad de oxidación que sufren los compuestos orgánicos (Ramalho, 2003).

En tratamientos de aguas residuales mediante electro-oxidación es esencial conocer el caudal que presente una buena transferencia de masa y un correcto tiempo de residencia del agua contaminada dentro del reactor (Ochoa, 2009) que

permita una buena interacción del agua con las especies oxidantes formadas en la celda electroquímica.

TABLA 8. Caudales determinados experimentalmente para cada valor de revoluciones por minuto (rpm) de una bomba peristáltica.

rpm	t ₁ (s)	t ₂ (s)	t ₃ (s)	t promedio (s)	Q (L/min)
10	8,1	7,9	8,2	8,07	1,5
15	6,33	6,1	5,9	6,11	2
20	2,9	3,16	3,5	3,19	4
25	2,5	2,8	2,09	2,46	5
30	2,39	2,2	2	2,20	5,5
35	1,67	1,7	1,6	1,66	7

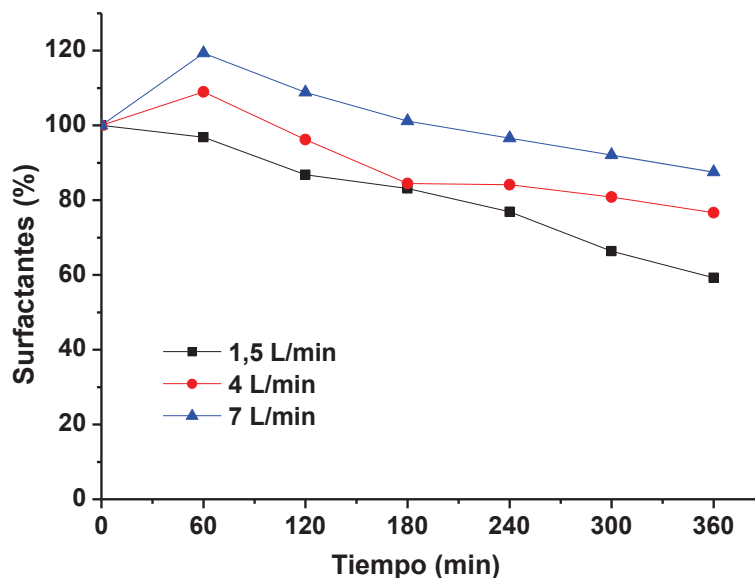
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Una vez establecidos los caudales de trabajo (1,5, 4 y 7 L/min) se aplicó una densidad de corriente de 14 mA/cm² para determinar el caudal óptimo en el proceso de electro-oxidación. Esto se logró monitoreando los parámetros fisicoquímicos (Surfactantes, DQO, turbidez, pH, conductividad, y temperatura) durante cada proceso de degradación en intervalos de tiempo de 60 min durante seis horas de electrólisis. Los datos obtenidos en esta fase se presentan en el **Anexo 1**.

Seguimiento de degradación de surfactantes al variar el flujo de alimentación.

En la figura 17 se observa que el porcentaje de remoción de surfactantes es mayor cuando el flujo de alimentación es menor. Con un caudal de 1,5 L/min se obtuvo el mayor porcentaje de remoción, 40,7%, mientras que al aumentar el caudal a 4 L/min se obtuvo una remoción de 23,36%, y con un flujo de alimentación de 7 L/min un porcentaje de remoción de 12,5%.

FIGURA 17. Seguimiento de la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min, 4 L/min y 7 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm²)



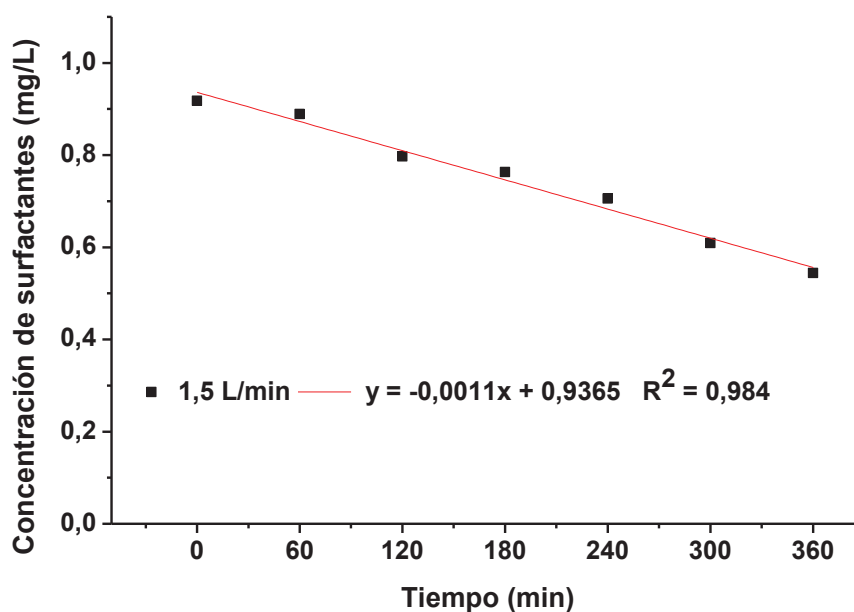
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Se observa que durante los primeros 60 min de electrólisis, la concentración de detergentes aumentó para los caudales de 4 y 7 L/min, esto se puede atribuir a la presencia de interferentes al realizar el método de medición de surfactantes (HACH 8028), según Panizza et al., (2005) uno de los interferentes durante las primeras horas de electrólisis en agua residuales reales es el cloro (Panizza et al., 2005).

No existen muchos estudios sobre procesos electroquímicos aplicados a un agua residual doméstica real que permita comparar resultados en cuanto a la remoción de surfactantes, sin embargo, las remociones de surfactantes, son similares a las obtenidas en una investigación sobre la aplicación de un proceso electroquímico para depurar un agua residual municipal real, en donde, al igual que en este estudio se obtuvo mayor remoción de surfactantes al disminuir el flujo de alimentación a una misma densidad de corriente; esto se justifica por el menor tiempo de residencia del agua en la celda electroquímica al aumentar el flujo de alimentación, por lo que hay menor tiempo de contacto de los contaminantes con las especies oxidantes

(Guanoluiza, 2013). En los procesos electroquímicos por lo general, se obtiene cinéticas de pseudo-primer orden, cuando son procesos controlados por transferencia de masa (Ochoa, 2009), es decir al aumentar el flujo de alimentación. En este sentido, para flujos de 4 y 7 L/min los datos experimentales se ajustaron más a una cinética de pseudo-primer orden, sin embargo, la degradación de surfactantes presenta tendencia lineal para el flujo con el cual se obtuvo mayor porcentaje de remoción de surfactantes (1,5 L/min), por lo que describe una cinética de orden cero, con una constante cinética k de 0,0011 mol/L min y un coeficiente de correlación (R^2) de 0,984, como se muestra en la figura 18.

FIGURA 18. Comportamiento cinético de la reacción de electro-oxidación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm²)



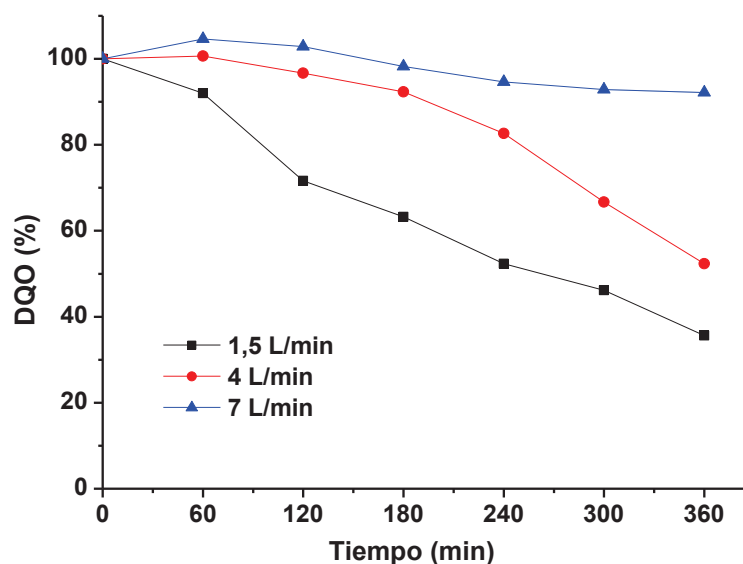
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Con las ecuaciones de cinética ($y = a + bx$) se determinó que el tiempo necesario para alcanzar un 90% de degradación electroquímica de surfactantes a una densidad de corriente de 14 mA/cm² es de 13 horas para un caudal de alimentación de 1,5 L/min.

Monitoreo de la remoción de DQO al variar el flujo de alimentación.

La remoción de DQO que se muestra en la figura 19 presenta un 45% de remoción a un caudal de 4 L/min, mientras que al disminuir el caudal a 1,5 L/min el porcentaje de remoción aumenta a 64%. Por otro lado, al aumentar el caudal a 7 L/min (caudal máximo de trabajo) el porcentaje de remoción de DQO disminuye a 8%.

FIGURA 19. Remoción de DQO presente en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min, 4 L/min y 7 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm²)



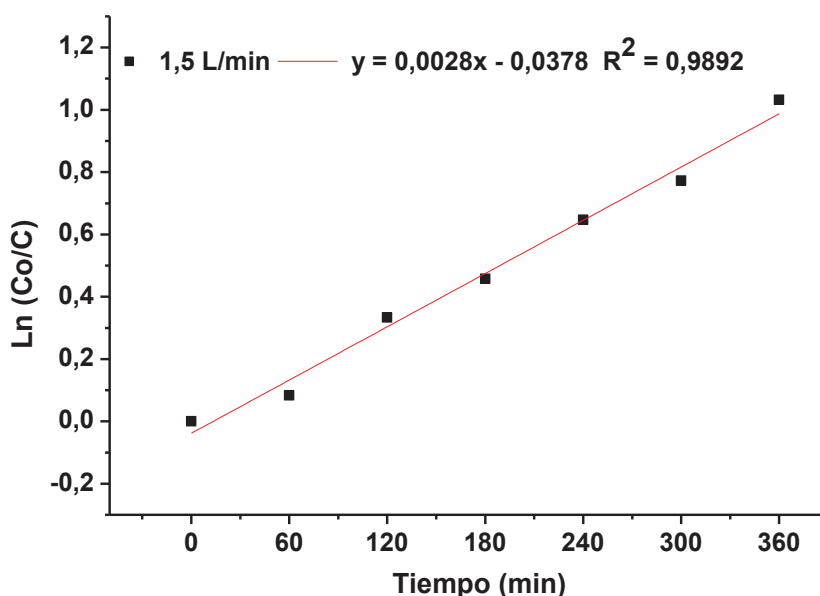
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Se observa que el comportamiento cinético difiere al aumentar el flujo de alimentación, esto se debe a la presencia de otros compuestos en el agua residual doméstica que hace que exista comportamientos cinéticos diferentes incluso a lo largo de cada proceso de electrólisis (Ochoa, 2009). Además, es importante considerar la desviación estándar que presentan todos los datos experimentales (Anexo II y IV).

Para el caso de la remoción de la DQO, los datos experimentales del flujo de alimentación, que mostró mejores resultados de remoción (1,5 L/min), se ajustaron

más a una cinética de reacción de pseudo-primer orden, con un R^2 de 0,9892 y se obtuvo un valor de k de $0,0028 \text{ min}^{-1}$, como se muestra en la figura 20.

FIGURA 20. Comportamiento cinético de la reacción de la remoción de DQO durante el proceso de electro-oxidación de aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm^2)



ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Se utilizó las ecuaciones de cinética ($y = a + bx$) y se determinó que el tiempo necesario para alcanzar un 90% de remoción de DQO presente en aguas residuales domésticas luego del proceso de electro-oxidación y a una densidad de corriente de 14 mA/cm^2 es de 14 horas para un caudal de alimentación de 1,5 L/min.

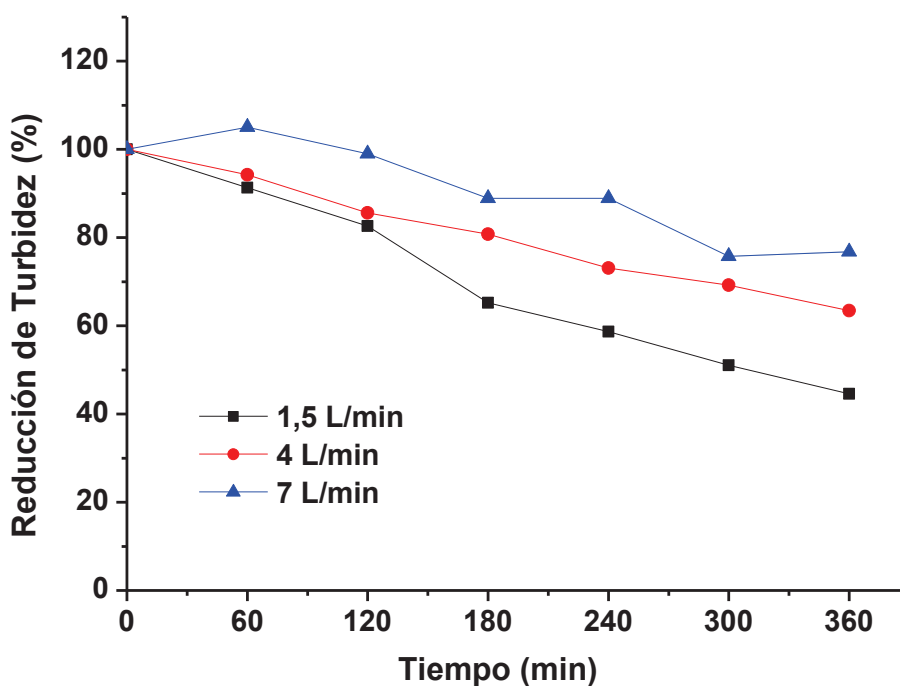
En general, los resultados obtenidos de remoción de la DQO y Detergentes principalmente muestran un aumento conforme el flujo de agua disminuye, esto se puede explicar ya que se considera que en flujos muy altos se tiene poco tiempo de residencia del agua en el reactor, es decir, cuando aumenta el flujo de alimentación se da una menor interacción del agua residual doméstica con las especies oxidantes formadas en la superficie del electrodo BDD (Cano y Barrera, 2014).

Estos resultados se comparan con los obtenidos en el análisis realizado por (Guanoluiza, 2013) en donde estudió un proceso electroquímico en la depuración de agua residual municipal y determinó que a mayor flujo de entrada del agua contaminada al reactor existe una reducción de la eficiencia del proceso en la remoción de contaminantes (Guanoluiza, 2013), de igual forma, en el presente trabajo se observó menor eficiencia del proceso al aumentar el flujo de alimentación respecto a resultados de detergentes y DQO.

Monitoreo de la variación de turbidez, conductividad, potencial de hidrógeno y temperatura al variar el flujo de alimentación.

En la figura 21, se aprecia que la turbidez alcanzó una reducción de 55,43% con un caudal de 1,5 L/min; 36,5% a un caudal de 4 L/min y al aumentar el flujo de alimentación a 7 L/min se tiene solo 23,23% de reducción.

FIGURA 21. Reducción de la turbidez en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min, 4 L/min y 7 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm²)



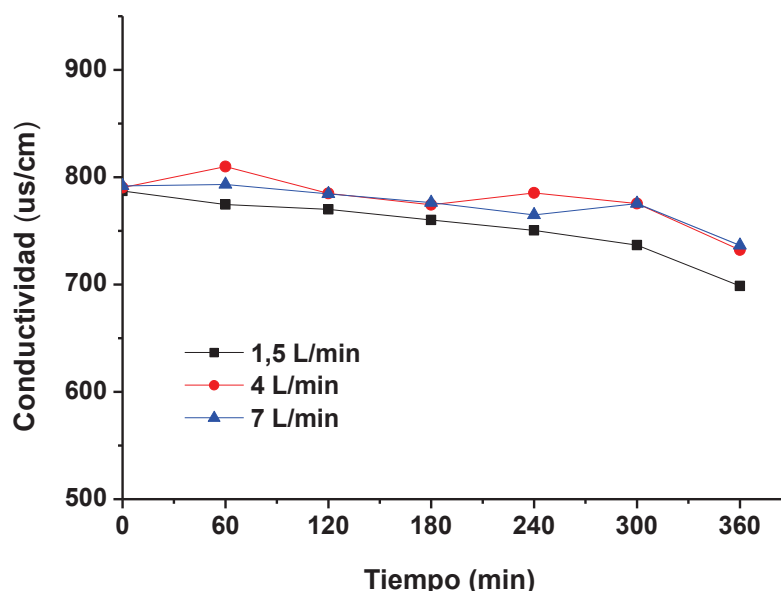
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

La turbidez del agua presenta un porcentaje de reducción menor cuando se aumenta el caudal de 1,5 L/min a 7 L/min. En los tres caudales se observa una reducción de turbidez luego de seis horas de electrólisis, sin embargo, se observa menor eficiencia de reducción con flujos de alimentación mayores, esto se debe a la turbulencia que se genera al aumentar el flujo de alimentación (Guanoluiza, 2013).

Para el caso del flujo de alimentación de 7 L/min se observan picos y caídas que se pueden atribuir a la generación de turbulencia y la producción de espuma al aumenar el flujo.

En el caso de la conductividad, en la figura 22 se muestra como disminuye en un 7% para los caudales de 4 y 7 L/min, mientras que al reducir el caudal a 1,5 L/min la conductividad se redujo en un 11%.

FIGURA 22. Variación de la conductividad en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min, 4 L/min y 7 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm²)



ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

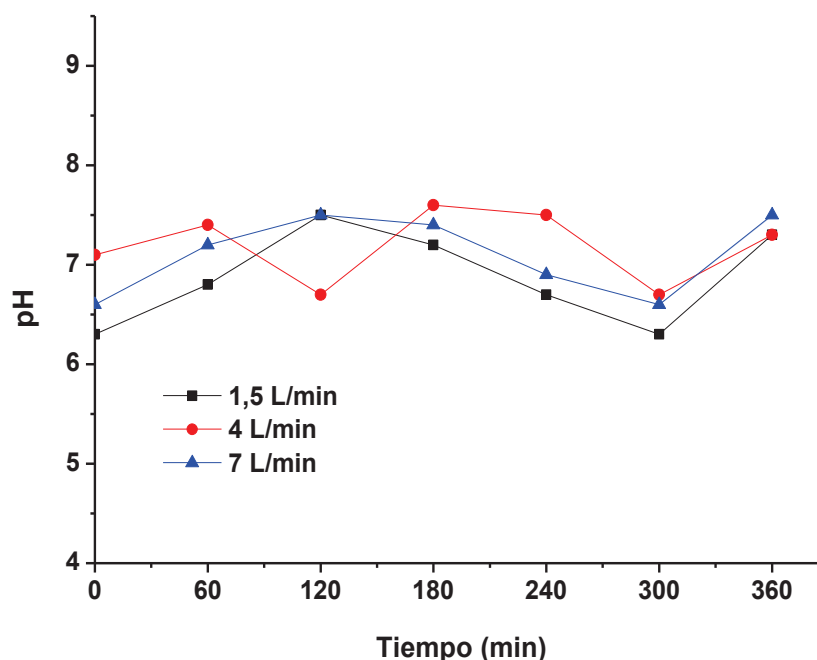
Para el caso de los tres flujos de alimentación, los resultados muestran que no hay una variación de conductividad significativa, sin embargo, luego de seis horas de

electrólisis hay una reducción respecto a su valor inicial con los tres flujos de alimentación utilizados, esto se debe a que la conductividad tiene una relación directa con la concentración de sólidos disueltos en el agua, por lo tanto, al ser un tratamiento electroquímico se va a tener una disminución de las sustancias disueltas, por ende, de la conductividad (Romero, 2009).

Por otra parte, los picos y caídas que se observan se pueden relacionar a la variación de la temperatura durante el proceso electroquímico ya que la conductividad y temperatura tienen una relación directa (Ochoa, 2009; Romero, 2009).

En la figura 23, se presenta la variación de pH durante el proceso electroquímico, el cual está alrededor de 6,3 a 7,6 en todos los flujos de alimentación.

FIGURA 23. Variación del pH en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min, 4 L/min y 7 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm²)



ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

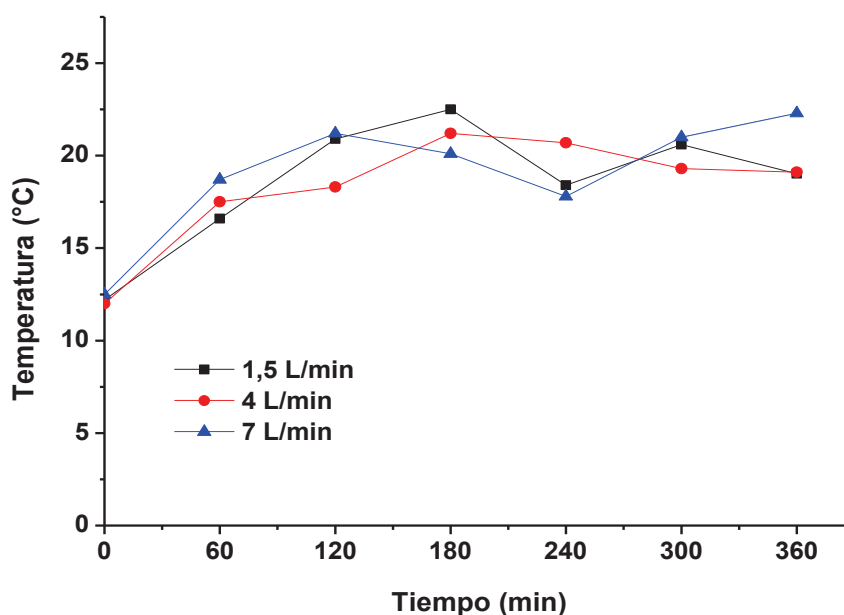
Los resultados que se obtuvieron de la variación de pH durante el proceso electroquímico indicaron, que la variación del flujo de alimentación no tuvo un efecto

significativo en la variación final de pH, sin embargo, durante las seis horas de electrólisis se observó picos y caídas pronunciadas con los tres flujos de alimentación, esto se justifica ya que durante el proceso electroquímico se tiene una corriente de electrones que pasan a través de los ánodos (Guanoluiza, 2013; Martín De Vidales, 2015) y reaccionan con las sustancias presentes en el agua variando la concentración de iones H^+ y OH^- (Romero, 2009).

Finalmente, se observó que el pH del agua residual luego de seis horas de electro-oxidación se mantiene dentro del rango establecido por la normativa ambiental para descargas a cuerpos de agua dulce (5 - 9).

En la figura 24 se presenta la variación de temperatura durante las seis horas de tratamiento; un incremento significativo y similar se observó en los tres flujos de alimentación utilizados (1,5; 4 y 7 L/min) a una densidad de corriente de 14 mA/cm^2 . La variación de temperatura para 1,5 L/min y 4 L/min, fue de $6,8 \text{ }^\circ\text{C}$ y $7 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente; mientras, que para un flujo de 7 L/min la temperatura aumentó $9,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

FIGURA 24. Variación de la temperatura en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con flujos de alimentación de 1,5 L/min, 4 L/min y 7 L/min (densidad de corriente eléctrica de 14 mA/cm^2)



ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Se observa que la temperatura no depende directamente de la variación del flujo de alimentación ya que en los tres flujos se tiene un incremento de temperatura similar, por lo tanto, el aumento de temperatura se atribuye a la densidad de corriente aplicada ya que en la solución se van a generar reacciones de tipo exotérmico (Martínez, 2017). Adicionalmente, la variación de temperatura tiene un comportamiento irregular durante las seis horas de electrólisis, esto se debe, a que la temperatura fue controlada de forma manual, lo cual afecta directamente a la variación de la conductividad y el potencial de celda (Ochoa, 2009).

Finalmente, se tomaron los valores de máxima remoción de los parámetros fisicoquímicos analizados y se determinó a que flujo de alimentación corresponden, para poder elegir el óptimo, lo cual sirvió como parámetro fijo para la siguiente fase de experimentación. En la tabla 9, se muestra en resumen los resultados más favorables de los parámetros analizados durante la variación de caudal en el proceso de electro-oxidación del agua residual doméstica.

TABLA 9. Resultados de los parámetros físico-químicos analizados en la remoción de contaminantes presentes en el agua residual doméstica después de un estudio en la variación de caudal a una densidad de corriente de 14mA/cm².

Parámetro	Remoción (%)	Constante Cinética k	Flujo óptimo (L/min)
DQO	64,36	0,0028 min ⁻¹	1,5
Surfactantes	40,7	0,0011 mol/L s	1,5
Turbidez	55,43	-	1,5
Conductividad	11	-	1,5
pH**	6,3 – 7,6	-	1,5 - 7
Temperatura*	56 *	-	1,5

* Representa el menor incremento del parámetro respectivo en porcentaje

** La variación de pH se mantuvo constante en todos los caudales

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

La remoción de surfactantes presentes en un agua residual doméstica proveniente del conjunto habitacional “Arupos de la Hacienda” alcanza el 40,7% a un caudal de 1,5 L/min, por lo cual se determina que la mejor eficiencia de remoción de surfactantes se obtiene a caudales menores para el caso del reactor diseñado a escala de laboratorio con una celda DiaClean® y electrodo BDD.

Este proceso de electro-oxidación mediante el uso de electrodos BDD, muestra que es posible llegar a una remoción de DQO de 64,36% cuando se trabaja a un caudal de alimentación de 1,5 L/min y bajo las condiciones de operación establecidas previamente (densidad de corriente 14 mA/cm²). Por lo tanto, el mejor caudal de alimentación al sistema de recirculación en el proceso de electro-oxidación que presentó en general los mejores resultados fue 1,5 L/min.

4.2.2 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE ÓPTIMA

El estudio de la variación de la densidad de corriente en el proceso de electro-oxidación de aguas residuales domésticas provenientes del conjunto habitacional se lo realizó en seis ensayos con las siguientes condiciones:

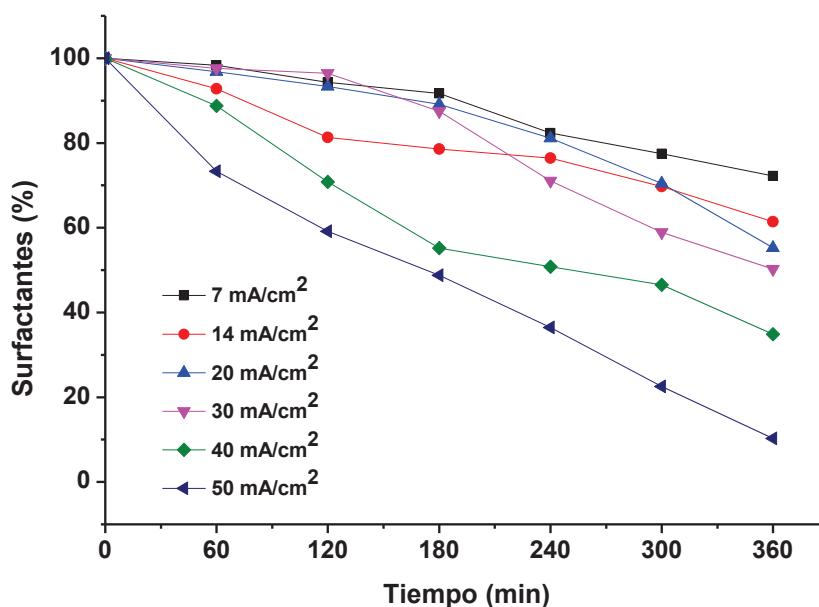
- Intensidades de corriente aplicadas a los electrodos de la celda DiaClean®: 0,5; 1; 1,5; 2; 3 y 4 A, lo que corresponde a utilizar densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm².
- Caudal de alimentación óptimo: 1,5 L/min.
- Toma de muestras: 60 min durante seis horas de electrólisis
- Volumen de muestra tratada: 4 L

Desde la figura 25 a la 32, se presentan los resultados de remoción de contaminantes mediante el monitoreo de los siguientes parámetros físico-químicos: Detergentes, DQO, turbidez, conductividad, pH y temperatura. Los datos obtenidos durante esta fase se presentan en el **Anexo 3**.

Seguimiento de la degradación de surfactantes al variar la densidad de corriente.

El porcentaje de remoción de surfactantes aumenta cuando la densidad de corriente es mayor. El porcentaje de degradación de surfactantes es menor a 50% para caudales de 7 a 30 mA/cm², presentando el menor porcentaje de degradación a una densidad de corriente de 7 mA/cm² (27,75%), mientras que al aumentar la densidad de corriente de 30 a 50 mA/cm² el porcentaje de degradación aumenta de 49,7% a 89,74% como se muestra en la figura 25.

FIGURA 25. Seguimiento de la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm² (flujo de alimentación de 1,5 L/min)



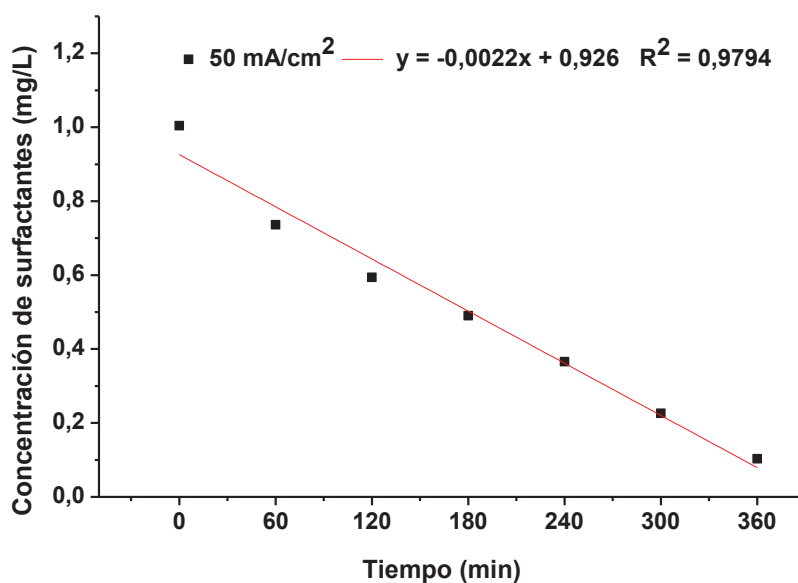
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

La degradación de surfactantes, como se esperaba, depende fuertemente de la densidad de corriente aplicada, y concuerda con los resultados de algunas investigaciones en donde logran una eficiencia de remoción más del 80% en aguas residuales reales (Panizza et al., 2005) y más del 90% en aguas sintéticas (Armijos-Alcocer et al., 2017; Louhichi et al., 2008; Panizza et al., 2005; Valenzuela et al.,

2017). La degradación se produce ya que al aplicar una densidad de corriente permite la electrogeneración en la superficie del electrodo BDD (Bejan & Bunce, 2012) de agentes altamente oxidantes (2,81 V) como el radical hidroxilo $\cdot\text{OH}$ (Espinoza-Montero et al., 2013; Marselli et al., 2003), el cual oxida toda la materia orgánica transformándola en CO_2 y H_2O (Armijos-Alcocer et al., 2017; Espinoza-Montero et al., 2013). Además, y de forma simultánea la oxidación de compuestos orgánicos del agua se lleva a cabo gracias al potencial de oxidación (1,78 V) que presenta el H_2O_2 (peróxido de hidrógeno) generado a partir de 2 radicales $\cdot\text{OH}$ (Daghrir et al., 2014; Marselli et al., 2003).

La cinética que describe el proceso de degradación de surfactantes a una densidad de corriente de 50 mA/cm^2 , presenta una tendencia lineal de orden cero, con un coeficiente R^2 de 0,979, es decir la concentración de surfactantes en el agua residual luego de aplicar una corriente óptima va a depender de forma directa del tiempo de electrólisis; la constante k fue $0,0022 \text{ mol/L-s}$, como se muestra en la figura 26.

FIGURA 26. Comportamiento cinético de la reacción de la electro-oxidación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 50 mA/cm^2 (flujo de alimentación de $1,5 \text{ L/min}$)



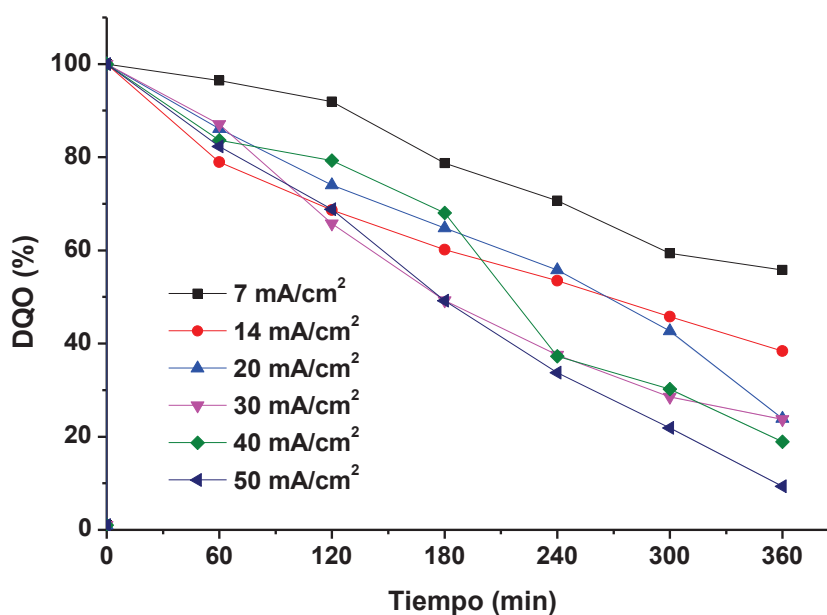
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Con las ecuaciones de la cinética se determinó que el tiempo necesario para alcanzar un 99% de degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas luego del proceso de electro-oxidación y a un flujo de alimentación de 1,5 L/min es de 7 horas aproximadamente para densidad de corriente de 50 mA/cm².

Monitoreo de la remoción de DQO al variar la densidad de corriente.

En la figura 27, se indica el porcentaje de remoción de DQO en donde se observa que durante las tres primeras horas de electro-oxidación el porcentaje de remoción de DQO es menor a 50% para todas las densidades de corriente utilizadas, pero terminadas las seis horas se obtuvo la menor remoción de DQO para la densidad de corriente de 7 mA/cm² (44%), mientras que al aumentar la densidad de corriente de 14 mA/cm² a 50 mA/cm², el porcentaje de remoción de DQO aumenta de 61,6% a 90,6%.

FIGURA 27. Remoción de DQO en la degradación electroquímica de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm² (flujo de alimentación de 1,5 L/min)



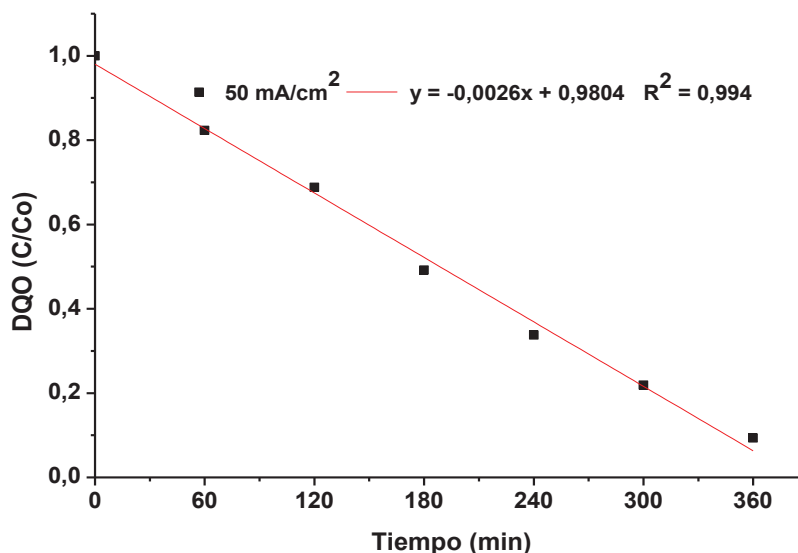
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

La remoción de DQO se logra gracias a la electrogeneración de radiales $\cdot\text{OH}$ en la superficie del electrodo los cuales oxidan los compuestos orgánicos presentes en el agua residual (Romero, 2009) y se observa que depende de la aplicación de densidad de corriente; al aumentar la densidad de corriente aumenta el porcentaje de remoción de DQO, estos resultados concuerdan con estudios en donde han logrado remociones mayores al 90% en aguas residuales reales (Cano et al., 2016; Daghrir et al., 2014; Panizza et al., 2005; Schmalz et al., 2009) y sintéticas (Armijos-Alcocer et al., 2017; Louhichi et al., 2008; Panizza et al., 2005) al aumentar la densidad de corriente, mientras, que a bajas densidades de corriente la eficiencia de remoción de materia orgánica es menor (menores a 70%) (Valenzuela et al., 2017), esto se debe a que ciertos productos finales de la degradación de contaminantes orgánicos, se vuelven electroquímicamente más estables y difíciles de eliminar a bajas densidades de corriente (Espinoza-Montero et al., 2013).

Para este caso, los datos experimentales con la densidad de corriente que presentó los mejores resultados (50 mA/cm^2), siguieron una tendencia lineal para una cinética de orden cero, con un coeficiente R^2 de 0,994 y se obtuvo el valor de k de $0,0026 \text{ mol/L min}$, como se muestra en la figura 28.

Sin embargo, las densidades de corriente (7, 14, 20, 30 y 40 mA/cm^2) mostraron una tendencia a una cinética de pseudo-primer orden, la variación en el comportamiento cinético se puede atribuir a la presencia de interferentes en el momento de realizar el análisis de DQO.

FIGURA 28. Comportamiento cinético de la reacción de remoción de DQO presente en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 50 mA/cm² (flujo de alimentación de 1,5 L/min)



ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Utilizando las ecuaciones de cinética se determinó que el tiempo necesario para remover un 99% de DQO a un flujo de alimentación de 1,5 L/min es de 7h aproximadamente para una densidad de corriente de 50 mA/cm².

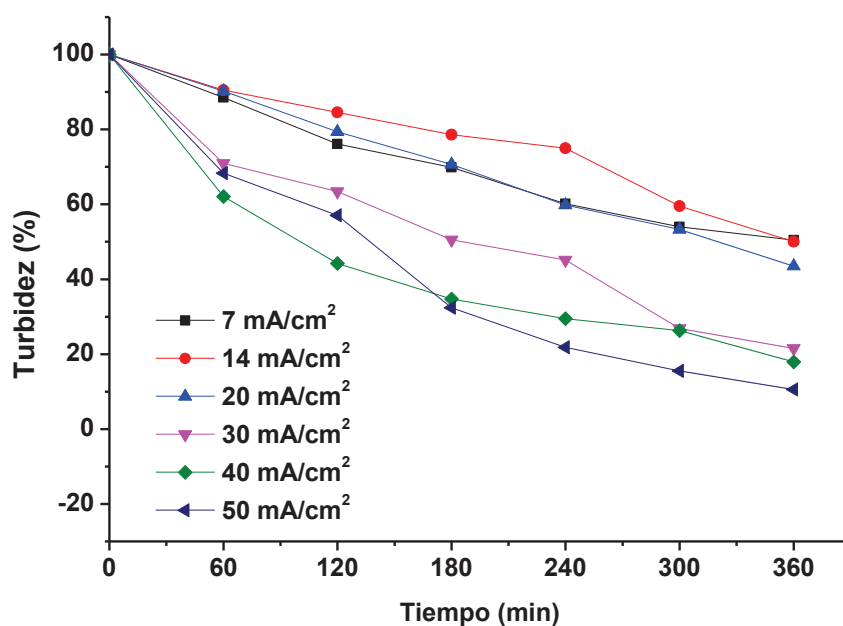
Monitoreo de la variación de turbidez, conductividad, potencial de hidrógeno y temperatura al variar la densidad de corriente.

En las figuras de la 29 a 32 se muestra el monitoreo realizado a los parámetros de turbidez, conductividad, pH y temperatura que se realizó de forma paralela a los parámetros analizados anteriormente (Detergentes y DQO) durante el proceso de electro-oxidación con electrodo BDD y la celda DiaClean® con un flujo de alimentación de 1,5 L/min y con densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm², por un tiempo total de seis horas de tratamiento electroquímico.

La turbidez del agua como se muestra en la figura 29, presenta un porcentaje de reducción del 50% para el caso de las densidades de corriente de 7 y 14 mA/cm²,

para densidades de corriente de 20, 30 y 40 mA/cm² el porcentaje de reducción es mayor a 50% (56,5%, 79% y 82%, respectivamente).

FIGURA 29. Reducción de la turbidez en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm² (Flujo de alimentación de 1,5 L/min)



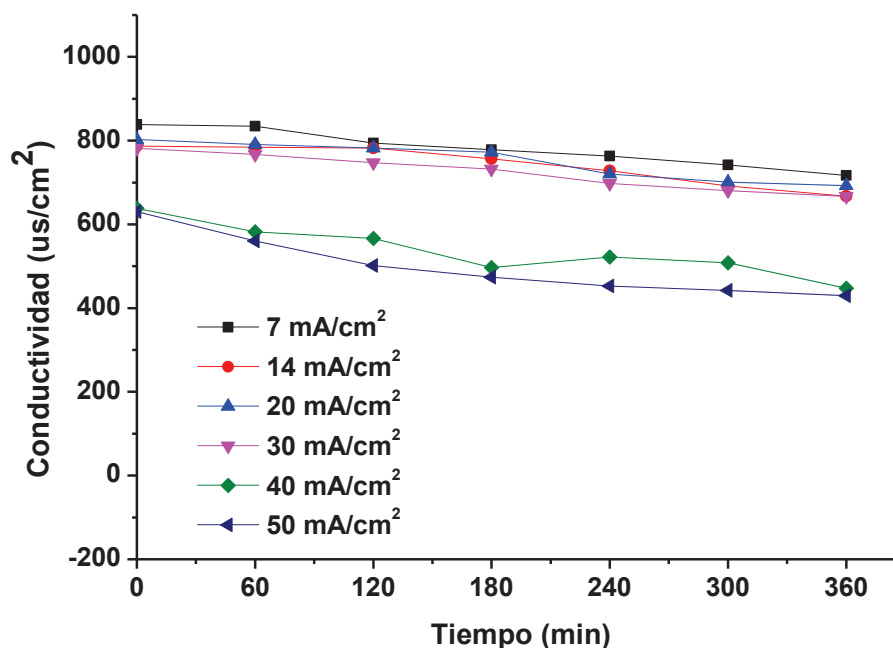
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Durante las dos primeras horas de tratamiento se puede observar que el mayor porcentaje de reducción de turbidez se obtuvo con una densidad de corriente de 40 mA/cm² (55,8%), sin embargo, al terminar las seis horas de electro-oxidación se obtuvo la máxima reducción de turbidez con una densidad de corriente de 50 mA/cm² (89%). La turbidez está relacionada con la cantidad de sólidos suspendidos que se encuentran en el agua residual (Romero, 2009), por lo tanto, la concentración de estos sólidos va a disminuir considerablemente, y esto permite saber que el proceso de oxidación de la materia orgánica se está realizando con éxito.

Para el caso de la conductividad como se muestra en la figura 30, se tiene el menor porcentaje de reducción para una densidad de corriente de 7 mA/cm² (14,5%) y la

máxima reducción de conductividad fue de 31% para una densidad de corriente de 50 mA/cm².

FIGURA 30. Variación de la conductividad en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm² (Flujo de alimentación de 1,5 L/min)



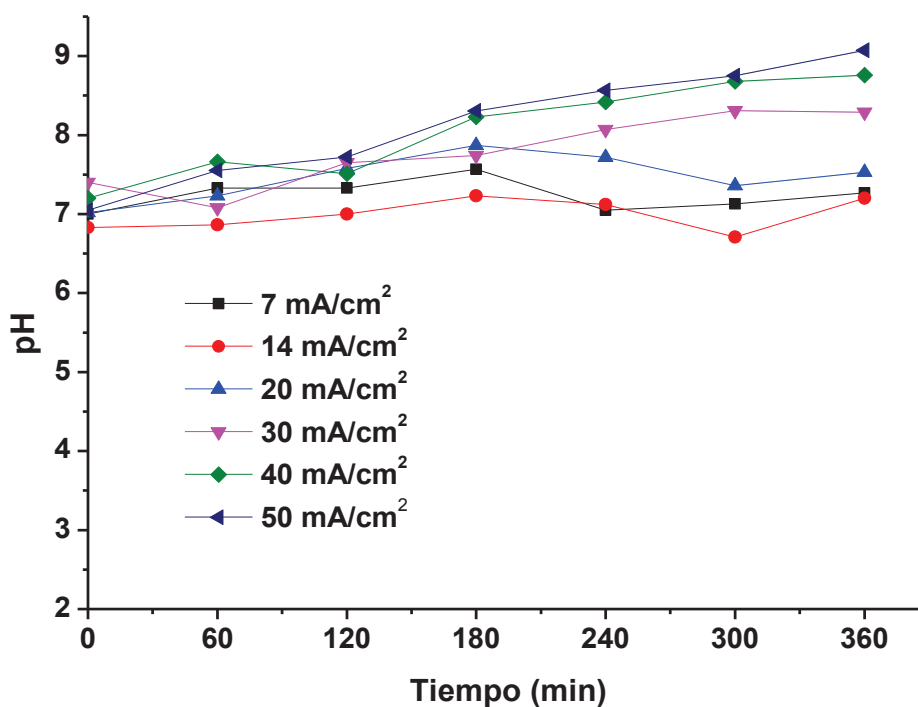
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Se observa que la variación de conductividad depende directamente de la variación de densidad de corriente, sin embargo, su reducción es de forma constante y en general para todas las densidades de corriente utilizadas el porcentaje de reducción de conductividad es menor a 50%. Además, es importante considerar que la variación de temperatura afecta directamente a la conductividad del agua (Romero, 2009).

De los resultados que se obtuvieron a partir de la figura 31 de la variación de pH durante el proceso de electro-oxidación del agua, se tiene que no existe una variación significativa con las tres primeras densidades de corriente 7, 14 y 20 mA/cm², ya que se mantuvo en un rango de pH de 6,5 a 7,5; mientras aumentó la densidad de corriente de 30 a 50 mA/cm², el pH tuvo una variación de 4,8 y 11,6

respectivamente.

FIGURA 31. Variación del pH en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm² (Flujo de alimentación de 1,5 L/min)

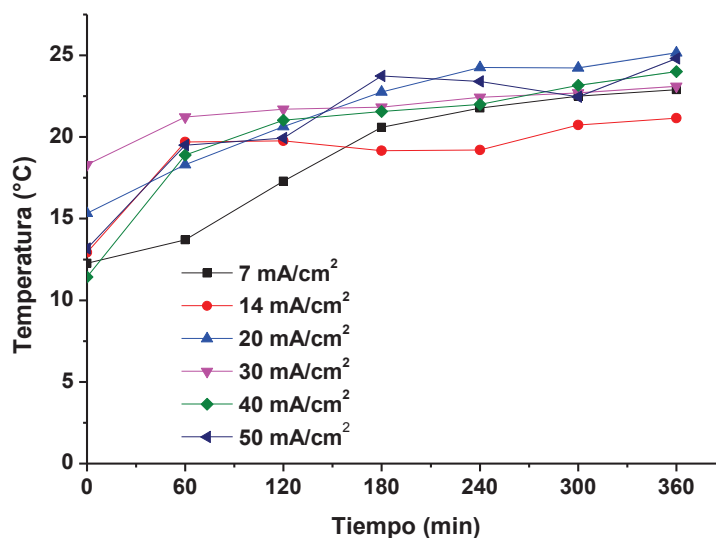


ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Se observa que la mayor variación de pH fue a una densidad de corriente de 50 mA/cm² (11,6 unidades de pH), llegando a tener un agua de carácter básico luego de seis horas de tratamiento, sin embargo, el rango se mantuvo entre 7 a 9 unidades de pH aproximadamente, cumpliendo con la normativa ambiental para descargas a cuerpos de agua dulce (5 a 9 unidades de pH).

Finalmente, en la figura 32 se muestra la variación de temperatura a diferentes densidades de corriente y se tiene que la temperatura mínima se obtuvo a una densidad de corriente de 14 mA/cm² (21,2 °C), mientras, que la máxima temperatura se obtuvo a una densidad de corriente de 50 mA/cm² (24,8 °C).

FIGURA 32. Variación de la temperatura en la degradación de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm² (Flujo de alimentación de 1,5 L/min)



ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Durante el proceso de electro-oxidación, se tiene que a mayor densidad de corriente la temperatura aumenta más rápido, existiendo una variación irregular, esto debido a que la temperatura se la controló de forma manual, sin embargo, se mantiene entre 12 °C y 25 °C para las diferentes densidades de corriente, lo cual cumple con el límite máximo permisible según el TULSMA para descargas a un cuerpo de agua dulce (menor a 30 °C) (MAE, 2013).

En la tabla 10, se resume los mejores resultados obtenidos en la electro-oxidación del agua residual doméstica al variar la densidad de corriente a un flujo de alimentación de 1.5 L/min.

TABLA 10. Resultados de los parámetros analizados después de un estudio en la variación de densidad de corriente a un flujo de alimentación de 1,5 L/min.

Parámetro	Remoción (%)	Constante Cinética k (mol/L min)	Densidad de corriente óptima (mA/cm ²)
DQO	90,7	0,0022	50
Surfactantes	89,7	0,0026	50
Turbidez	89,4	-	50

(continuación tabla 10)

Conductividad	31,8	-	50
Temperatura*	< 25 °C	-	7 - 50

* Representa el rango óptimo del parámetro respectivo.

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

El mayor porcentaje de degradación de surfactantes en el proceso de electro-oxidación usando una celda DiaClean® dotada con electrodo BDD a un flujo de alimentación de 1,5 L/min, se obtuvo a una densidad de corriente de 50 mA/cm² (89,7%).

La eficiencia de esta tecnología se observa no solo en el porcentaje de remoción de surfactantes, sino también, en la oxidación de los compuestos orgánicos presentes en el agua, y se confirma con la máxima remoción de DQO a una densidad de corriente de 50 mA/cm² (90,7%).

Con los resultados obtenidos y dentro del rango de valores de densidades de corriente estudiadas en el presente trabajo de investigación, la que presentó en general los mejores resultados de los parámetros físico-químicos analizados fue 50 mA/cm².

4.3 DEGRADACIÓN DE SURFACTANTES EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

En esta etapa, después de encontrar las mejores condiciones de operación para el proceso de degradación de surfactantes, es decir, 1,5 L/min como flujo de alimentación y 50 mA/cm² como densidad de corriente, se realizó un proceso de electro-oxidación para monitorear la mineralización de la materia orgánica presente en el agua residual doméstica.

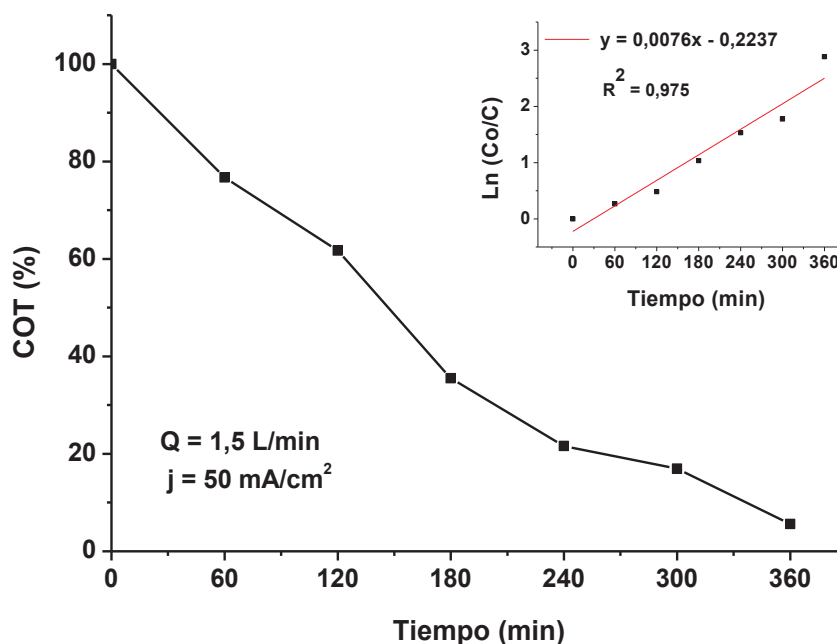
4.3.1 ANÁLISIS DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL

La mineralización de la materia orgánica presente en el agua residual doméstica se siguió con el análisis de Carbono Orgánico Total cada hora durante seis horas de electro-oxidación.

El análisis de COT es necesario para conocer la calidad del agua, es decir, se usa más para caracterizar el agua potable (Romero, 2009), sin embargo, es importante conocer este parámetro para saber si los compuestos de origen orgánico se están mineralizando llegando a la generación final de la reacción de CO_2 y H_2O (Espinoza-Montero et al., 2013).

En la figura 33, se muestra el porcentaje de la concentración de COT en función del tiempo y se obtuvo un 94% de mineralización. Además, la cinética se ajustó más a pseudo-primer orden con un R^2 de 0,975 y se obtuvo un valor de k de $0,0076 \text{ min}^{-1}$. Sin embargo, la correlación en una cinética de orden cero fue R^2 0,955.

FIGURA 33. Seguimiento de COT en la degradación electroquímica de surfactantes presentes en aguas residuales domésticas con densidades de corriente de 50 mA/cm^2 y flujo de alimentación de $1,5 \text{ L/min}$



ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

El análisis de carbono orgánico total permitió saber que se está mineralizando la materia orgánica presente en el agua residual, incluyendo los surfactantes, y además que no existe en gran medida la generación de intermediarios como resultado de la electro-oxidación de contaminantes que puede tener el agua residual

(Armijos, 2016). Estos resultados son comparados con otros estudios y presentan similitud en cuanto al porcentaje de remoción de COT (mayor al 80%) luego de un proceso de electro-oxidación con las condiciones óptimas de operación (Armijos-Alcocer et al., 2017; Louhichi et al., 2008; Valenzuela et al., 2017).

4.3.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

El agua residual doméstica se obtuvo del conjunto habitacional “Arupos de la Hacienda” el cual cuenta con una planta de tratamiento convencional que según los análisis obtenidos en la tabla 11 del apartado 4.1, algunos parámetros no cumplen con la norma ambiental vigente, por lo tanto, con los parámetros óptimos de operación, es decir, 1,5 L/min como flujo de alimentación y una densidad de corriente de 50 mA/cm² se resume los valores obtenidos de los parámetros analizados luego del tratamiento de electro-oxidación en la tabla 11.

TABLA11. Parámetros fisicoquímicos del agua residual tratada

Parámetro	Unidad	Muestra Inicial	Muestra tratada	Límite máximo permisible	Norma
DQO	mg/L	311	29	250	Cumple
COT	mg/L	187,74	15	-	No Aplica
Detergentes	mg/L	1,004	0,103	0,5	Cumple
Turbidez*	NTU	142	15	-	No Aplica
pH	-	7,05	9	5 - 9	Cumple
Conductividad	us/cm	630,53	429,8	-	No Aplica
d*					
Temperatura	°C	13,2	24,8	< 35	Cumple

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Los resultados muestran que todos los parámetros cumplen con la normativa ambiental vigente referente a las descargas a un cuerpo de agua dulce, por lo tanto, se concluye que este tratamiento sí puede ser aplicado para tratar aguas residuales domésticas luego de un proceso convencional para poder eliminar contaminantes orgánicos persistentes como son los detergentes ya que se obtuvieron resultados muy satisfactorios. A su vez, el tratamiento reduce la concentración de DQO, COT y turbidez que presenta el agua residual, y respecto a los parámetros de control (pH,

temperatura y conductividad) se mantienen dentro de los límites permisibles.

4.4 ESTUDIO DEL CONSUMO ENERGÉTICO

Se monitoreó el voltaje consumido para cada densidad de corriente utilizada durante seis horas de electrólisis y conocer el consumo energético y así las eficiencias energéticas para cada ensayo.

4.4.1 CONSUMO ENERGÉTICO DE LA CELDA ELECTROQUÍMICA DIACLEAN®

Watts = Amperios * Voltios

- Para una densidad de corriente (j) 7 mA/cm² a 7,1 Voltios y 0,5 Amperios en 6 horas de electrólisis

$$7,1 \text{ Voltios} * 0,5 \text{ Amperios} = 3,55 \text{ W}$$

$$\text{Consumo Energético} = \left[\frac{V * A * t}{1000 * Vs} \right]$$

$$\text{Consumo Energético} = \frac{3,55 \text{ W} * 6 \text{ horas}}{1000 * 0,004 \text{ m}^3}$$

$$\text{Consumo Energético} = 5,3 \text{ kW h m}^{-3}$$

4.4.2 CONSUMO ENERGÉTICO DE LA BOMBA PERISTÁLTICA

La potencia de la bomba peristáltica es de 1HP 50/60 Hz

1 HP = 760 watts

- Para una densidad de corriente de 7 mA/cm² en 6 horas de electrólisis

$$\text{Consumo Energético} = 760 \text{ watts} * 6 \text{ horas} \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ watts}}$$

$$\text{Consumo Energético} = 4,56 \text{ kW h}$$

En la tabla 12 se muestra el consumo energético de la bomba peristáltica y de la celda DiaClean®. El consumo energético de la bomba peristáltica es la misma en todas las densidades de corriente usadas; mientras que en los resultados del consumo energético de la celda se puede observar que a mayor intensidad de corriente el consumo energético de la celda electroquímica es mayor, esto significa que al aumentar la intensidad de corriente se tiene una deficiencia en términos energéticos lo cual se va a ver afectado en términos de costos, pero el poder oxidativo es mayor y se obtuvo resultados satisfactorios en la degradación de contaminantes.

TABLA12. Consumo energético para cada densidad de corriente utilizada

j (mA/c m ²)	i (A)	V promedio (voltios)	Consumo Energético Celda (kW h/L)	Consumo Energético Bomba (kW h/L)
7	0,5	7,1	5,31E-03	1,14
14	1	11,7	1,76E-02	1,14
20	1,5	14,8	3,32E-02	1,14
30	2	16,9	5,09E-02	1,14
40	3	19	8,56E-02	1,14
50	4	21,4	1,28E-01	1,14

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

De la misma manera, se puede observar que a una densidad de corriente de 7 mA/cm² el consumo energético es bajo (5,31E-03 KW-h/L), mientras que al aumentar la densidad de corriente a 50 mA/cm² el consumo energético aumentó (1,28E-01 KW-h/L) debido a que el potencial de celda es mayor cuando se aumenta la densidad de corriente aplicada.

Por este motivo, la mejor opción según el consumo energético es utilizar la menor densidad de corriente, pero el proceso de degradación no es completo; mientras, que para obtener el mayor potencial de oxidación necesario para degradar contaminantes es trabajar con la mayor densidad de corriente (50 mA/cm²).

4.5 COSTOS

A continuación, se detallan los costos necesarios para instalar el sistema de recirculación para el tratamiento electroquímico a nivel de laboratorio y los costos por consumo energético que se usó para tratar un volumen de muestra de 4 L y con las condiciones óptimas, es decir, $Q = 1,5 \text{ L/min}$ y $j = 50 \text{ mA/cm}^2$ durante seis horas de electrólisis.

4.5.1 COSTO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTRO-OXIDACIÓN

En la tabla 16, se detalla el costo aproximado de los equipos y materiales utilizados en la instalación del sistema de electro-oxidación, y llega a un costo total de instalación de \$ 12 500 (dólares americanos).

TABLA 13. Costos de instalación del sistema de recirculación acoplada a una celda DiaClean® y electrodo BDD.

Equipos y Materiales		Costo (\$)
Celda DiaClean®	Celda electroquímica DiaClean® 401 y electros BDD	5 000,00
	Configuración 301 set	60,00
	Transporte Ecuador	500,00
	Accesorios de instalación	250,00
	Bomba peristáltica MasterFlex I/P	6 000,00
	Fuente de Poder GW INSTEK SPS-3610 (10 A)	650,00
Total costo de instalación		12 460,00

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Se observa que el valor de instalación del sistema de electro-oxidación usado en el presente estudio fue alto (\$ 12 460,00), a esto se atribuye en gran parte al precio actual del electrodo BDD y la configuración de la celda DiaClean®. Por este motivo, esta tecnología presenta una desventaja en cuanto al costo inicial de instalación de

equipos para desarrollar la oxidación electroquímica avanzada frente a otras tecnologías descritas en bibliografía (Martín De Vidales, 2015).

4.5.2 COSTO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTRO-OXIDACIÓN

En la tabla 17, se estiman los costos por consumo energético de la celda DiaClean® y de la bomba peristáltica para tratar agua residual doméstica a un flujo de alimentación de 1,5 L/min y a diferentes densidades de corriente (7, 14, 20, 30, 40 y 50 mA/cm²) durante seis horas de electrólisis.

TABLA 14. Costos de operación del sistema de electro-oxidación con flujo de alimentación de 1,5 L/min

j (mA/ cm ²)	Consumo Energético Celda (kW h/L)	Consumo Energético Bomba (kW h/L)	Consumo Energético Total (kW h/L)	Costo Total (USD/L)	Costo Total (USD/m ³)
7	5,31E-03	1,14	1,15	0,072	72
14	1,76E-02	1,14	1,16	0,073	73
20	3,32E-02	1,14	1,17	0,074	74
30	5,09E-02	1,14	1,19	0,075	75
40	8,56E-02	1,14	1,23	0,077	77
50	1,28E-01	1,14	1,27	0,08	80

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

El costo de operación toma en cuenta el consumo energético de la celda DiaClean®, en donde se llevó a cabo el proceso de electrólisis, y el consumo energético de la bomba peristáltica por lo cual su valor aumenta y esto afecta el valor final de costo de operación, que en el caso de la densidad de corriente óptima (50 mA/cm²) corresponde a 0,08 USD/L, y 80 USD/m³. Sin embargo, si solo consideramos el costo por consumo energético de la celda que fue el usado para que se dé el proceso de electro-oxidación, el valor USD/m³ disminuye significativamente (8,19 USD/m³).

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.6 CONCLUSIONES

- Los análisis fisicoquímicos de las aguas residuales domésticas procedentes del conjunto habitacional “Arupos de la Hacienda”, antes de su tratamiento electroquímico en laboratorio, mostraron que algunos parámetros no cumplen con el límite máximo permisible para descargas a un cuerpo de agua dulce estipulado en el TULSMA, por lo tanto, se concluye que el tratamiento convencional que recibe el efluente antes de ser enviado al río es deficiente.
- La mayor remoción de contaminación presente en el agua residual se obtuvo con las condiciones óptimas de operación, es decir, 1,5 L/min de flujo de alimentación y a una densidad de corriente de 50 mA/cm², los parámetros de mayor interés en este trabajo de investigación presentaron altos porcentajes de remoción, DQO de 90,7%, detergentes de 89,7% y turbidez de 89,4%. Además, en la mineralización de materia orgánica presente en el agua residual mediante el análisis de COT, se logró una remoción de 94% en seis horas de electrólisis y una constante de velocidad k de 0,0076 min⁻¹.
- La cinética y la constante de velocidad de reacción fueron expresadas de acuerdo a un orden cero y a pseudo-primer orden tomando en cuenta las condiciones óptimas de operación. Este comportamiento atípico, se debe a las interacciones que se generan por presencia de otros compuestos en un agua residual doméstica.
- El análisis fisicoquímico que se realizó al agua tratada con las condiciones óptimas de operación del reactor muestra que todos los parámetros se redujeron en seis horas de electrólisis, logrando cumplir con los límites máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce estipulado en la normativa ambiental (TULSMA, Anexo 1). Por lo tanto, se recomienda a la

tecnología experimentada como un método posterior a tratamientos primarios y secundarios, para la remoción de contaminantes orgánicos persistentes como los detergentes, remoción de DQO y mineralización de materia orgánica presente en el agua residual doméstica.

- El consumo energético para el caso del sistema de recirculación acoplado a una celda DiaClean® con ánodo BDD utilizado en el presente estudio con las condiciones óptimas de operación fue de 1,27 kW-h/L.
- Un análisis económico preliminar del tratamiento a escala piloto, ha mostrado que los costes de inversión son elevados (\$ 12 460,00), mientras, que el costo de operación por consumo energético necesario para el proceso de electro-oxidación llevado a cabo en la celda DiaClean® es incluso menor (8,19 USD/m³) a otras tecnologías publicadas en bibliografía(Martín De Vidales, 2015).
- Debido a las altas eficiencias que se obtuvieron respecto a la eliminación de contaminantes orgánicos persistentes como los detergentes, la remoción de materia orgánica presente en el agua residual y la ventaja de utilizar la energía eléctrica como el único insumo necesario para el tratamiento de aguas residuales, presenta la electro-oxidación como una tecnología muy prometedora en un futuro próximo, esperando se reduzca el precio de los electrodos BDD.

4.7 RECOMENDACIONES

- Optimizar el diseño del sistema de recirculación acoplado a una Celda DiaClean® dotada con electrodo BDD, implementando un sistema de control de temperatura con la finalidad de no tener una variación significativa que puedan alterar los resultados.
- Con la finalidad de ampliar las aplicaciones de esta tecnología, se recomienda realizar ensayos con diferentes aguas residuales reales a

diferentes niveles de contaminación que presenten contaminantes orgánicos persistentes, con diferentes condiciones de operación para conocer la eficiencia del tratamiento y tener más información sobre la aplicación de esta metodología.

- Realizar análisis de toxicidad del agua antes del tratamiento de electro-oxidación a escala de laboratorio, durante el proceso de electrólisis y después del tratamiento, con la finalidad de conocer si los subproductos formados en el proceso de degradación de detergentes presentan un grado de toxicidad que afecte el equilibrio de la vida acuática y además conocer si la toxicidad se reduce o se elimina luego de aplicar esta tecnología.
- Estudiar el porcentaje de desinfección de agua residual durante un proceso de electro-oxidación al variar la densidad de corriente, con la finalidad de aportar información más completa del agua obtenida.
- Para continuar con la investigación se recomienda realizar un escalamiento del sistema de tratamiento de electro-oxidación avanzada, para que con esto se pueda aplicar como un tratamiento terciario en las plantas de tratamiento de efluentes residuales domésticos con el caudal real de las mismas.

BIBLIOGRAFÍA

- Amado, D. (2014). *Degradación del fenol mediante un tratamiento electroquímico combinado con: ozono y electrodos de diamante dopados con boro (DDB) (tesis de maestría)*. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Ammar, H. B., Brahim, M. Ben, Abdelhédi, R., y Samet, Y. (2016). *Green electrochemical process for metronidazole degradation at BDD anode in aqueous solutions via direct and indirect oxidation*. *Separation And Purification Technology*, 157, 9–16. doi: 10.1016/j.seppur.2015.11.027
- Armijos-Alcocer, K. G., Espinoza-Montero, P. J., Frontana-Uribe, B. A., Barrera-Díaz, C. E., Nevárez-Martínez, M. C., y Fierro-Naranjo, G. C. (2017). *Electrochemical Degradation of Nonylphenol Ethoxylate-7 (NP7EO) Using a DiaClean® Cell Equipped with Boron-Doped Diamond Electrodes (BDD)*. *Water, Air, and Soil Pollution*, 228(8). doi: 10.1007/s11270-017-3471-9
- Armijos, K. (2016). *Estudio de la degradación electroquímica del nonilfenol etoxilato proveniente de la industria farmacéutica utilizando una celda DiaCell con electrodos de diamante dopados con boro (BDD) (tesis de pregrado)*. EPN, Quito, Ecuador.
- Barceló, L. D., y López, M. J. (n.d.). *Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes*, 27. Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales-CSIC, Barcelona. Recuperado de https://fnca.eu/phocadownload/P.CIENTIFICO/inf_contaminacion.pdf
- Becerril, J. E. (2009). *Contaminantes emergentes en el agua*. *Revista Digital Universitaria*, 10(8), 1–7. doi: 10.2225/vol14-issue6-fulltext-8
- Bejan, D., y Bunce, N. J. (2012). *Electrochimica Acta On the nature of the hydroxyl radicals produced at boron-doped diamond and Ebonex ® anodes*. *Electrochimica Acta*, 69, 275–281. doi: 10.1016/j.electacta.2012.02.097
- Bergh, M. (1999). *Allergenic Oxidation Products*. *Acta Dermato-Venereologica*, 79(0), 5–26. doi: 10.1080/000155599750208040

- Bolívar, C. J. . (2004). *El agua: sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación*. Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones.
- Brière, F. (2005). *Distribución de Agua Potable y Colecta de Desagües y de Agua de Lluvia*. Recuperado de <http://www.presses-polytechnique.ca/en/distribucion-de-agua-potable-y-colecta-de-desaguees-y-de-agua-de-lluvia>
- Brillas, E., Sirés, I., y Oturan, M. A. (2009). *Electro-fenton process and related electrochemical technologies based on fenton's reaction chemistry*. *Chemical Reviews*, 109(12), 6570–6631. doi: 10.1021/cr900136g
- Dartsch, P., y Pupunat, L. (2017). *DiaClean® water technology for the postharvest preservation of citrus fruits causes no cytotoxic effect after air-drying and storage*. *Integrative Food, Nutrition and Metabolism*, 4(5), 1–6. doi: 10.15761/IFNM.1000195
- Cajas, A. E. (2018). *Diseño de un Sistema Complementario para el Tratamiento de Aguas Residuales de Origen Doméstico mediante la Aplicación de un Proceso de Oxidación Avanzada y un Sistema de recuperación de Biogás (tesis de pregrado)*. EPN, Quito, Ecuador.
- Cano, A., Barrera, C., Cotillas, S., Llanos, J., Cañizares, P., y Rodrigo, M. A. (2016). *Use of DiaCell modules for the electro-disinfection of secondary-treated wastewater with diamond anodes*. *Chemical Engineering Journal*, 306, 433–440. doi: 10.1016/j.cej.2016.07.090
- Cano, A., y Barrera, C. E. (2014). *Tratamiento de Efluentes Residuales Municipales, mediante Oxidación Electroquímica para la desinfección empleando una configuración de electrodos del tipo DDB-Fe, DDB-DDB (tesis doctoral)*. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Castañeda, A. C. (2014). *Procesos de oxidación avanzada aplicados en el tratamiento de agua de la industria del petróleo (tesis de pregrado)*. Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", Colombia.
- CEPAL. (2011). *Diagnóstico de la estadísticas del agua en Ecuador*. Diagnostico de

- La Informacion Estadistica Del Agua*, 81. Recuperado de [http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/download/Diagnostico de las Estadísticas del Agua Producto IIIc 2012-2.pdf](http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/download/Diagnostico%20de%20las%20Estadisticas%20del%20Agua%20Producto%20IIIc%202012-2.pdf)
- Cevallos, K., y Ramírez, J. (2005). *Estudio De La Biodegradación De Los Detergentes Comerciales Domesticos De Nuestro Pais*, 9–20. Recuperado de [http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/414/1/TESIS 952.pdf](http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/414/1/TESIS%20952.pdf)
- Chang, M., Gao, C., y Jiang, J. (2009). *Electrochemical Oxidation of Organic Compounds Using Boron-Doped Diamond Electrode*. *Journal of The Electrochemical Society*, 156(2), E50. doi: 10.1149/1.3042220
- Daghrir, R., Drogui, P., y Tshibangu, J. (2014). *Efficient treatment of domestic wastewater by electrochemical oxidation process using bored doped diamond anode*. *Separation and Purification Technology*, 131, 79–83. doi: 10.1016/j.seppur.2014.04.048
- Domènech, X., Jardim, W., & Litter, M. (2004). *Procesos Avanzados De Oxidación Para La Eliminación De Contaminantes*, ResearchGate, 6–34. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/290852253_Advanced_oxidation_processes_for_the_removal_of_pollutants
- Einaga, Y. (2014). *Electrochemical Application of Diamond Electrodes*. *Comprehensive Hard Materials (Vol. 3)*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/B978-0-08-096527-7.00056-8
- Ghenymy, A., Centellas, F., Garrido, J. A., Rodríguez, R. M., Sirés, I., Cabot, P. L., y Brillas, E. (2014). *Decolorization and mineralization of Orange G azo dye solutions by anodic oxidation with a boron-doped diamond anode in divided and undivided tank reactors*. *Electrochimica Acta*, 130, 568–576. doi: 10.1016/j.electacta.2014.03.066
- ARCONE. (2018). *Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución*. Recuperado de [https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads / 2018/01/2018-01-11-Pliego-y-Cargos-Tarifarios-del-SPEE 20182.pdf](https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/2018-01-11-Pliego-y-Cargos-Tarifarios-del-SPEE%2020182.pdf)

- Enciso, R., Espinoza-Montero, P. J., Frontana-Uribe, B. A., Delgadillo, J. A., y Rodríguez-Torres, I. (2013). *Theoretical Analysis of the Velocity Profiles in a Diacell® Cell Applying Computational Fluid Dynamics*. *ECS Transactions*, 47(1), 13–23. doi: 10.1149/04701.0013ecst
- Espinoza-Montero, P. J., Vasquez-Medrano, R., Ibanez, J. G., y Frontana-Uribe, B. A. (2013). *Efficient anodic degradation of phenol paired to improved cathodic production of H₂O₂ at BDD electrodes*. *Journal of The Electrochemical Society*, 160(7), G3171–G3177. doi: 10.1149/2.027307jes
- García, M. A., Roa, G., Barrera, C., Bilyeu, B., y Rodrigo, M. A. (2013). *Synergy of electrochemical oxidation using boron-doped diamond (BDD) electrodes and ozone (O₃) in industrial wastewater treatment*. *Electrochemistry Communications*, 27, 34–37. doi: 10.1016/j.elecom.2012.10.028
- Guanoluiza, L. (2013). *Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con y sin irradiación de electrones acelerados*, 250. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7062>
- Heredia, S., y Jacho, C. (2018). *Estudio de degradación de glifosato en fase acuosa empleando dióxido de titanio expuesto a radiación beta (tesis de pregrado)*. EPN, Quito, Ecuador.
- INEN. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2176 *Calidad del Agua. Muestreo. Técnicas de muestreo*.
- Ivanković, T., y Hrenović, J. (2010). *Surfactants in the environment (review)*. *Arh Hig Rada Toksikol* 2010;61:95-110. doi: 10.2478/10004-1254-61-2010-1943
- Jardak, K., Drogui, P., y Daghrir, R. (2016). *Surfactants in aquatic and terrestrial environment: occurrence, behavior, and treatment processes*. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(4), 3195–3216. doi: 10.1007/s11356-015-5803-x
- Jiménez, D., Medina, S. A., y Gracida, J. N. (2010). *Propiedades, Aplicaciones y*

- Producción De Biotensoactivos (review). Rev. Int. Contam. Ambient. 26 (1) 65-84, 2010.*
- Jiménez, I. (2009). Desarrollo de metodología analítica para la determinación de tensoactivos y sus productos de degradación mediante diferentes técnicas separativas (tesis doctoral). Universidad de Granada, Granada.*
- Knepper, T., y Berna, J. L. (2003). Surfactants: properties, production, and environmental aspects. Comprehensive Analytical Chemistry XL, 1–49.*
- Lissens, G., Pieters, J., Verhaege, M., Pinoy, L., y Verstraete, W. (2003). Electrochemical degradation of surfactants by intermediates of water discharge at carbon-based electrodes. Electrochimica Acta, 48(12), 1655–1663. doi: 10.1016/S0013-4686(03)00084-7*
- Louhichi, B., Ahmadi, M. F., Bensalah, N., Gadri, A., y Rodrigo, M. A. (2008). Electrochemical degradation of an anionic surfactant on boron-doped diamond anodes. Journal of Hazardous Materials, 158(2–3), 430–437. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.01.093*
- Macpherson, J. V. (2014). A practical guide to using boron doped diamond in electrochemical research. Physical Chemistry Chemical Physics, 17(5), 2935 - 2949. doi: 10.1039/C4CP04022H*
- Manassero, A., Passalia, C., Negro, A. C., Cassano, A. E., y Zalazar, C. S. (2010). Glyphosate degradation in water employing the H₂O₂/UVC process. Water Research, 44(13), 3875–3882. doi: 10.1016/j.watres.2010.05.004*
- Manassero, A., Passalia, C., Negro, A. C., Cassano, A. E., Zalazar, C. S., Brillas, E., y Gonçalves, I. C. (2009). Electrochemical degradation of anionic surfactants. Water Research, 35(2), 6570–6631. doi: 10.1021/cr900136g*
- Marselli, B., Garcia-gomez, J., Michaud, P., Rodrigo, M. A., y Mo, M. (2003). Electrogenation of Hydroxyl Radicals on Boron-Doped Diamond Electrodes. Journal of The Electrochemical Society, 2003 79–83. doi: 10.1149/1.1553790*
- Martín De Vidales, M. J. (2015). Eliminación De Contaminantes Orgánicos*

Persistentes De Aguas Residuales Mediante Oxidación Electroquímica Con Ánodo de Diamante Dopado con Boro (tesis doctoral). Universidad de Castilla - La Mancha, Ciudad Real.

Martínez, J. L. (2017). *Diseño y Construcción de un reactor electroquímico Semi-Bach acoplado a un sistema de monitoreo de parámetros físicos-químicos y eléctricos, para la degradación oxidativa avanzada de contaminantes emergentes empleando una celda DIACLEAN® (tesis de pregrado). Universidad Autónoma de México, Toluca, México.*

Ministerio del Ambiente del Ecuador (2013). *Libro VI del Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) Anexo 1 Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. Recuperado de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>*

Montilla, F., Gamero-Quijano, A., y Morallón, E. (2014). *Synthetic Boron-Doped Diamond Electrodes for Electrochemical Water Treatment. Bol. Grupo Español Carbón, 31, 8–12.*

Morelli, J. J., y Szajer, G. (2000). *Analysis of Surfactants – Part I. Journal of Surfactants and Detergents, 3(4), 539–551.*

Muñoz, M., y Aldás, M. B. (2017). *Sistemas de depuración de aguas residuales. EPN, Quito, Ecuador.*

Ochoa, S. (2009). *Descomposición electroquímica de ciclofosfamida, 5-fluorouracilo e ifosfamida utilizando un reactor de flujo continuo con un electrodo de diamante dopado con boro (tesis de pregrado). EPN, Quito, Ecuador.*

Orjuela, M. I., y Lizarazo, J. M. (2013). *Sistemas de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Colombia (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.*

Panizza, M., y Cerisola, G. (2005). *Application of diamond electrodes to electrochemical processes. Electrochimica Acta, 51(2), 191–199. doi: 10.1016/j.electacta.2005.04.023*

- Panizza, M., Delucchi, M., y Cerisola, G. (2005). *Electrochemical degradation of anionic surfactants*. *Journal of Applied Electrochemistry*, 35(4), 357–361. doi: 10.1007/s10800-005-0793-x
- Panizza, M., Michaud, P. A., Cerisola, G., y Comninellis, C. H. (2001). *Electrochemical treatment of wastewaters containing organic pollutants on boron-doped diamond electrodes: Prediction of specific energy consumption and required electrode area*. *Electrochemistry Communications*, 3(7), 336–339. doi: 10.1016/S1388-2481(01)00166-7
- PNUMA, FLACSO, Ministerio del Ambiente del Ecuador, BID, ECORAE, PMRC, ESPOL. (2008). *GEO Ecuador 2008: Informe sobre el estado del medio ambiente*. Ecuador.
- Polcaro, A. M., Vacca, A., Mascia, M., y Palmas, S. (2005). *Oxidation at boron doped diamond electrodes: An effective method to mineralise triazines*. *Electrochimica Acta*, 50(9), 1841–1847: doi: 10.1016/j.electacta.2004.08.037
- Poyatos, J. M., Muñio, M. M., Almecija, M. C., Torres, J. C., Hontoria, E., y Osorio, F. (2010). *Advanced oxidation processes for wastewater treatment: State of the art*. *Water, Air, and Soil Pollution*, 205(1–4), 187–204. doi: 10.1007/s11270-009-0065-1
- Ramalho, R. . (2003). *Tratamiento de Aguas Residuales (Edición Rev)*. ESPAÑA. Recuperado de [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=30etGjzPXywC&oi=fnd&pg=PA1&dq=generacion+de+aguas+residuales&ots=OCqblSgHmc&sig=RtWNppA8WkOI-hVfNFvsYX3paEM#v=onepage&q=generacion de aguas residuales&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=30etGjzPXywC&oi=fnd&pg=PA1&dq=generacion+de+aguas+residuales&ots=OCqblSgHmc&sig=RtWNppA8WkOI-hVfNFvsYX3paEM#v=onepage&q=generacion+de+aguas+residuales&f=false)
- Romero, J. (2009). *CALIDAD DEL AGUA 3RA EDICION*. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería
- Salazar, J. P. (2014). *Evaluación Físicoquímica de Surfactantes No Iónicos y Su Aplicación en el Destintado de Papel Reciclado (tesis de pregrado)*. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.

- Schmalz, V., Dittmar, T., Haaken, D., y Worch, E. (2009). *Electrochemical disinfection of biologically treated wastewater from small treatment systems by using boron-doped diamond (BDD) electrodes - Contribution for direct reuse of domestic wastewater*. *Water Research*, 43(20), 5260–5266. doi: 10.1016/j.watres.2009.08.036
- Secretaría Nacional del Agua, SENAGUA. Proyecto CEPAL-GIZ. (2011). *Reporte sobre El Estado Situacional del Ecuador en cuanto al manejo de los recursos hídricos*. Quito, Ecuador.
- Silva, J., Torres, P., y Madera, C. (2008). *Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura*. *Agronomía Colombiana*, 26(1), 347–359. Recuperado de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/13521/14204>
- Solé, M., De Alda, M. J. L., Castillo, M., Porte, C., Ladegaard-Pedersen, K., y Barceló, D. (2000). *Estrogenicity determination in sewage treatment plants and surface waters from the catalonian area (NE Spain)*. *Environmental Science and Technology*, 34(24), 5076–5083. doi: 10.1021/es991335n
- Torres, G. (2014). *Tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de técnicas avanzadas de oxidación y biofiltros (tesis doctoral)*. Universidad de las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, España.
- Uc-Peraza, R., y Delgado-Blas, V. (2012). *Determinación de la concentración letal media (cl 50) de cuatro detergentes domésticos biodegradables en*. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(2), 137–144.
- Valenzuela, A. L., Vasquez-Medrano, R., Ibanez, J. G., Frontana-Uribe, B. A., y Prato-Garcia, D. (2017). *Remediation of Diquat-Contaminated Water by Electrochemical Advanced Oxidation Processes Using Boron-Doped Diamond (BDD) Anodes*. *Water, Air, and Soil Pollution*, 228(2). doi: 10.1007/s11270-017-3244-5
- Varó, P. J. (1998). *Contribución al estudio sobre el comportamiento ambiental y degradación de jabones (tesis doctoral)*. Universidad de Alicante, Alicante.

Villegas, M., y Vidal, E. (2009). Gestión de los Procesos de Descontaminación de Aguas Residuales Domésticas de Tipo Rural en Colombia (tesis de maestría). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

WATERDIAM. (2015). Effluent Treatment. H&V Chemicals. Trading & Consulting. Recuperado de <https://waterdiam.com/>

ANEXOS

ANEXO 1

PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UNA DENSIDAD DE CORRIENTE DE 14mA/cm² Y FLUJOS DE ALIMENTACIÓN DE 1,5; 4 Y 7 L/min

TABLA A1- 1. PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UNA DENSIDAD DE CORRIENTE DE 14mA/cm² Y FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE 1,5 L/min

PRIMERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	12	6,5	788,3	90	273	0,913	15
60	17,5	6,9	773,3	81	249	0,885	14
120	20,8	7,7	771	75	198	0,797	13,4
180	19	7	763,6	60	165	0,759	10
240	18,8	6,9	752,1	55	140	0,704	9,3
300	21,1	6,27	732,5	49	123	0,6	9,4
360	19,6	7,09	698,6	40	98	0,534	8,8
SEGUNDA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	11	6,3	787,8	92	274	0,918	15
60	17,2	6,5	772,1	85	259	0,895	13,9
120	20,3	7,5	770	77	201	0,807	13,4
180	23,3	7,1	753,6	61	187	0,769	10,5
240	18,1	6,7	742,1	53	145	0,714	9,4
300	19	6,3	738,5	45	129	0,604	9,8
360	18,5	7,1	708,6	39	97	0,554	9,1
TERCERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	12,5	6,2	785,3	95	279	0,923	14
60	15	7	778,3	85	250	0,889	15
120	21,6	7,3	769	77	192	0,787	13,7
180	19,2	7,4	763,2	59	169	0,762	10
240	18,2	6,6	757,1	53	148	0,701	9,5
300	20,7	6,2	739,5	47	128	0,623	9,9
360	19	7,7	688,6	45	100	0,544	8,3

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

TABLA A1- 2. PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UNA DENSIDAD DE CORRIENTE DE 14mA/cm² Y FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE 4 L/min

PRIMERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	12	7	788,3	102	298	0,903	16
60	17,5	7,3	803,3	99	303	0,985	19
120	18	6,9	781	89	289	0,867	18,4
180	21,5	7,3	773,6	84	276	0,759	13
240	20,2	7,7	782,1	78	235	0,761	10,5
300	19	6,98	771,5	71	175	0,722	9,4
360	18,7	7,17	728,6	65	125	0,698	9,2
SEGUNDA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	12,5	6,9	784,3	105	302	0,913	15
60	17,9	7,7	813,3	98	303	0,982	14
120	18,7	6,6	788	89	292	0,876	17
180	21,9	7,8	773,6	85	281	0,769	15,7
240	20,7	7,7	786,1	74	255	0,761	16,4
300	19,8	6,98	778,5	71	219	0,742	11,4
360	19	7,6	738,6	66	178	0,689	10,2
TERCERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	11,5	7,5	798,3	105	299	0,893	16,5
60	17	7,2	813,3	98	301	0,984	18,6
120	18,2	6,5	786	90	288	0,865	18,4
180	20,3	7,7	775,6	84	273	0,76	14
240	21,3	7	788,1	75	253	0,758	10,4
300	19	6,3	776,3	73	206	0,727	9,8
360	19,7	7,02	729,1	67	169	0,689	9,3

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

TABLA A1- 3. PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UNA DENSIDAD DE CORRIENTE DE 14mA/cm² Y FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE 7 L/min

PRIMERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	12	6,5	788,3	96	273	0,913	15
60	18	7,1	793,3	102	298	1,13	14,6
120	21,3	7,7	782	98	287	1,07	13,4
180	19	7,2	773,6	86	279	0,98	11,6
240	17,6	6,9	762,1	88	261	0,97	10,3
300	21,1	6,32	772,5	79	259	0,84	9,8
360	22	7,19	732,2	76	258	0,818	8,9
SEGUNDA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	13	7	789,3	100	278	0,923	14
60	19	7,3	795,3	102	298	1,109	15
120	22	6,9	787	96	298	1,01	14,7
180	21,5	7	775,6	85	275	0,92	13
240	18,4	6,8	769,4	89	264	0,91	11,9
300	20,8	6,9	775,3	74	260	0,89	10
360	22	7,9	737,5	77	258	0,828	8,9
TERCERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	12,5	6,3	798,3	102	289	1,003	14
60	19	7,2	791,3	107	282	1,15	15
120	20,2	7,8	784,5	99	279	1,01	19,4
180	19,7	7,9	779,8	92	271	0,972	17,2
240	17,5	7	763,1	86	269	0,862	14
300	21	6,5	778,4	73	261	0,884	10,4
360	22,9	7,3	739,7	74	259	0,838	9,2

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

ANEXO 2

DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA LOS RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UNA DENSIDAD DE CORRIENTE DE $14\text{mA}/\text{cm}^2$ Y UN FLUJO DE ALIMENTACIÓN ÓPTIMO DE $1,5\text{ L}/\text{min}$

TABLA A2- 1. Desviaciones estándar de los parámetros analizados durante seis horas de electrólisis para una densidad de corriente de 14 mA/cm² y un flujo de alimentación de 1,5 L/min.

Tiempo (min)	°C	Desviación Estándar	PH	Desviación Estándar	Conductividad us/cm2	Desviación Estándar	Turbidez (NTU)	Desviación Estándar
0	11,8	0,764	6,3	0,153	787,1	1,607	92	2,517
60	16,6	1,365	6,8	0,265	774,6	3,288	84	2,309
120	20,9	0,656	7,5	0,200	770	1,000	76	1,155
180	20,5	2,427	7,2	0,208	760,1	5,662	60	1,000
240	18,4	0,379	6,7	0,153	750,4	7,638	54	1,155
300	20,6	1,115	6,3	0,051	736,8	3,786	47	2,000
360	19,03	0,551	7,3	0,349	698,6	10,000	41	3,215

(CONTINUACIÓN)

Tiempo (min)	DQO (mg/L)	Desviación Estándar	Detergentes (mg/L)	Desviación Estándar	voltaje de la celda (V)	Desviación Estándar
0	275	3,215	0,918	0,005	15	0,577
60	253	5,508	0,889	0,005	14,3	0,608
120	197	4,583	0,797	0,010	13,5	0,173
180	174	11,719	0,763	0,005	10,2	0,289
240	144	4,041	0,706	0,007	9,4	0,100
300	127	3,215	0,609	0,012	9,7	0,265
360	98	1,528	0,544	0,010	8,7	0,404

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

ANEXO 3

PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UN FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE 1,5 L/min Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 7, 14, 20, 30, 40 Y 50 mA/cm²

TABLA A3- 1. PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UN FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE 1,5 L/min Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 7 mA/cm²

PRIMERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	10,8	7,05	838,1	127	305	0,812	7,03
60	11,9	7,07	839,2	117	290	0,814	7,17
120	16,5	7,4	798,2	102	285	0,782	7,2
180	20,7	7,4	775,4	91	258	0,729	7,1
240	21,2	6,77	764,1	77	229	0,611	7,3
300	21,5	7,4	738,1	71	190	0,579	7,4
360	22,7	7,52	714,4	65	172	0,574	7,3
SEGUNDA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	14	7	833,1	97	300	0,814	6,9
60	15,5	7,12	825,2	85	292	0,793	7,3
120	16,8	7,6	798,2	72	273	0,761	6,98
180	20,7	7,4	779,4	69	227	0,754	7,09
240	21,2	6,9	760,1	59	206	0,703	7,23
300	21,5	7	737,1	49	174	0,677	7,06
360	22,7	7,4	714,4	47	167	0,606	6,9
TERCERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	12	6,95	845	116	325	0,902	6,5
60	13,7	7,8	839,2	98	316	0,88	6,9
120	18,6	7	786,9	85	296	0,843	7
180	20,4	7,9	779,9	78	246	0,836	7,05
240	22,9	7,5	765,1	69	223	0,768	7,16
300	24,5	7	749,8	62	189	0,702	6,8
360	23,3	6,9	721,3	58	181	0,646	7,4

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

TABLA A3- 2. PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UN FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE 1,5 L/min Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 14 mA/cm²

PRIMERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	11	6,7	778,3	89	257	0,913	16
60	18,9	6,9	773,3	80	197	0,877	14
120	21,5	7,02	771	75	177	0,797	9,1
180	19	7,09	763,6	60	155	0,709	9
240	18,8	7,16	750,1	55	129	0,704	8,8
300	20,5	6,09	712,5	49	110	0,6	9,4
360	22	7,09	698,6	40	91	0,564	8,8
SEGUNDA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	14	6,8	784,3	78	277	0,895	15,2
60	21,7	6,79	783,3	69	224	0,9	14,9
120	18,2	6,7	781	64	197	0,744	13,7
180	19,7	7,12	746,5	60	173	0,782	13
240	18,8	7,12	710,4	64	165	0,726	12,1
300	20,3	7,16	675,5	48	131	0,691	11,5
360	21	7,23	645,8	41	105	0,548	10
TERCERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	13,8	7	798,2	85	279	0,903	14,0
60	18,5	6,9	795,18	80	220	0,739	12,5
120	19,6	7,3	794,84	75	185	0,665	11,9
180	18,8	7,5	759,73	77	162	0,64	10,8
240	20	7,1	722,99	70	140	0,642	11,0
300	21,4	6,9	687,47	52	131	0,598	10,4
360	20,5	7,3	657,25	45	115	0,553	9,8

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

TABLA A3- 3. PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UN FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE 1,5 L/min Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 20 mA/cm²

PRIMERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	17	7,43	799,9	90	402	1,008	12
60	19,5	7,3	788,4	81	352	0,985	13,09
120	22,2	7,15	779,9	74	303	0,942	13,4
180	23,5	7,61	769,8	68	278	0,909	14,2
240	25	7,48	717,9	55	247	0,803	15,4
300	24,8	7,19	698,4	48	198	0,707	14,4
360	26,5	7,12	689,9	40	95	0,517	10,8
SEGUNDA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	16	6,89	803,30	95	378	1,009	13
60	18,7	7,3	791,75	82	312	0,958	14,5
120	19,9	7,8	783,21	73	269	0,939	15,7
180	21,4	7,9	773,07	68	209	0,878	14,5
240	25	8,1	720,95	55	167	0,848	16,9
300	23,8	7,67	701,36	49	109	0,718	17,9
360	24,1	7,59	692,83	39	93	0,637	19
TERCERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	13	6,75	804,50	92	389	0,986	14
60	16,7	7,1	792,93	85	341	0,964	14,8
120	19,8	7,8	784,38	73	293	0,922	15,5
180	23,4	8,1	774,22	60	269	0,889	15,8
240	22,8	7,6	722,02	56	239	0,785	14,7
300	24,1	7,23	702,41	49	192	0,691	15,9
360	24,9	7,9	693,86	41	92	0,505	14,8

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

TABLA A3- 4. PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UN FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE 1,5 L/min Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 30 mA/cm²

PRIMERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	19	7,36	763,3	93	317	1,021	12
60	23,8	6,86	728,4	63	275	1,024	15,4
120	22,5	7,67	712,2	55	200	0,999	18
180	22,8	8,54	704,7	35	163	0,888	18,9
240	24	8,19	682,4	24	147	0,678	17,8
300	22,8	8,45	672,6	22	104	0,548	17,3
360	24	8,53	663,4	20	78	0,489	18,09
SEGUNDA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	19,9	7,05	783,3	90	326	1,04	14
60	20	7,3	778,4	65	285	1,003	15,7
120	19,8	7,5	757,2	59	215	1	21,7
180	21,2	7,2	738,7	51	152	0,912	20,2
240	19,5	8,01	698,4	49	113	0,762	17,4
300	20	8,09	677,6	26	91	0,64	13,4
360	22,5	8,14	661,4	20	80	0,535	12
TERCERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	16	7,8	798,50	97	356	1,08	15
60	19,9	7,09	793,50	70	311	1,04	15,8
120	22,8	7,8	771,89	64	242	1,031	19,4
180	21,5	7,5	753,03	55	176	0,947	23,4
240	23,8	8,01	711,95	53	116	0,791	18,2
300	25,3	8,4	690,75	28	91	0,663	17,3
360	22,8	8,2	674,23	22	79	0,555	15

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

TABLA A3- 5. PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UN FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE 1,5 L/min Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 40 mA/cm²

PRIMERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	9,3	7,1	551,3	91	315	0,989	21,7
60	20,1	7,59	503	51	280	0,879	17,9
120	20,9	7,43	489,2	47	268	0,702	15,7
180	21,5	8,5	429,1	42	233	0,547	16,8
240	22,6	8,67	451,1	27	113	0,503	15,6
300	23	8,87	439,1	24	93	0,524	15,4
360	24,1	9	386,2	16	69	0,346	17,8
SEGUNDA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	12	7,1	683,8	97	285	1,011	20,8
60	18	7,6	623,89	64	205	0,897	23,6
120	20,9	7,2	606,73	50	189	0,716	19,5
180	21,5	8,2	532,23	44	156	0,559	18,9
240	22	8,4	559,56	29	115	0,514	20
300	23,5	8,39	544,63	26	91	0,414	18,6
360	23,3	8,6	479,7	17	65	0,353	18,1
TERCERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	13	7,4	679,6	98	336	0,993	19,9
60	18,6	7,8	620,3	63	298	0,882	21,8
120	21,3	7,9	603,6	30	285	0,703	20,8
180	21,7	8,01	528,96	30	248	0,548	18,9
240	21,4	8,2	556,07	29	121	0,505	21,5
300	23	8,8	541,25	26	99	0,455	18,6
360	24,6	8,7	476,7	18	73	0,345	17,9

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

TABLA A3- 6. PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO A UN FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE 1,5 L/min Y DENSIDAD DE CORRIENTE DE 50 mA/cm²

PRIMERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	14,5	7,05	603,3	150	305	1,091	24
60	23	7,46	512,8	95	269	0,8	20,7
120	19	7,87	483	81	228	0,645	20,5
180	25,7	8,71	464,7	45	163	0,533	18,5
240	23,2	8,91	460	31	119	0,398	19
300	21	9,05	452,7	23	77	0,228	18,9
360	24,7	9,12	440,1	20	29	0,102	17,5
SEGUNDA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	13	7	609,8	145	300	0,989	23,1
60	18,6	7,8	578,7	98	241	0,725	24,5
120	20,5	7,5	501,7	86	203	0,585	23
180	21,8	7,9	468,3	43	147	0,483	22,8
240	23	8,09	453,8	30	98	0,361	21,9
300	22,7	8,4	447,8	19	69	0,222	22,3
360	25	8,9	439,6	14	30	0,109	19,1
TERCERA CORRIDA							
Tiempo (min)	°C	pH	Conductividad us/cm	Turbidez (NTU)	DQO (mg/L)	Detergentes (mg/L)	voltaje de la celda (V)
0	12	7,1	678,5	130	328	0,932	22
60	16,9	7,4	589,2	97	257	0,683	23,8
120	20,3	7,8	519,8	76	210	0,551	24
180	23,7	8,3	487,9	49	150	0,455	22,7
240	24	8,7	443,8	31	98	0,34	21,9
300	23,7	8,8	426,1	23	57	0,227	20,1
360	24,7	9,2	409,8	12	27	0,099	19,2

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

ANEXO 4

DESVIACIÓN ESTANDAR PARA LOS RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DURANTE EL PROCESO ELECTROQUÍMICO UN FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE 1,5 L/min Y DENSIDAD DE CORRIENTE ÓPTIMA DE 50 mA/cm

TABLA A4- 1. Desviaciones estándar de los parámetros analizados durante seis horas de electrólisis para una densidad de corriente óptima de 50 mA/cm² y un flujo de alimentación de 1,5 L/min.

Tiempo (min)	°C	Desviación Estándar	PH	Desviación Estándar	Conductividad us/cm ²	Desviación Estándar	Turbidez (NTU)	Desviación Estándar
0	13,17	1,258	7,05	0,050	630,533	41,667	142	10,408
60	19,50	3,148	7,55	0,216	560,233	41,413	97	1,528
120	19,93	0,814	7,72	0,197	501,500	18,401	81	5,000
180	23,73	1,950	8,30	0,405	473,633	12,486	46	3,055
240	23,40	0,529	8,57	0,426	452,533	8,174	31	0,577
300	22,47	1,365	8,75	0,328	442,200	14,157	22	2,309
360	24,80	0,173	9,07	0,155	429,833	17,351	15	4,163

(Continuación)

Tiempo (min)	DQO (mg/L)	Desviación Estándar	Detergentes (mg/L)	Desviación Estándar	voltaje de la celda (V)	Desviación Estándar
0	311	14,933	1,004	0,081	23,03	1,002
60	256	14,048	0,736	0,059	23,00	2,022
120	214	12,897	0,594	0,048	22,50	1,803
180	153	8,505	0,490	0,040	21,33	2,454
240	105	12,124	0,366	0,029	20,93	1,674
300	68	10,066	0,226	0,003	20,43	1,724
360	29	1,528	0,103	0,005	18,60	0,954

ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

ANEXO 5

**CÁLCULO PARA DETERMINAR EL ORDEN DE REACCIÓN DE LOS
PARÁMETROS PRINCIPALES DE ANÁLISIS**

El orden de reacción se determinó por el método integral como se detalla a continuación.

Ejemplo de cálculo:

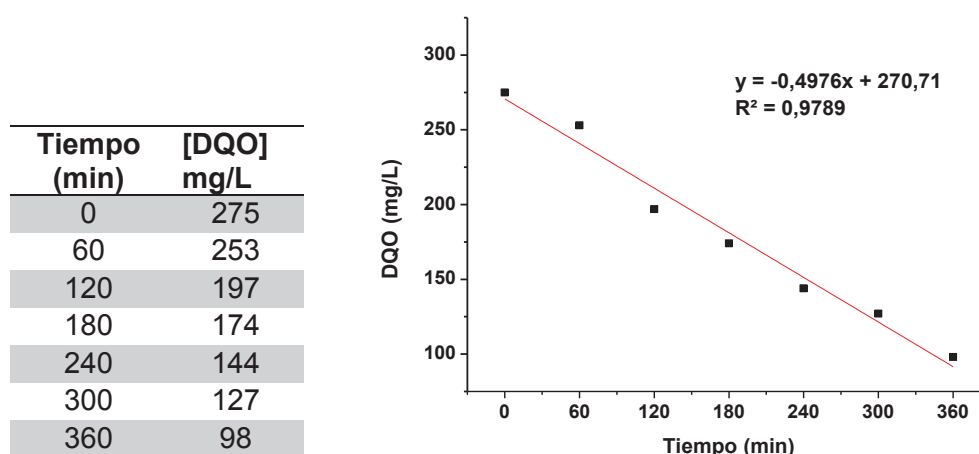
Los datos siguientes dan la concentración de DQO durante seis horas de electrolisis a una densidad de corriente de 14 mA/cm², y un flujo de alimentación de 1,5 L/min.

TABLA A5- 1. Datos de la concentración de DQO durante seis horas de electrólisis para determinar el orden de reacción

t (min)	0	60	120	180	240	300	360
DQO (mg/L)	275	253	197	174	144	127	98

En primer lugar, se determina si el orden de reacción es 0. Para esto se observa si al graficar la concentración de DQO en función del tiempo, esta reduce de forma lineal. Al realizar la representación lineal se obtiene la figura A5-1.

FIGURA A5- 1. Tabla de datos y representación de [DQO] vs Tiempo



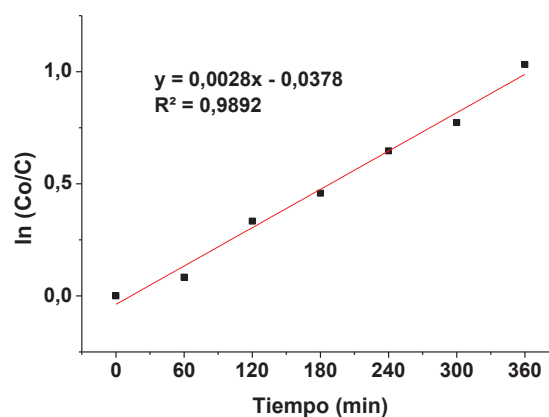
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Se observa que no todos los puntos experimentales se ajustan a una recta, y el factor de correlación R^2 (0,9789) no es muy próximo a 1. Por lo tanto, se concluye que la cinética no corresponde a orden cero.

A continuación, para determinar si es de orden 1, se grafica el Logaritmo natural de la concentración de DQO en función del tiempo y se observa si existe una tendencia lineal más exacta que la anterior.

FIGURA A5- 2. Tabla de datos y gráfica de Ln (Co/C) vs tiempo

t (min)	[DQO] mg/L	Co/C	ln (Co/C)
0	275	1	0
60	253	1,087	0,083
120	197	1,396	0,334
180	174	1,580	0,458
240	144	1,910	0,647
300	127	2,165	0,773
360	98	2,806	1,032



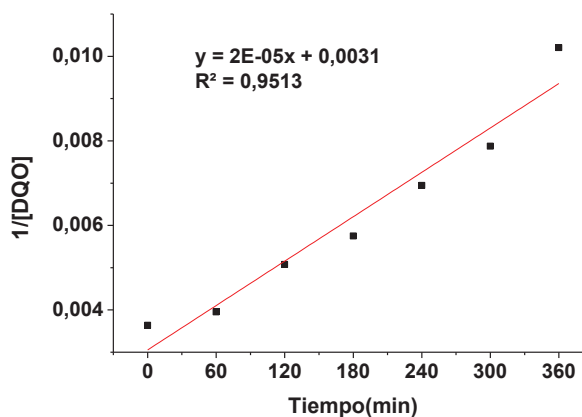
ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Es evidente que la mayoría de puntos experimentales se ajusta a una recta y, además, el factor de correlación R^2 (0,9892) es más próximo a 1. Por lo tanto, la cinética se ajusta a un orden 1.

Por último, se determina si los datos se ajustan a una cinética de orden 2, por ende, se grafica el inverso de la concentración de DQO en función del tiempo y se observa si los datos tienen una tendencia lineal como se indica en la figura A5-3.

FIGURA A5- 3. Tabla de datos y representación de 1/[DQO] vs tiempo

Tiempo (min)	[DQO] mg/L	1/[DQO] (mg/L) ⁻¹
0	275	0,004
60	253	0,004
120	197	0,005
180	174	0,006
240	144	0,007
300	127	0,008
360	98	0,010



ELABORACIÓN: Cisneros, 2019

Para este caso, se observa que los puntos están muy dispersos de la línea recta y el factor de correlación R^2 (0,9513) no es muy cercano a 1. Por lo tanto, la cinética no es de orden 2.

De los tres supuestos, el segundo que corresponde a una cinética de primer orden obtuvo el mayor valor del factor de correlación R^2 (0,9892).