

# TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN ASOCIADAS AL PETRÓLEO APLICANDO TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS CON IONES METÁLICOS DE MAGNESIO

## TREATMENT OF PRODUCTION WATER ASSOCIATED WITH OIL APPLYING ELECTROCHEMICAL TECHNIQUES WITH MAGNESIUM METAL IONS

Luis Eduardo García Rodríguez<sup>1\*</sup>; Nilson de Jesús Marriaga Cabrales<sup>2</sup>; Javier Hernando Vargas Florez<sup>1</sup>; Bernardo Enrique Forero Duarte<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ecopetrol, Colombia.

<sup>2</sup>Grupo de Investigación en procesos de oxidación avanzada, Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

\*luigarcir@gmail.com

Recibido: 14 de febrero, 2023. Aprobado: 17 de abril, 2023. Versión final: 12 de diciembre, 2023

### Resumen

En este estudio, se usó la electrocoagulación del arreglo de electrodos magnesio-magnesio como ánodo y cátodo en la técnica electroquímica para el tratamiento de aguas de producción asociadas a un campo de petróleo en Colombia. El uso del material del magnesio en los electrodos es una alternativa diferente a los materiales usados normalmente y aplicados en la industria del petróleo, como lo son el material de hierro y el aluminio. La electrocoagulación como técnica electroquímica es una tecnología limpia y emergente que ha sido aplicado desde el siglo XXI. El proceso de electrocoagulación y electrodosificación de iones de magnesio se realizó con cambio de polaridad con y sin ajuste de pH, aplicando una densidad de corriente de 1 mA/cm<sup>2</sup> durante 25 minutos, encontrándose una disminución en la turbidez mayor al 80 %.

**Palabras Claves:** Agua de producción; Aguas residuales; Electrocoagulación; Electroquímica; Magnesio; Tratamiento de aguas; Petróleo; Electrólisis.

### Abstract

In this study, the electrocoagulation of the magnesium-magnesium electrode arrangement was used as anode and cathode in the electrochemical technique for the treatment of production water associated with an oil field in Colombia. The use of magnesium material in the electrodes is a different alternative to the materials normally used and applied in the oil industry, such as iron and aluminum. Electrocoagulation as an electrochemical technique is a clean and emerging technology that has been applied since the 21st century. The Magnesium ion electrocoagulation and electrodosification process was carried out with a change of polarity with and without pH adjustment, applying a current density of 1 mA/cm<sup>2</sup> for 25 minutes, finding a decrease in turbidity greater than 80%.

**Keywords:** Produced Water; Sewage water; Electrocoagulation; Electrochemical; Magnesium; Water Treatment; Petroleum; Electrolysis.

---

**Cómo citar:** García Rodríguez, L. E., Marriaga Cabrales, N. J., Vargas Florez, J. H., & Forero Duarte, B. E. (2024). Tratamiento de aguas de producción asociadas al petróleo aplicando técnicas electroquímicas con iones metálicos de magnesio. *Revista Fuentes, el reventón energético*, 22(1), 35-45. <https://doi.org/10.18273/revfue.v22n1-2024003>



## Introducción

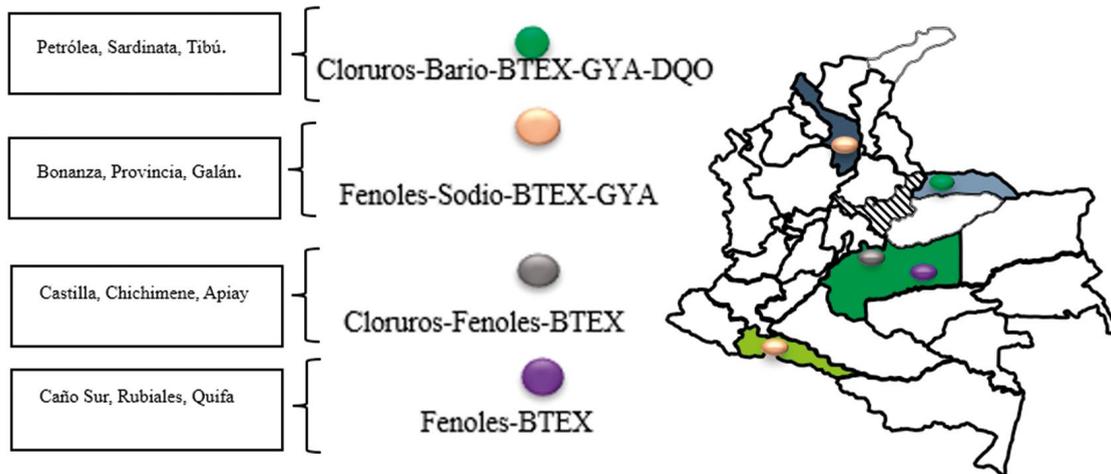
El agua producida es el mayor flujo de residuos generado en las industrias del petróleo y el gas. Estas aguas residuales son una mezcla de diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos. Su calidad, al igual que su cantidad, depende de su fuente. Puede variar significativamente dependiendo de la región, la geología de la formación, los tipos de fluidos involucrados, la operación y el manejo del yacimiento (Proaño, 2019).

En Colombia, los campos de petróleo producen grandes volúmenes de aguas de producción asociadas a sus operaciones. En el informe de desempeño ambiental 2016-2019 de la Asociación Colombiana del Petróleo

(ACP) afirma que se producen 13,08 barriles de agua por cada barril de petróleo producido.

García et al. (2023) afirman que el agua de formación hace parte de estas aguas residuales de producción y por lo general tienen una alta concentración de sales de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{3-}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$  y  $\text{Cl}^{-}$ .

Mesa et al. (2018) manifiestan que las aguas residuales de producción contienen contaminantes como grasas y aceites (GYA), cloruros, metales pesados, benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH<sub>2</sub>) y ácidos orgánicos y fenoles. En la Figura 1 se visualiza la ubicación de algunos contaminantes posibles encontrados en los campos colombianos.



**Figura 1.**

Contaminantes presentes posibles encontrados en aguas de producción de petróleo. García Rodríguez (2019). SPE Water Managment Seminar.

En la mayoría de los casos, un sistema de tratamiento de aguas de producción eficaz consta de diferentes de procesos unitarios individuales que se utilizan en serie para eliminar una amplia gama de contaminantes.

Dores et al. (2012), en el SPE Global Water Sustainability Center (Doha-Qtar), menciona que las tecnologías de filtración también pueden ayudar al tratamiento de las aguas de producción y su clasificación se estima según el tamaño de poro nominal de la membrana. La selección de cual tecnología de membrana usar (Microfiltración-MF, Ultrafiltración-UF, Nanofiltración-NF, Osmosis Inversa-OI) depende de la naturaleza de la aplicación, las características del agua a ser tratada, y la calidad del agua efluente requerida.

Drewes et al. (2009) define que las tecnologías de membranas denominadas Electrodiálisis y electrodiálisis inversa (ED/EI) son procesos de separación impulsados por cargas electroquímicas donde en los que los iones disueltos se separan del agua a través de membranas permeables a los iones bajo la influencia de un gradiente de potencial eléctrico.

Meijer & Kuijvenhoven (2001) exponen que una de las tecnologías disponibles con las mejores prácticas ambientales para la gestión del agua producida en las plataformas de petróleo y gas en alta mar (offshore) son las de Extracción de Polímero Macroporoso (MPPE), basadas en la extracción líquido-líquido en la que el líquido de extracción se inmoviliza en las partículas de polímero macroporosas.

Eyitayo et al. (2023) anuncian algunas tecnologías de tratamiento convencional como la sedimentación por gravedad, flotación por aire y filtración y métodos más novedosos como las fibras combinadas y membranas.

En general, en la Tabla 1 se visualizan las diferentes tecnologías aplicables para el tratamiento de aguas de producción de petróleo por etapas de tratamiento.

**Tabla 1.**  
Tecnologías aplicables al tratamiento de aguas de producción de petróleo.

Tratamiento Primario (Reducción de Aceite)	Tratamiento Secundario
<b>Separación por coalescencia</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Placas corrugadas (CPI's,</li> <li>• Lechos coalescentes)</li> <li>• Filtros coalescedores</li> </ul> <b>Separación por gravedad</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Skimming Tank</li> <li>• Gun Barrel</li> <li>• Sedimentación</li> </ul> <b>Separación por flotación</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Macroflotación</li> <li>• Flotación</li> <li>• Microflotación</li> <li>• Nanoflotación</li> </ul> <b>Incremento de gravedad</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Centrifugas</li> <li>• Ciclones</li> </ul>	<b>Separación por filtración</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtración con inertes (arenas, antracitas)- Filtración física. Para separación de sólidos e hidrocarburos.</li> <li>• Filtración por lechos absorbentes-vegetales (cascara de nuez, de palma) y poliméricos (teflón, polietileno)- filtración física y química (principalmente). Para separación de hidrocarburos.</li> <li>• Filtración por membranas (microfiltración, nanofiltración, ultrafiltración y osmosis inversa. En orden descendiente de tamaño de partícula). Para aguas libres de hidrocarburos. Se utiliza para separación de solidos suspendidos.</li> </ul>
	<b>Separación por membranas</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtros: son para un tratamiento específico (bario, metales, etc.) Se requiere agua libre de hidrocarburo y solidos</li> <li>• Lechos vegetales.</li> </ul>
	<b>Tratamiento Terciario</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Osmosis inversa (por membrana)</li> <li>• Evaporación (para cloruros)</li> <li>• Lechos de intercambio iónico</li> </ul>

Nota. Tomado de García Rodríguez (2014).

Los grandes volúmenes de agua de producción que se generan retan a la industria a seguir buscando alternativas para realizar el tratamiento y es así como las técnicas electroquímicas juegan un papel muy importante hoy en día. Dichas técnicas conciben un coagulante insitu que permite reducir la dosificación de reactivos y, en consecuencia, supone un importante ahorro en los costos mediante la oxidación anódica que por lo general son iones metálicos de aluminio y/o hierro (Verma, 2017).

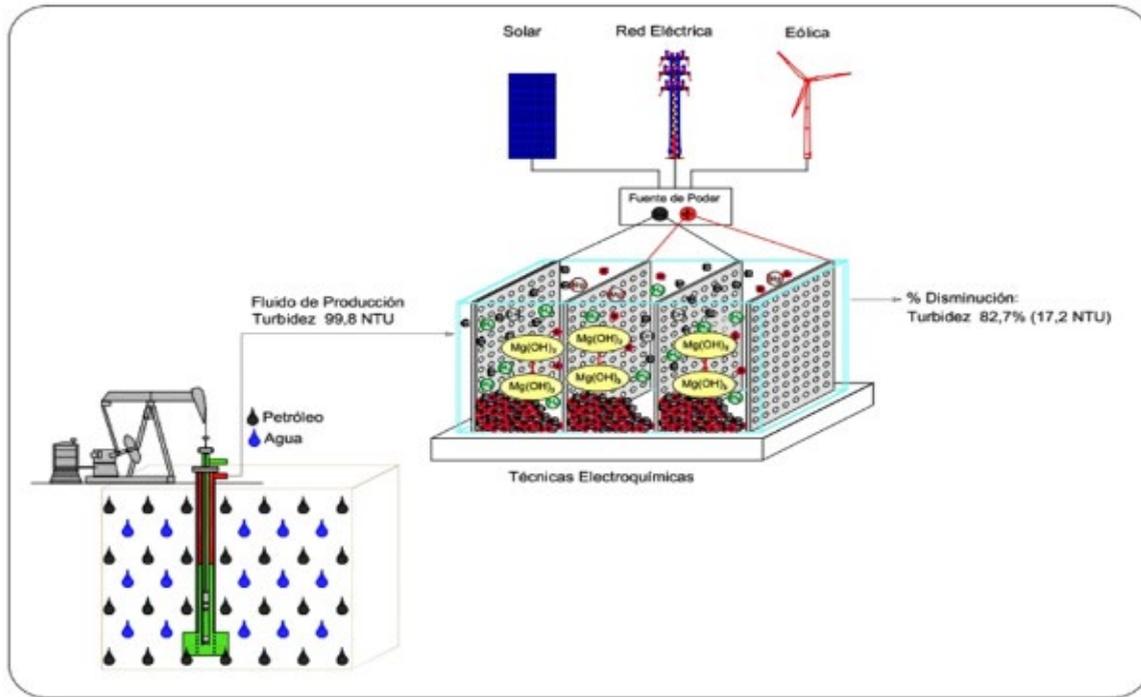
García Rodríguez (2023) considera que la electrocoagulación como parte de la técnica electroquímica es una tecnología limpia y emergente

que se puede acoplar fácilmente a la energía renovable generada por fuentes amigables al medio ambiente como la eólica y/o solar (Figura 2).

El uso de fuentes renovables permite incrementar la eficiencia energética y reducción de huella de carbono, además puede cerrar el ciclo del carbono a través de la reducción electroquímica del CO<sub>2</sub> y transformarlos en productos ó mezclas químicas de interés como el monóxido de carbono (CO), ácido fórmico (HCOOH), metanol (CH<sub>3</sub>OH), metano (CH<sub>4</sub>), etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) y etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH).

**Figura 2.**

La electroquímica acoplada a energías renovables.



Nota. Tomado y modificado por García Rodríguez (2023). Acipet-373.

Lo anterior contribuiría a enfrentar el reto de la mitigación del cambio climático, reduciendo la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera que ha aumentado 6 ppm en los últimos años hasta alcanzar un valor de 406,4 ppm, valor medido por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, 2017).

Las reacciones electroquímicas presentes en la electrocoagulación son la causa de las transformaciones químicas que sufren las sustancias cuando se trabaja en un proceso de electrólisis. En los últimos años ha aumentado el interés por la aplicación de la electrocoagulación en el tratamiento y depuración de aguas residuales industriales (García Rodríguez et al., 2023).

La electrocoagulación es eficaz para eliminar sólidos en suspensión, así como aceites y grasas (Xinhua y Xiangfeng, 2004). Elimina metales, sólidos y partículas coloidales y contaminantes inorgánicos solubles de medios acuosos mediante la introducción de especies de hidróxidos metálicos poliméricos altamente cargados. Estos compuestos neutralizan las cargas electrostáticas de los sólidos en suspensión y las gotas de aceite para facilitar la aglomeración o la coagulación (Bravo, 2017).

La técnica de electrocoagulación y electroflotación involucrada en la electroquímica ha sido aplicada con éxito en la industria del petróleo como se visualiza en la Tabla 2.

**Tabla 2.**  
Aplicaciones de técnicas electroquímicas en la industria del petróleo.

Autor/lugar	Descripción	logros
Wasewar, et al., 2007. India.	Electroflotación (EF) para la para el tratamiento de aguas residuales de petróleo (GYA 50 mg/L), usando electrodos perforados de aluminio.	Disminución de GYA 94,4%.
El-Nass, et al., 2009. Emiratos Árabes.	Electrocoagulación (EC) para el tratamiento de aguas residuales en refinerías de petróleo pesado. Sulfatos Iniciales 887 mg/L y COD de 596 mg/L, usando electrodos de aluminio, hierro y acero inoxidable.	Disminución de sulfatos 93% y COD 63%.
Moussavi et al. (2011). Irán.	EC, Electrocoagulación para el tratamiento de aguas contaminadas con petróleo. Hidrocarburos totales de petróleo (TPH) inicial 64 mg/L, usando electrodos de aluminio, hierro y acero inoxidable.	Disminución de TPH: 71,7 % y 95,1 %.
Younker et al. (2011). Canadá. Offshore.	Agua residual sintética que contenía una emulsión de petróleo crudo en una solución de salmuera.	Disminución de DQO con EC (56 %) bajo una dosis de 20,6 mg / L de hierro a pH 5 comparado con coagulación química (DQO) (62 %) a pH 8 a una dosis de FeCl3 de 80 mg / L.
García Rodríguez, 2014. Colombia. Onshore.	Técnicas electroquímicas aplicadas al agua producida en un campo de petróleo pesado través de electrodos ó placas de acero al carbón ASTM A36. Valor Inicial GYA 16,473 ppm.	Se logró disminuir la turbidez 97,2 %, color 98,7 % y grasas y aceites GYA 99,9 %.
Ghanem et al., 2015.	Aplicación de la tecnología de tratamiento electroquímico del agua producida en un campo de petróleo pesado, a través del electrodo de diamante dopado con Boro. GYA Inicial 5,909 mg/L, sólidos totales en suspensión (TSS) 288 mg / L y sólidos totales disueltos (TDS) 225 mg / L, DQO 1145 mg de O2 / L.	Se logró una tasa de eliminación de DQO del 97 % en 5 horas a 6,4 mA / cm2 en comparación con el 90 % a 9 mA / cm2 hasta 6,75 h.

Nota. Tomado de García Rodríguez, 2019. SPE Water Managment Seminar.

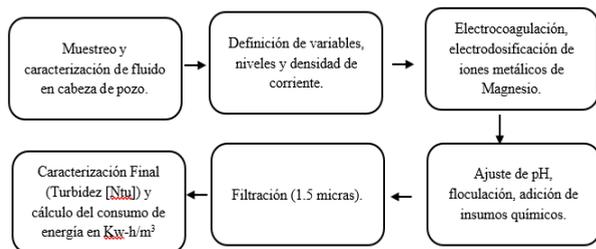
Por lo anterior, en este estudio se propone aplicar técnicas electroquímicas basada en los iones metálicos de Magnesio en vez de usar electrodos ó placas de otros materiales comúnmente usados (Fe y Al) y a su vez determinar el efecto en la disminución de la turbidez en las aguas de producción asociadas al petróleo. Cabe resaltar que, como etapa preliminar de tratamiento y un adicional de pulimento, facilitaría el reuso ó reutilización para el sector agrícola, favoreciendo la reducción del consumo de agua potable y gases de efecto invernadero (Garcia Rodríguez, L. E. & Gonzalez Guzman, L. G, 2022).

### Metodología, materiales e insumos

Esta metodología para el tratamiento de las aguas residuales asociados a petróleo consta de 6 (seis) etapas (Figura 3). A su vez en la Tabla 3, se visualizan los materiales, insumos y equipos.

**Figura 3.**

Etapas para la aplicación de la técnica electroquímica.



**Tabla 3.**

Equipos, materiales o insumos.

Equipos, Materiales o Insumos	Marca
Turbidímetro, rango 0-4000 NTU (unidades nefelométricas de turbidez)	Hach
Planchas de calentamiento.	Corning PC-420D
Multiparámetro digital para medición de pH, conductividad y temperatura.	Eijkelkamp
Una fuente de tensión CD Programable 200 Vatios (40voltios/5 Amperios).	Extech Instruments modelo 382280
Equipo de filtración en polisulfona 47mmx30 ml.	Mfs
Poliacrilamida aniónica, PAM - grado comercial. 0,1%.	Profloc 6040
Placas de Magnesio.	-
Electrodo de pH con conector BNC.	Eijkelkamp
Hexano HPLC-Hidróxido de potasio (KOH)- Ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) y/o Ácido Nítrico (HNO <sub>3</sub> ) -Peróxido de hidrógeno (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) - Cal viva (CaO).	
Tierra diatomácea 1 %.	Agenquímicos
Equipo soxhlet completo (condensador bolas x 250mm, parte central x 250 ml, balón x 500ml).	Agenquímicos
Espectrofotómetro visible Genesys 10 Vis	Thermo Scientific
Papel filtro 1.5 micras.	Whatman
Magneto.	Maser
Dedal de extracción Nro 84 celulosa 33*80 mm PK*25.	Mfs
Espectrofotómetro, Spectroquant Pharo 300, 190-1100 nm.	Merck

### Muestra de agua de producción

Las aguas residuales se generan a partir de diferentes fuentes, como en los yacimientos de petróleo (Fakhrul-Razi et al., 2009) y refinerías de petróleo (El-Naas et al., 2009). Las muestras para realizar estudios electroquímicos se toman por lo general en las corrientes de fluidos dentro de los procesos.

En este caso se trató de una muestra de agua cruda procedente de un campo de petróleo colombiano directamente de la cabeza del pozo. Se determinó una turbidez inicial de 99,8 NTU, medido en turbidímetro de rango entre 0 hasta 4000 NTU y 7,2 de pH medido con un equipo multiparamétrico comercial.

### Electrocoagulación con electrodos de magnesio

Se utilizó una fuente de poder Extech programable (Figura 4) para imponer el campo magnético y así provocar la reacción anódica de la oxidación de Magnesio y el desprendimiento de hidrógeno por la reacción catódica.

**Figura 4.**

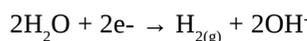
Fuente de poder



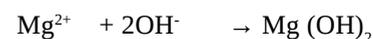
### Ánodo



### Cátodo



### Reacciones en la solución acuosa



A su vez en la Tabla 4, se visualizan los parámetros de la electrocoagulación.

**Tabla 4.**  
Parámetros de la electrocoagulación.

Parámetro	Valor
Densidad de corriente [mA/cm <sup>2</sup> ]	1
Temperatura [°C]	27
Volumen [L]	0,8
Área anódica [cm <sup>2</sup> ]	294
Corriente [A]	0,294
Tiempo [min]	25
Carga [C]	441
Carga eléctrica específica [C/L]	551,25

De acuerdo con la ley de Faraday, que rige el proceso de electrocoagulación, la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema (Rajeshwar et al., 1994).

Para la electrocoagulación se trabajó a densidad de corriente constante de 1 mA/cm<sup>2</sup> y se utilizaron 8 placas de magnesio, conectadas de forma monopolar paralela, separadas 0,5 cm. También se usó un inversor para alternar la polaridad con el fin de conseguir una limpieza en línea de los electrodos (Eyvaz et al., 2009) y una plancha de agitación magnética Corning PC-420D; como celda se utilizó un vaso de precipitado de un litro, según se muestra en la Figura 5.

**Figura 5.**  
Electrodosificación de magnesio.



La electrocoagulación de los electrodos se realizó variando la polaridad. El pH fue ajustado en la primera corrida con 10,3 mL de HNO<sub>3</sub> al 13 %, aproximadamente 1,674 ppm. Además, se monitoreó el voltaje, como se exhibe en las Tablas 5 y 6.

**Tabla 5.**  
Variación de voltajes con ajuste de pH.

Tiempo	Voltaje 1	Voltaje 2
0	0,985	1,326
5	0,563	1,223
10	0,4	1,107
15	0,325	0,638
20	0,315	0,416
25	0,162	0,368

**Tabla 6.**  
Variación de voltajes sin ajuste de pH.

Tiempo	Voltaje 1	Voltaje 2
0	0,669	1,401
5	0,424	1,232
10	0,638	1,339
15	0,799	1,566
20	0,785	1,412
25	0,649	1,493

Además, se determina el consumo de energía (E) a partir de la Ecuación (1) propuesta por García et al. (2023).

Donde U es el voltaje requerido (V), I la corriente aplicada (A), t el tiempo de electrocoagulación requerido (h) y V el volumen (m<sup>3</sup>).

$$E = \frac{U \times I \times t}{V \times 1000} \quad (1)$$

La cantidad de coagulante disuelto ó materia disuelta durante la generación de electrodisolución de cationes de magnesio se calculó teóricamente utilizando la ecuación 2 de la ley de Faraday (Adhoum & Monser, 2004; Mollah et al., 2004).

$$m = \frac{I \times t \times M}{Z \times F} \quad (2)$$

Donde m es la cantidad de material anódico disuelto (g), I la corriente (A), t el tiempo (s) de electrólisis, M el peso molecular específico g/mol z el número de electrones involucrados en la reacción, y F la constante de Faraday (96 ,485,34 As/mol).

## Resultados y Análisis

En los arreglos magnesio-magnesio se evidenció el aumento de voltaje, al cambio de polaridad debido a una capa de  $Mg(H)^2$  formada en el cátodo.

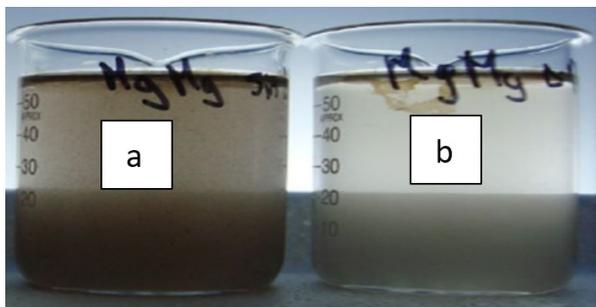
Los valores fueron de 0,054 Kwh/m<sup>3</sup> y 0,102 Kwh/m<sup>3</sup> para la electrocoagulación con ajuste de pH y sin ajuste de pH, se observó un beneficio por la reducción del consumo de energía por m<sup>3</sup> de agua electrodosificada con ajuste de pH, valor que se puede usar para diseñar una planta piloto.

El sistema con las placas de magnesio-magnesio con ajuste de pH fue relevante para disminuir el consumo energético en un 50%, comparado con el sistema sin ajuste de pH.

En este estudio el valor de la cantidad de material anódico disuelto ó coagulante in situ formado por electrodisolución (m) fue de 55,5 mg. Este valor es importante para el diseño y escalamiento electroquímico de equipos industriales en el futuro en donde se requiera realizar un tratamiento de mayor volumen.

En la Figura 6, se evidencia la apariencia de las muestras después de la electrocoagulación, encontrándose en la muestra sin ajuste de pH (a) una apariencia más oscura llegando a un valor de pH de 9,4. Mientras que en la muestra b con ajuste de pH se redujo hasta 3,8.

**Figura 6.**  
Apariencia del agua electrodosificada



La electrólisis genera un desprendimiento de burbujas en el cátodo favoreciendo la electroflotación que arrastra una parte de contaminantes a la superficie del agua tratada, en donde pueden ser removidos con mayor facilidad.

Los electrodos de magnesio después de la electrocoagulación (Figura 7) muestran un cambio de apariencia producto de la oxidación.

**Figura 7.**  
Electrodos después de la electrocoagulación.



Las especies formadas de magnesio pasan a la solución y forman agregados moleculares con moléculas de agua, que por efectos de la variación del pH neutralizan la carga del catión y forman hidróxidos de magnesio, que finalmente provocan el crecimiento de los coágulos y posterior aparición de flóculos (Figura 8).

**Figura 8.**  
Flóculos de magnesio y posibles contaminantes atrapados.



Los resultados de los parámetros evaluados en este tratamiento químico se muestran en la Tabla 7.

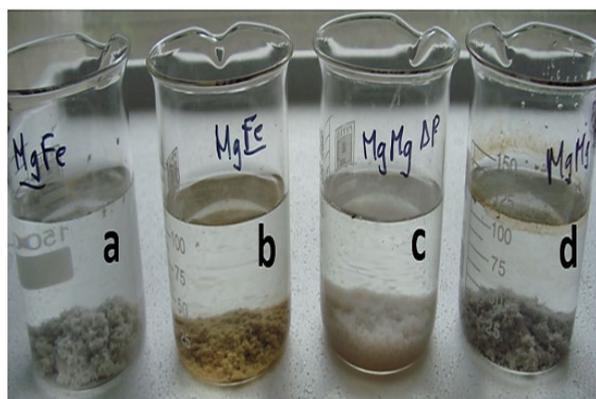
En la Figura 9, se observan sedimentaciones (a, b, c y d) de las cuales c y d forman parte de este estudio con solo Mg, sin embargo, las sedimentaciones a y b corresponden al uso combinado de electrodos de Mg y Fe para el tratamiento electroquímico en aguas de producción de petróleo y cuyos resultados no hacen parte de este estudio.

**Tabla 7.**  
Tratamiento químico

Variable – Parámetro	Muestra cruda	Mg-Mg con ajuste de pH	Mg-Mg sin ajuste de pH
pH inicial	7,2	2,4	9,4
pH 0		11,5	11,6
pH 20		11,4	11,5
PAM, ppm		5,5	5,5
Turbidez	99,8	17,2	18,7
% Disminución		82,76	81,26

El porcentaje de disminución de turbidez con ajuste de pH favoreció la electrodisolución y el tratamiento del agua de producción ya que en este caso el porcentaje de disminución fué superior al 1% respecto a la solución sin ajuste de pH (81,26 %).

**Figura 9.**  
Muestras sedimentadas.



## Conclusiones

La cantidad de coagulante in situ formado por electrodisolución fue de 55,5 mg, este valor fue suficiente para tratar con éxito 0,8 litros de agua de producción.

Los miligramos obtenidos de coagulante son importantes para el diseño de futuros equipos industriales basados en técnicas electroquímicas que requieran tratar un mayor volumen de agua de producción.

La técnica de electrodisolución de los iones metálicos de magnesio para el tratamiento de aguas de producción de petróleo mostró resultados positivos en la disminución de la turbidez.

Al respecto se alcanzó una reducción de 82,76% para el sistema magnesio-magnesio con ajuste de pH y un 81,26% sin ajuste de pH, obteniendo un agua tratada traslúcida.

El ajuste del pH en la electrodisolución fue relevante debido a su incremento en el porcentaje de disminución de la turbidez mayor al 1% comparado con la muestra de agua de producción sin ajuste de pH.

## Referencias

- Adhoum, N., & Monser, L. (2004). Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(10), 1281–1287. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2003.12.001>
- Bravo Gallardo, M. A. (2017). Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, solidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales [Tesis de grado, Universidad Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional – Universidad Francisco José de Caldas.
- Meijer, D., & Kuijvenhoven, C. (2001). Field-Proven Removal of Dissolved Hydrocarbons from Offshore Produced Water by the Macro Porous Polymer-Extraction Technology. *All Days*. <https://doi.org/10.4043/13217-ms>
- D.Th. Meijer; C.A.T. Kuijvenhoven.,(2001). FieldProven Removal of Dissolved Hydrocarbons from Offshore Produced Water by the Macro Porous PolymerExtraction Technology. Offshore Technology Conference.OTC-13217- MS,Houston. Texas.<https://doi.org/10.4043/13217-MS>.
- Dores, R., Hussain, A., Katebah, M., Adham, S., (2012). Using advanced water treatment technologies to treat produced water from the petroleum industry. International Production and Operations Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers (SPE). Doha,Qatar. <https://doi.org/10.2118/157108-MS>
- Drewes, J., Cath, T., Xu, P., & Graydon, J. (2009). An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. Technical Assessment of Produced Water Treatment Technologies. RPSEA Project 07122-12. Colorado School of Mines. November, 8–128.

- El-Naas, M. H., Al-Zuhair, S., Al-Lobaney, A. & Makhlof, S. (2009). Assessment of electrocoagulation for the treatment of petroleum refinery wastewater. *Journal of environmental management*, 91(1), 180-185. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.08.003>
- Eyitayo, S. I., Watson, M. C., Kolawole, O., Xu, P., Bruant, R., & Henthorne, L. (2022). Produced Water Treatment: Review of Technological Advancement in Hydrocarbon Recovery Processes, Well Stimulation, and Permanent Disposal Wells. *SPE Production & Operations*, 38(01), 51-62. <https://doi.org/10.2118/212275-pa>
- Eyvaz, M. (2016). Treatment of Brewery Wastewater with Electrocoagulation: Improving the Process Performance by Using Alternating Pulse Current. *International Journal Of Electrochemical Science*, 11(6), 4988-5008. <https://doi.org/10.20964/2016.06.11>
- Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L. C., Biak, D. R. A., Madaeni, S. S., & Abidin, Z. Z. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2-3), 530–551. [doi:10.1016/j.jhazmat.2009.05.044](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.044)
- García, L. E., Camargo, R. J., Marriaga, N. & Machuca, F. (2023). Tecnología emergente para el tratamiento de agua residual industrial asociada a la producción de petróleo pesado en un campo colombiano aplicando técnicas electroquímicas. ACIPET. Obtenido de <https://congresoacipet.com/wpcontent/uploads/2023/09/TEC-373.pdf>
- García Rodríguez, L. E. & Gonzalez Guzman, L. G. (2022). Uso de la tecnología convencional para la reducción de agua de consumo y gases de efecto invernadero a través de la recirculación del agua residual no doméstica: Piloto Industrial en Colombia. Economía Circular. *Revista Fuentes, el reventón energético*, 20(2), 75-90. <https://doi.org/10.18273/revfue.v20n2-2022007>
- García Rodríguez, L. E. (2019). Aplicación de una técnica electroquímica para tratamiento de aguas de producción asociadas a yacimiento de petróleo pesado. Society of petroleum engineers (SPE). Water Management.
- García Rodríguez, L. (2014). Aplicación de un proceso electroquímico para el tratamiento de aguas residuales de producción asociadas a yacimientos de petróleo liviano y pesado [Tesis de Maestría, Universidad del Valle].
- Ghanem, H., Rosiwal, S., Göltz, M., & Espin, D. (2016). Application of Electrochemical Treatment Technology of Produced Water of a Heavy Oil Field, via Boron Doped Diamond BDD Electrode. SPE Latin America and Caribbean Heavy and Extra Heavy Oil Conference. <https://doi.org/10.2118/181178-MS>
- Bande, R., Prasad, B., Mishra, I., & Wasewar, K. (2008). Oil field effluent water treatment for safe disposal by electroflotation. *Chemical Engineering Journal*, 137(3), 503–509. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.05.003>
- Moussavi, G., Khosravi, R., & Farzadkia, M. (2011). Removal of petroleum hydrocarbons from contaminated groundwater using an electrocoagulation process: Batch and continuous experiments. *Desalination*, 278(1-3), 288-294. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.05.039>
- Mesa, S. L., Orjuela, J. M., Ortega, A. T., & Sandoval, J. A. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 87–98.
- Mollah, M. A., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocks, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC) — science and applications. *Journal Of Hazardous Materials*, 84(1), 29-41. [https://doi.org/10.1016/s0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/s0304-3894(01)00176-5)
- Proaño López, W. (2019). El agua en el sector de petróleo y petroquímica: Usos y tratamientos [Tesis de Maestría, Universidad de Alcalá]. Biblioteca Digital Universidad de Alcalá.
- Rajeshwar, K. I. J. G., Ibanez, J. G., & Swain, G. M. (1994). Electrochemistry and the environment. *Journal of applied electrochemistry*, 24(11), 1077–1091. <https://doi.org/10.1007/BF00241305>
- Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA). USA. <https://www.usa.gov/es/agencias/oficina-nacional-deadministracion-oceanica-y-atmosferica>.

- Verma, A. K. (2017). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation employing Fe-Al composite electrode. *Journal Of Water Process Engineering*, 20, 168-172. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.11.001>
- Xu, X., & Zhu, X. (2004). Treatment of refractory oily wastewater by electro-coagulation process. *Chemosphere*, 56(10), 889-894. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.05.003>
- Yunker, J., Lee, S. Y., Gagnon, G., & Walsh, M. E. (2011). Atlantic Canada Offshore R&D: Treatment of Oilfield Produced Water by Chemical Coagulation and Electrocoagulation. Offshore Technology Conference. doi:10.4043/22003-MS.