

Degradación de tensos activos en aguas residuales de galvanoplastia mediante procesos combinados y electroquímicos para mejorar la eficiencia del tratamiento y reducir contaminación

[Degradation of surfactants in electroplating wastewater through combined and electrochemical processes to improve treatment efficiency and reduce pollution]

Judith Chalen-Medina, Kerly Fun Sang-Robinson, Andrez Villamar-Cardenas, Gino Flor-Chavez, Jaime Arévalo-Cedeño, and Jean Jaya-Maza

Carrera de Ingeniería Civil, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Guayas, Ecuador

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This study evaluates the degradation of surfactants in wastewater generated by the electroplating industry using an integrated treatment train comprising physicochemical, biological, and electrochemical processes. The research addresses compliance with maximum permissible discharge limits established by the Unified Text of Secondary Environmental Legislation (TULSMA) and contributes to sustainable water resource management in the province of Guayas. The primary objective was to determine a technically efficient, scalable, and environmentally sound treatment configuration capable of reducing surfactants and associated contaminants derived from electroplating operations.

Comprehensive wastewater characterization, treatability tests, and process performance evaluations were conducted at an average influent flow rate of 20 m³ per day. Primary treatment via dissolved air flotation achieved effective removal of oils and greases and ten percent reduction in chemical oxygen demand and biochemical oxygen demand. Secondary treatment consisted of an activated biological system enriched with enzymes, urea, and phosphates, which enhanced microbial activity, promoted biodegradation of organic matter, facilitated surfactant removal, and induced precipitation of dissolved heavy metals. Tertiary treatment involved electrochemical oxidation using electrolytic cells, enabling surfactant hydrolysis and further reduction of recalcitrant compounds.

The integrated treatment system achieved significant reductions in organic load, surfactant concentration, and metal content, producing an effluent that met all applicable regulatory discharge standards. The results demonstrate that the combined biological and electrochemical approach represents an effective, robust, and sustainable alternative for the treatment of electroplating wastewater. Furthermore, the proposed treatment scheme exhibits operational flexibility and potential applicability to other industrial effluents characterized by complex pollutant matrices and stringent regulatory requirements.

KEYWORDS: wastewater, surfactants, electroplating, electrochemical, pollution, treatment.

1 INTRODUCTION

El presente estudio se enmarca en la búsqueda de soluciones sostenibles para el tratamiento de aguas residuales industriales, específicamente aquellas generadas en los procesos de galvanoplastia, las cuales contienen altas concentraciones de tenso activos, aceites y grasas. En la actualidad, diversas investigaciones a nivel nacional e internacional han evaluado tecnologías avanzadas para la degradación de compuestos orgánicos, destacándose los procesos biológicos y electroquímicos por su eficiencia y bajo impacto ambiental (Zhou et al., 2023; Jiménez et al., 2022). Sin embargo, la integración de ambos métodos con tratamientos primarios aún presenta vacíos de conocimiento respecto a su aplicabilidad a escala industrial en países en desarrollo.

El problema radica en la persistencia de tensos activos en los efluentes de la industria de galvanoplastia, los cuales dificultan su tratamiento convencional y afectan la calidad de los cuerpos receptores. Esto genera la necesidad de desarrollar estrategias integradas que optimicen la remoción de contaminantes y cumplan con los estándares ambientales establecidos en el TULSMA (MAATE, 2020).

La pregunta que guía el estudio es: ¿De qué manera la combinación de procesos primarios, biológicos y electroquímicos puede mejorar la degradación de tensos activos en aguas residuales de galvanoplastia?

Como respuesta, el objetivo del estudio es diseñar y evaluar un sistema de tratamiento combinado que maximice la eficiencia en la remoción de contaminantes, promueva el cumplimiento normativo y contribuya al desarrollo sostenible del sector industrial, estableciendo además una metodología replicable para otras actividades productiva.

Ubicación del área del estudio

Vía Daule, zona industrial de la ciudad de Guayaquil

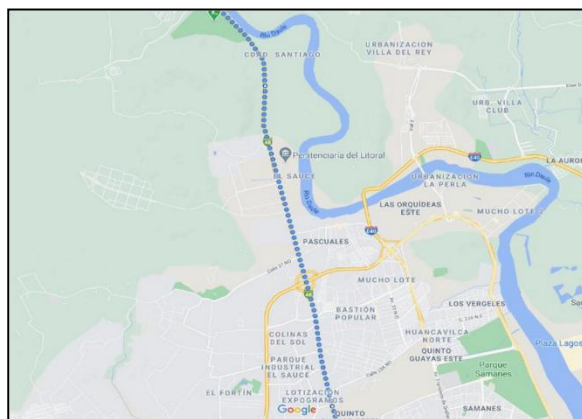


Fig. 1. Google Eart, 2025

2 METODOLOGIA

La metodología aplicada en el presente estudio se basó en un enfoque *cualitativo y cuantitativo*, empleando el método *prueba-error* para la evaluación de la eficiencia de los procesos de tratamiento. Se realizaron caracterizaciones físico - químicas del agua cruda y tratada en cada etapa del proceso: tratamiento primario, secundario (biológico) y electroquímico. Asimismo, se efectuaron pruebas piloto con celdas electroquímicas, con el fin de obtener datos específicos sobre la remoción de contaminantes.

2.1 TRATAMIENTO PRIMARIO: FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (DAF)

El sistema de Flotación por Aire Disuelto (DAF) utiliza aire comprimido para separar sólidos suspendidos, tensos activos, aceites, grasas, materia orgánica e inorgánica, color y turbiedad. Mediante la dosificación de producto químico sulfato de aluminio y floculante catiónico, la saturación de aire y el producto químico suspende las grasas y tenso activo del agua cruda de ingreso.

Datos del sistema de tratamiento:

Caudal (Q): $20 \text{ m}^3/\text{día} = 0.833 \text{ m}^3/\text{h}$

Tiempo de tratamiento (TRH): 5 min = 0.0833 h

Volumen disponible (V): 5.5 m

FLOTACION POR AIRE DISUELTO (FAD)



2.2 TRATAMIENTO SECUNDARIO: REACTOR BIOLÓGICO

El reactor biológico de *lodos activados* permite eliminar materia orgánica e inorgánica mediante la acción de microorganismos que descomponen los contaminantes. El sulfuro de hidrógeno generado precipita metales pesados, y la aireación extendida 24/7 facilita el fraccionamiento de grasas y tensos activos.

Dado que este tipo de agua es carente en nutrientes, se adicionaron *enzimas, fosfatos, urea y melaza* para crear biomasa y compensar dicha deficiencia.

Tiempo de retención:

$$\theta = 5.5 \text{ días} \approx 6 \text{ días}$$

Cálculo de oxígeno requerido OR.

$$OR = F \times E \times S_0 \times Q \times 10^{-3}$$

Donde:

F: 1.5

E: 0.9 eficiencia DBO

So: 960 mg/L

Q: 20 m³/día

$$OR = (1.5) \times (0.9) \times (960) \times (20) \times 10^{-3}$$

$$OR = 25.92 \text{ kg } O_2/\text{día}$$

REACTOR BIOLÓGICO DE AREACION EXTENDIDA



2.3 TRATAMIENTO – ELECTROQUÍMICO

Las celdas electroquímicas es una tecnología avanzada que se sirve para tratar diferentes tipos de contaminantes como tenso activos, grasas y aceites en aguas residuales. Utilizan corrientes eléctricas para generar reacciones químicas que descomponen estos compuestos difíciles de eliminar, y también contribuyen a la remoción de otros contaminantes orgánicos persistentes, mejorando significativamente la calidad del agua tratada

Tratamiento de agua con celdas electroquímicas

El tratamiento electroquímico se lo realiza con celdas electrolítica, donde se produce una reacción química impulsada por electricidad; esta reacción es electrolisis, en este caso es electrolisis avanzada; la cual, es un proceso de oxidación el agua residual previamente tratada se descompone en oxígeno (O₂) e hidrogeno (H₂), radicales OH y otros compuestos, por medio de una corriente eléctrica continua, para eliminar sustancias contaminantes difíciles de degradar biológicamente.

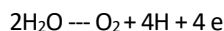
Electrodo cátodo + (Grafito)

En el cátodo, ocurre la reducción de iones (H₃O⁺) y la liberación del H₂ molecular dando la siguiente reacción



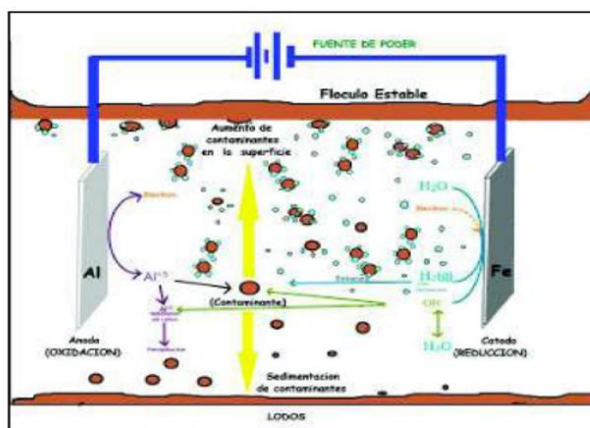
Ánodo - (titanio Platinado)

En el ánodo, ocurre la oxidación del agua y la liberación del oxígeno (O₂) dando la siguiente reacción

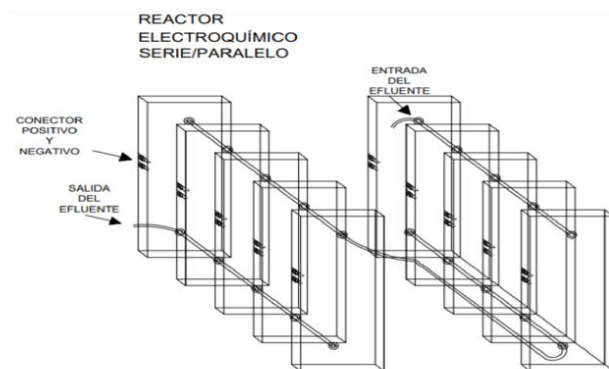


La electro oxidación las moléculas de los tensos activos sufren una ruptura heterolítica, reduciendo la concentración de estos compuestos logrando llegar a los límites máximos permisibles para su descarga al cuerpo de agua o alcantarillado del sector o su reutilización al proceso productivo.

Esquema de una celda electroquímica



Fuente: (Mollah, Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001)



Reactor Electroquímico serie/paralelo

2.4 FILTRACIÓN

Posterior al tratamiento electroquímico, el efluente pasa por un sistema de filtración de grava y arena, el cual retiene trazas de tenso activos, aceites y grasas previamente removidos durante la electrólisis.

2.5 CLORACIÓN

Finalmente, el efluente tratado se somete a un proceso de cloración para eliminar microorganismos patógenos. Este paso garantiza que el agua cumpla con los límites de descarga establecidos en la normativa ecuatoriana (TULSMA), mejorando su calidad final y asegurando la sostenibilidad del sistema de tratamiento.

Producto químico utilizado

Tratamiento Primario

Acido, Clorhídrico, sulfato de aluminio, floculante catiónico

Tratamiento Biológico

Bacterias específica pseudomonas, urea, fosfatos, melaza

Celdas Electroquímicas

Cátodo (Grafito interior y superior)

Ánodo (Titanio platinado)

3 DISCUSION DE RESULTADOS

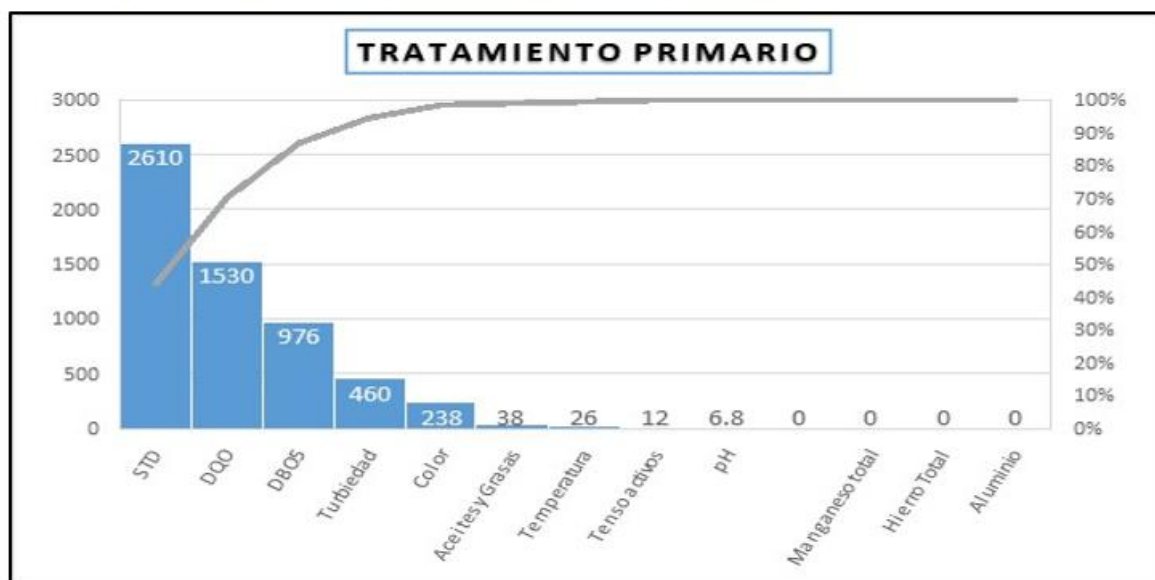
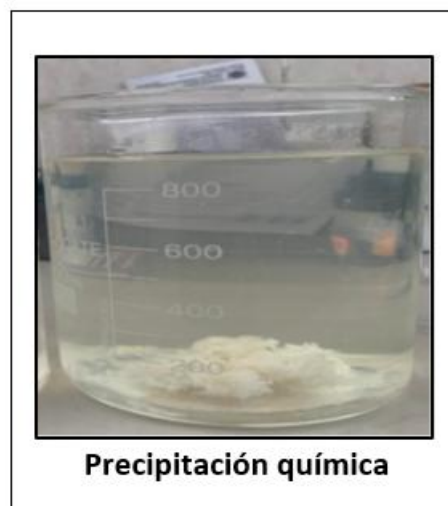
El tratamiento combinado podemos determinar:

Tratamiento Primario

En el tratamiento primario aplicando precipitación química se obtiene una remoción del 20 % DQO, DBO₅, Manganeseo, hierro y un 60 % en color, turbiedad, tensoactivos, aceites y grasas.

Tabla 1. Características del tratamiento primario.

Parámetros	Expresado como	Agua Cruda	Primario DAF	% de Remoción	Límite permisible
pH	pH	2,63	6,8	0	6 a 9
Temperatura	° C	26	26	0	Condición natural ± 3
STD	mg/l	2.45	2610	0	-
Color	Pt - Co	550	238	56,7	1/20 dilución
Turbiedad	NTU	900	460	48,8	
DQO	mg/l	2.115	1530	27,6	200
DBO ₅	mg/l	1.269	976	22,9	100
Aceites y Grasas	mg/l	100	38	62	30
Tenso activos	mg/l	80	12	85	0,5
Manganeseo total	mg/l	0,254	0,198	22,04	2
Hierro Total	mg/l	6,4	5,1	20,31	10
Aluminio	mg/l	0,246	0,267	0	5



Tratamiento Biológico.

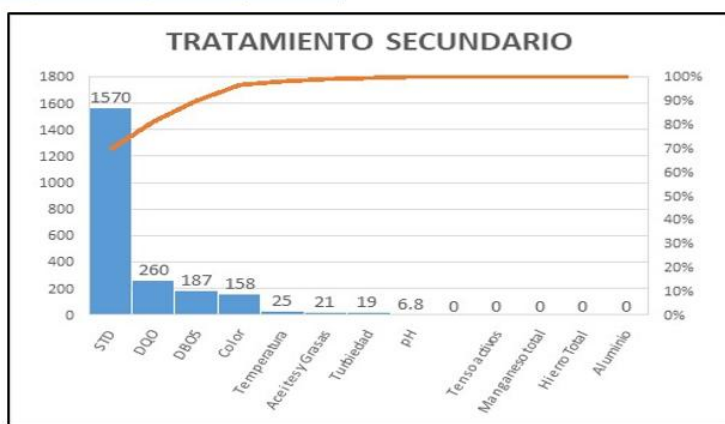
Mediante la creación de biomasa y aireación extendida 24/7 se obtuvo una remoción de 30 % color, turbiedad, manganeseo - 90 % DQO, DBO₅, aceites y grasas, tensoactivos, hierro.

Tabla 2. Características del Tratamiento biológico

Parámetros	Expresado como	Primario DAF	Secundario Biológico	% de Remoción	Límite permisible
pH	pH	6,8	6,8	0	6 a 9
Temperatura	° C	26	25	0	Condición natural ± 3
STD	mg/l	2610	1570	39,8	-
Color	Pt - Co	238	158	33,6	1/20 disolución
Turbiedad	NTU	460	19	95,8	
DQO	mg/l	1530	260	83	200
DBO ₅	mg/l	976	187	80,8	100
Aceites y Grasas	mg/l	38	21	87,5	30
Tenso activos	mg/l	12	1,5	82,3	0,5
Manganeso total	mg/l	0,198	0,118	40,4	2
Hierro Total	mg/l	5,1	0,16	96,8	10
Aluminio	mg/l	0,267	0,045	83,1	5



Tratamiento biológico

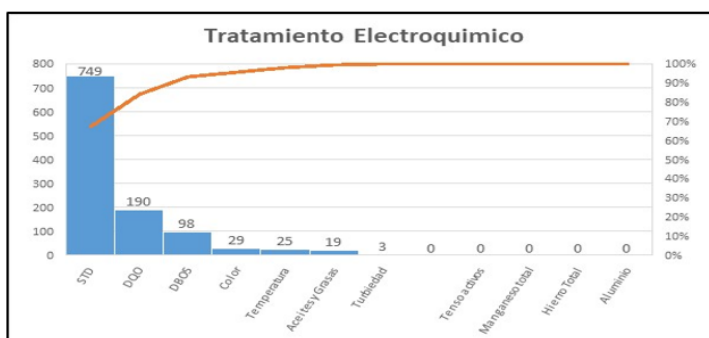


Tratamiento electroquímico

Con el tratamiento electroquímico se obtiene una remoción de materia orgánica como DQO, DBO₅, tensoactivos, aceites y grasas con este tratamiento final el agua residual tratada cumple la norma para la descarga al cuerpo de agua.

Tabla 3. Característica del tratamiento electroquímico

Parámetros	Expresado como	Secundario Biológico	Celdas Electroquímicas	% de Remoción	Límite permisible
pH	pH	6,8	6,49	0	6 a 9
Temperatura	° C	25	25	0	Condición natural ± 3
STD	mg/l	1570	749	52,29	-
Color	Pt - Co	158	29	81,6	1/20 disolución
Turbiedad	NTU	19	3	0,84	
DQO	mg/l	260	190	26,9	200
DBO ₅	mg/l	187	98	47,59	100
Aceites y Grasas	mg/l	21	5	76,1	30
Tenso activos	mg/l	1,5	0,43	71,33	0,5
Manganeso total	mg/l	0,118	0,105	8,125	2
Hierro Total	mg/l	0,16	0,10	37,5	10
Aluminio	mg/l	0,045	0,035	22,2	5



4 CONCLUSIONS

El tratamiento integral aplicado al efluente proveniente de la industria de galvanoplastia demostró ser eficiente para la reducción de contaminantes y tensos activos. La empresa genera un caudal promedio de $Q = 20 \text{ m}^3/\text{día}$, y mediante el proceso de flotación por aire disuelto (DAF) se logró una disminución significativa de aceites, grasas y tensos activos, además de una reducción aproximada del 10 % de la carga contaminante, expresada en términos de DQO y DBO₅. Este resultado coincide con estudios que destacan la efectividad del DAF como etapa previa al tratamiento biológico, al favorecer la remoción de sólidos y compuestos orgánicos ligeros.

En la fase biológica, la generación de biomasa activa enriquecida con enzimas, urea y fosfatos permitió compensar la carencia de sustrato típica de este tipo de efluentes. La acción de los microorganismos y del sulfuro de hidrógeno propició la precipitación de metales

pesados mediante la formación de compuestos sulfhídricos, además de facilitar la fragmentación de aceites, grasas y tensioactivos, mejorando la calidad del agua tratada.

Finalmente, la aplicación de celdas electroquímicas en la etapa final posibilitó la hidrólisis de los tensos activos, donde el hidrógeno generado produjo la ruptura molecular de estos compuestos. Los residuos fueron retenidos durante la filtración, y la cloración final eliminó los microorganismos patógenos, logrando que el efluente cumpla con los límites máximos permisibles de descarga establecidos en el Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Medio Ambiente (TULSMA).

Se concluye que la combinación de procesos fisicoquímicos, biológicos y electroquímicos constituye una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales industriales. Como una futura de investigación, se sugiere evaluar la optimización energética del proceso electroquímico y analizar el comportamiento del sistema en condiciones variables de caudal y carga contaminante, a fin de consolidar una metodología replicable a otras actividades productivas.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad de Guayaquil y a la empresa privada por su ayuda incondicional y darnos las facilidades para realizar esta investigación que contribuirá a mejorar los procesos de tratamiento para disminuir sus contaminantes y mejor la calidad de agua que se descarga a nuestros cuerpos de agua dulce al Ing. Alfredo Llopis por su experiencia profesional, Ing. Jenny Quinchuela por facilitarnos las muestras del agua residual del proceso productivo de la empresa.

REFERENCIAS

- [1] Alma Delia López, H. M.-A.-B.-C. (2016). Caracterización fisicoquímica del agua residual urbano-industrial y su importancia en la agricultura. Tecnología y Ciencias del Agua.
- [2] Beatriz, D. (2018). Diagnóstico del tratamiento del efluente de una empresa de galvanoplastia. Bogotá.
- [3] Calderón, R. (2021). Evaluación y mejora del sistema de tratamiento fisicoquímico de agua. Quito.
- [4] Chávez Huacanca, J. (2017). Descontaminación de las aguas residuales del proceso de cromado de una empresa de galvanoplastia mediante la electrocoagulación. Lima: Universidad César Vallejo.
- [5] Chávez Porras, Á., Cristancho Montenegro, D. L., & Ospina Granados, É. A. (2009). *Una alternativa limpia para el tratamiento de las aguas residuales galvánicas: revisión bibliográfica*. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 8 (15), 39–50.
- [6] Diana, F., & Viviana, Y. (2019). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. Bogotá.
- [7] Menéndez Gutiérrez, C., & Dueñas Moreno, J. (2018). *Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 39 (2), 97–107.
- [8] Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). *La industria de galvanoplastia*. Quito: Ministerio del Ambiente del Ecuador.
- [9] Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2018). Revisión del Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua. Quito.
- [10] Morillo Semanate, L. D., Naranjo Tovar, D. A., Pérez, J., Villacís Oñate, W. E., Vargas Jentzsch, P., & Muñoz Bisesti, F. (2019). *Remoción de tensioactivos y coliformes en aguas residuales domésticas mediante procesos Fenton*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 35 (4), 963–974.
- [11] Muñoz Peña, J. (2015). Eliminación de contaminantes parabenos en agua mediante procesos físicos, químicos y electroquímicos. Extremadura: Universidad de Extremadura.
- [12] TULSMA. (2015). Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA). Quito.