

## ¿Cómo se usa la electricidad para limpiar el agua?

*How is electricity used to clean water?*

Salas-García, J.<sup>1\*</sup> , Portillo-Rodríguez, O.<sup>1</sup> , Martínez Mendez, R.<sup>1</sup> 

### Historial del artículo

Recibido: 16-may-2025

Aceptado: 10-jul-2025

Disponible en línea: 30-agosto-2025

### Palabras clave

*ES:* Electrocoagulación, Electroflotación, Tratamiento de agua, Electrólisis, Contaminantes

*EN:* Electrocoagulation, Electroflo-tation, Water treatment, Electrolysis, Contaminants

### RESUMEN

El agua contaminada afecta la salud y el ambiente de millones de personas. Los métodos tradicionales de tratamiento dependen de agregar sustancias químicas como coagulantes para separar la suciedad del agua. Sin embargo, estos métodos aumentan los costos operativos y generan lodos que pueden ser peligrosos. Este artículo presenta la electrocoagulación y electroflotación como alternativa basada en electricidad. Estas técnicas usan corriente eléctrica entre placas metálicas para generar los agentes necesarios para retirar contaminantes. Se forman iones que juntan partículas pequeñas y burbujas de gas que hacen flotar los contaminantes hacia la superficie. Los beneficios incluyen reducción del uso de químicos, menor generación de lodos y adaptabilidad a distintos contaminantes. Estas tecnologías tienen potencial para combinarse con energía renovable y aplicarse en comunidades con menos infraestructura.

### ABSTRACT

Contaminated water affects the health and environment of millions of people. Traditional treatment methods depend on adding chemical substances such as coagulants to separate dirt from water. However, these methods increase operating costs and generate sludge that can be hazardous. This article presents electrocoagulation and electroflotation as an electricity-based alternative. These techniques use electric current between metallic plates to generate the agents needed to remove contaminants. Ions form that gather small particles and gas bubbles that make contaminants float to the surface. Benefits include reduction of chemical use, less sludge generation, and adaptability to different contaminants. These technologies have potential to be combined with renewable energy and applied in communities with less infrastructure.

## ¿Por qué es importante este tema?

Millones de litros de agua sucia se producen diariamente en casas, fábricas y hospitales. Esta agua contiene partículas pequeñas, aceites, grasas, metales y otros contaminantes que requieren

### Afiliaciones:

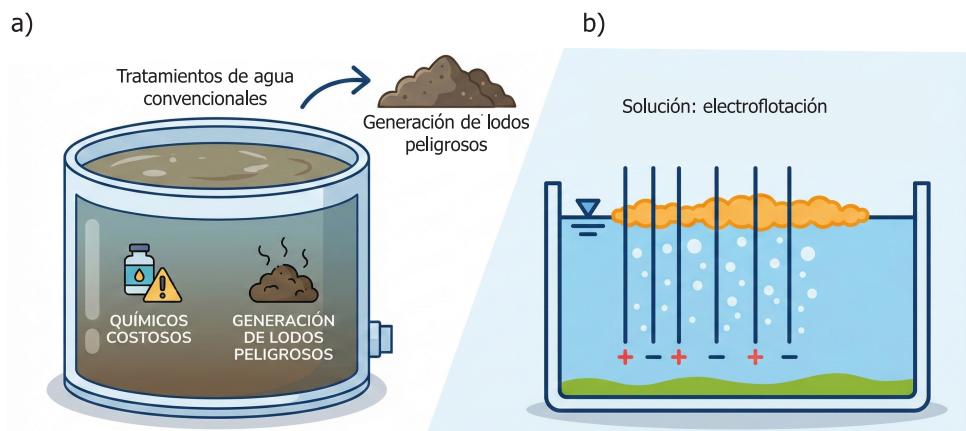
<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México. Paseo Universidad S/N, Toluca, Estado de México. CP. 50000. México.

Correos: [proyectos@javiersalasg.com](mailto:proyectos@javiersalasg.com); [oportillor@uaemex.mx](mailto:oportillor@uaemex.mx); [rmartinezme@uaemex.mx](mailto:rmartinezme@uaemex.mx)

\* Autor de correspondencia: [proyectos@javiersalasg.com](mailto:proyectos@javiersalasg.com)

tratamiento especializado. Los métodos tradicionales añaden sustancias químicas que funcionan como pegamento para unir partículas pequeñas en grupos grandes que se pueden separar.

La pregunta natural es: ¿hay forma de limpiar el agua sin depender tanto de químicos externos? La respuesta está en usar electricidad para generar los agentes necesarios directamente en el lugar de tratamiento. La Figura 1 muestra la diferencia entre métodos tradicionales y electroflotación. En tratamientos convencionales se agregan químicos que aumentan costos y generan lodos peligrosos. La electroflotación usa electrodos que pasan corriente para formar burbujas que pegan partículas contaminantes y las hacen subir hacia la superficie.



**Figura 1:** Comparación entre tratamientos convencionales con adición de químicos (a) y electroflotación con generación de burbujas mediante electrodos (b).

## ¿Qué sabíamos antes?

El tratamiento de agua usando coagulación tiene más de cien años de historia. Los primeros sistemas usaban sales de metal como sulfato de aluminio. Cuando se disuelven en agua, liberan iones positivos que neutralizan las cargas negativas de partículas sucias, permitiendo que se junten en flóculos. Durante el siglo veinte se crearon polímeros sintéticos más eficientes, pero el principio no cambió: agregar químicos al agua. Las limitaciones se hicieron claras cuando creció la escala de tratamiento. El costo de químicos representa parte importante del costo total, y la generación de lodos con mucho contenido químico se volvió problemática.

El cambio llegó cuando se observó que pasar corriente eléctrica entre electrodos de metal sumergidos generaba efectos parecidos a la adición de coagulantes químicos. Los estudios modernos se han enfocado en mejorar parámetros como densidad de corriente, tiempo de tratamiento y material de electrodos para aumentar la remoción de contaminantes [1].

## ¿Cómo funciona la nueva propuesta?

La electrocoagulación genera iones coagulantes por disolución electroquímica de electrodos metálicos. ¿Y eso qué significa? Significa que, al pasar corriente eléctrica por las placas de metal

que están dentro del agua, una de esas placas libera pequeñas “partes” del metal en forma de iones (son partículas diminutas con carga eléctrica). Esos iones funcionan como un ayudante que hace que la suciedad deje de estar dispersa: se pegan a las partículas contaminantes y ayudan a que se junten en grumos más grandes. Cuando la suciedad está en grumos, es mucho más fácil separarla del agua, ya sea porque flota con burbujas o porque se puede retirar como lodo.

En la práctica, ambos procesos ocurren simultáneamente en un reactor cuando se pasa corriente entre electrodos sumergidos.

La Figura 2 muestra un montaje experimental. El sistema usa placas de metal paralelas dentro del agua. Las placas externas se conectan a la fuente de corriente: una como ánodo (polo positivo) y otra como cátodo (polo negativo). Las placas que están en medio también reciben el efecto de la corriente porque el agua deja pasar electricidad. Por eso, aunque no estén conectadas con cables, una cara de la placa se comporta como positivo y la otra como negativo, y así funcionan como electrodos “por ambos lados”. Las conexiones eléctricas se hacen únicamente en los extremos, mientras que placas intermedias trabajan como electrodos bipolares. Se observa formación de capa flotante con contaminantes en la superficie y sedimento en el fondo.

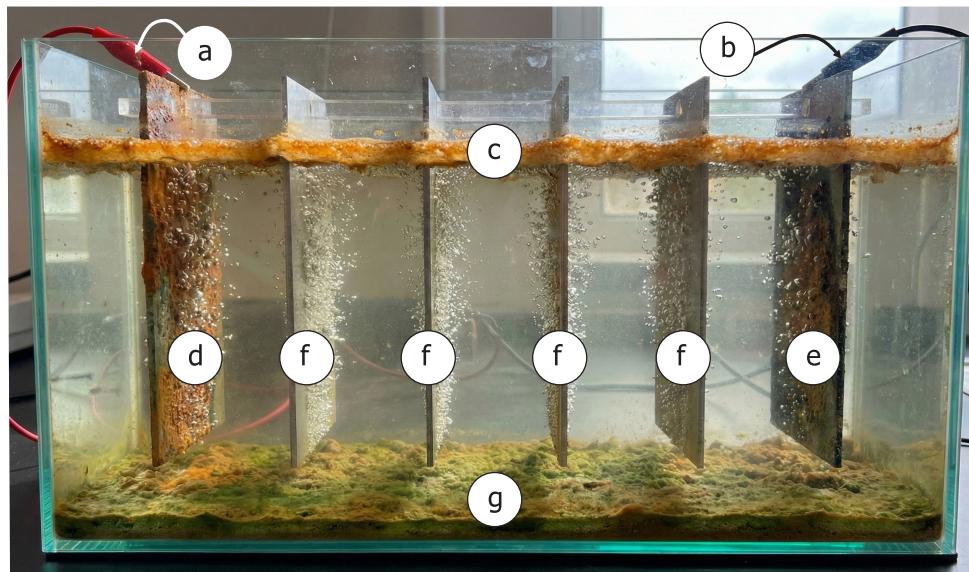
Si cada placa tiene su propio cable (o queda conectada con puentes), entonces la polaridad es simple: toda la placa queda positiva (ánodo) o toda la placa queda negativa (cátodo). Por eso se dice que las placas están con polaridad “fija”, definida por el cableado. En ese caso, es normal ver una placa “toda +” y la de al lado “toda -”, alternadas.

Pero si, como en la Figura 2, solo se conectan las placas de los extremos y las placas de en medio no llevan cable, entonces esas placas intermedias no quedan “todas +” o “todas -”. Aunque no estén conectadas, sí sienten el voltaje porque el agua conduce electricidad. Entonces ocurre lo siguiente: en una placa intermedia, la cara que queda mirando hacia el lado negativo se comporta como positiva, y la cara que queda mirando hacia el lado positivo se comporta como negativa. Es decir, una misma placa trabaja con dos comportamientos a la vez, uno en cada cara.

A eso se le llama electrodo bipolar: no se habla de una placa completamente positiva o negativa, sino de polaridad por cara. En cambio, en la Figura 2, las placas conectadas directamente a la fuente (las señaladas como (d) y (e)) sí tienen polaridad definida por el cable: una queda como ánodo y la otra como cátodo.

Ahora presta atención a la Figura 2 (f), ahí se puede ver parte del contaminante en el fondo. ¿Cómo llegó ahí si al principio del experimento todos los contaminantes estaban flotando?. Bueno, en primer lugar, no todos los contaminantes flotan si se deja sin agitar el agua un tiempo, es decir, se sedimentan, pero hay otros que solo hasta que se les aplica electricidad se acumulan en el fondo como se muestra en la Figura 3. El agua clarificada queda en la zona media del reactor, entre la capa flotante superficial y el sedimento del fondo. Comparado con métodos convencionales, la electrocoagulación ofrece varias ventajas: no necesita almacenamiento de químicos peligrosos, genera menos lodo, los lodos son más compactos, el sistema es compacto y puede operarse automáticamente. Además es versátil y se adapta a diferentes contaminantes ajustando el voltaje que se aplica, el tiempo que se aplica la electricidad, la distancia entre las placas, etcétera [2].

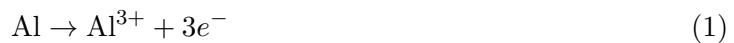
Para entender lo que ocurre en la Figura 3, conviene revisar qué reacciones se activan cuando



**Figura 2:** Montaje experimental mostrando conexiones eléctricas en los extremos (a,b), capa flotante de contaminantes (c), electrodos monopolares (d,e), electrodos bipolares (f) y sedimento en el fondo (g).

se hace pasar corriente entre las placas. En forma simple, una placa es el sitio donde el metal se “desprende” hacia el agua y la otra es el sitio donde el agua produce burbujas. Con eso se explica por qué, al mismo tiempo, se generan especies que ayudan a juntar la suciedad y también burbujas que ayudan a separarla por flotación.

En el ánodo (la placa que va perdiendo metal), el aluminio del electrodo pasa al agua como iones de aluminio. Este paso puede escribirse como:



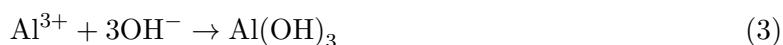
Esta ecuación indica que el aluminio sólido se transforma en  $\text{Al}^{3+}$  y libera electrones ( $e^-$ ) al circuito. Lo importante es que esos iones  $\text{Al}^{3+}$  son el origen del coagulante que se forma dentro del mismo reactor, y por eso facilitan que partículas muy finas de contaminante dejen de estar dispersas y empiecen a juntarse.

En el cátodo (la placa opuesta), el agua recibe electrones y se forman gas hidrógeno e iones hidroxilo. La reacción típica es:



Aquí,  $\text{H}_2$  aparece en forma de burbujas, que pueden adherirse a los grumos (flóculos) y ayudarles a subir. Al mismo tiempo, los  $\text{OH}^-$  hacen que la zona cercana al cátodo se vuelva más básica, lo que favorece que el aluminio liberado no permanezca como ion por mucho tiempo.

Por eso, dentro del agua, los iones de aluminio reaccionan con los iones hidroxilo y forman hidróxido de aluminio:

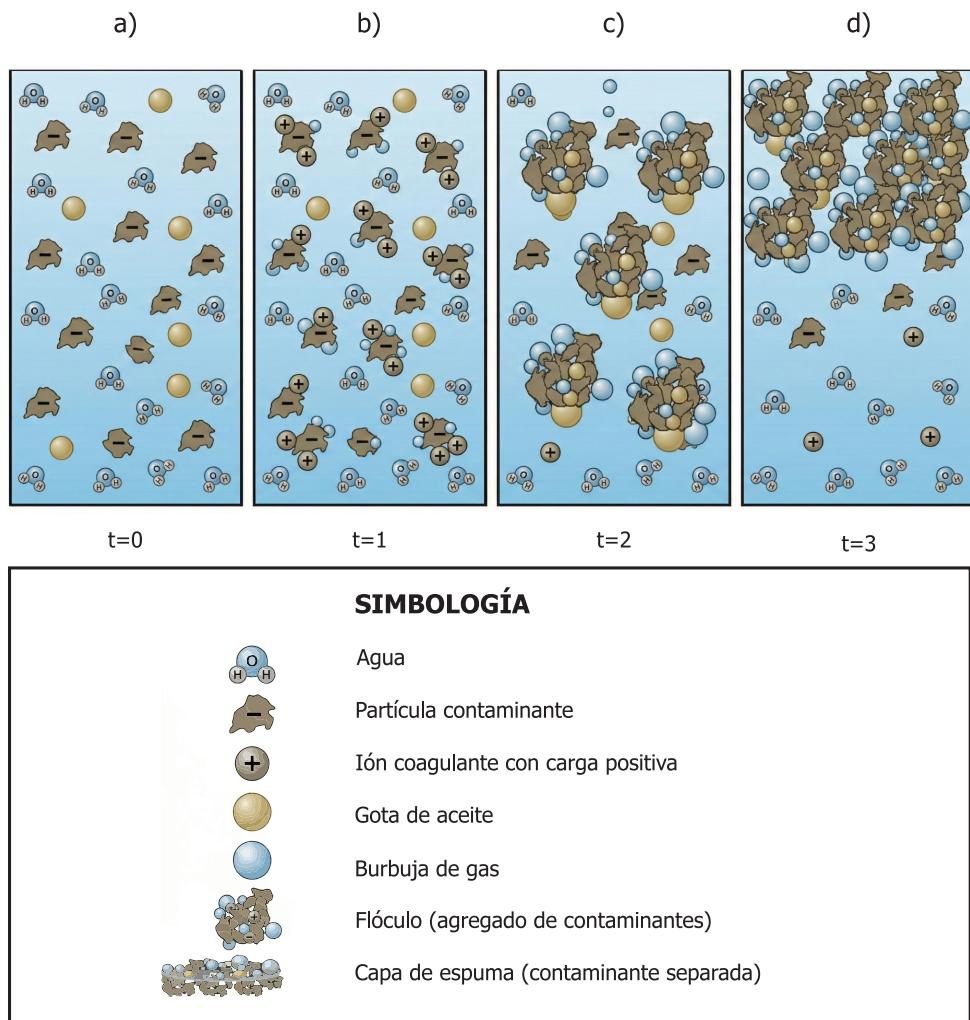


El  $\text{Al}(\text{OH})_3$  puede entenderse como un material gelatinoso muy fino que se forma en el líquido. Ese material ayuda a atrapar partículas suspendidas y gotas de aceite, de modo que se formen flóculos más grandes. Una vez que existen esos flóculos, las burbujas de  $\text{H}_2$  producidas en el cátodo pueden pegarse a ellos, disminuir su densidad aparente y favorecer su ascenso, lo que se refleja en la acumulación de espuma superficial observada al final de la secuencia en la Figura 3.

Con eso se entiende lo que muestra la Figura 3. La figura se lee de izquierda a derecha, como si fuera una secuencia de lo que va pasando con el agua al encender el equipo. Al inicio ( $t=0$ ), la suciedad está en partículas muy pequeñas y también hay gotitas de aceite. Como son tan finas, no se van al fondo rápido ni flotan por sí solas; se quedan repartidas en el agua y por eso el líquido se ve turbio. Cuando se aplica electricidad ( $t=1$ ), en el agua aparecen iones positivos que ayudan a cambiar ese comportamiento. Esos iones se acercan a las partículas y hacen que ya no se mantengan separadas, de modo que empiezan a pegarse unas con otras. En ese momento todavía son pequeñas, pero ya se está formando el primer agrupamiento. Después ( $t=2$ ), esos grupos crecen y se vuelven flóculos, que son como grumos visibles o casi visibles. Al mismo tiempo, se forman burbujas de gas en las placas. Muchas burbujas se pegan a los flóculos y les dan “empuje” hacia arriba, como si les pusieran pequeños flotadores. Finalmente ( $t=3$ ), con más burbujas pegadas, los flóculos suben y se acumulan en la superficie formando una capa de espuma. Esa espuma concentra buena parte de lo que se quiere quitar, por lo que puede retirarse con una espátula, una malla o un sistema de desnatado, y el agua que queda en medio se observa más clara.

## Casos prácticos y aplicaciones

La electrocoagulación se ha aplicado exitosamente en diversos sectores. En la industria de alimentos trata aguas con grasas, aceites y materia orgánica. Los mataderos generan aguas con sangre, grasas y proteínas que se pueden quitar eficientemente [3]. En la industria textil, las aguas residuales contienen colorantes difíciles de remover. La electrocoagulación muestra capacidad para quitar colorantes con eficiencias superiores al noventa por ciento en treinta a sesenta minutos [4]. La industria de galvanoplastia genera aguas con metales pesados como cromo, níquel y cobre. La electrocoagulación precipita estos metales como hidróxidos insolubles. El lodo concentrado puede tener valor de recuperación [5]. Los beneficios reportados incluyen remociones de turbidez superiores al noventa y cinco por ciento, reducción de demanda química de oxígeno entre sesenta y noventa por ciento. Los consumos de energía varían entre uno y diez kilovatios·hora por metro cúbico, competitivos con costos de químicos en plantas convencionales [6], [7], [8].



**Figura 3:** Secuencia temporal del mecanismo de electrocoagulación y electroflotación: en (a)  $t=0$  se observa la dispersión inicial de partículas contaminantes y gotas de aceite en el agua; en (b)  $t=1$  aparecen los iones coagulantes positivos que favorecen que las partículas se junten; en (c)  $t=2$  se forman flóculos (grumos) y se adhieren burbujas de gas a estos agregados; y en (d)  $t=3$  los flóculos con burbujas ascienden y se acumulan en la superficie como una capa separable.

## ¿Qué significa esto para ti?

El desarrollo de estas tecnologías tiene impactos más allá de lo que se puede hacer en la industria. El acceso a agua limpia es indispensable para la salud. Estas tecnologías permiten que comunidades pequeñas traten su propia agua sin infraestructura compleja. Un sistema puede operarse con energía solar en zonas rurales. La reducción de químicos disminuye la exposición de operadores a sustancias peligrosas. Los sistemas electroquímicos eliminan riesgos de inhalación, contacto con piel y derrames, creando ambientes más seguros.

Desde el punto de vista social, la descentralización del tratamiento es posible con sistemas modulares en escuelas, hospitales o comunidades pequeñas. Las oportunidades profesionales crecen en áreas que combinan electroquímica, ingeniería de procesos y ciencias ambientales.

Sin embargo, hay consideraciones importantes. El consumo eléctrico es un factor económico. En zonas donde la electricidad es cara o no renovable, el balance ambiental puede no ser favorable. El mantenimiento de electrodos que se consumen periódicamente afecta la economía del proceso. Los lodos generados necesitan caracterización y disposición adecuadas.

## El futuro que nos espera

La investigación actual se enfoca en varios frentes. Se desarrollan nuevos materiales para electrodos, como titanio cubierto con óxidos metálicos que tienen mayor durabilidad [9].

Otra línea busca reducir consumo de energía usando corriente pulsada en lugar de continua. Los resultados sugieren ahorros de energía entre veinte y cuarenta por ciento [10].

A corto plazo se espera comercialización de sistemas compactos modulares con paneles solares, baterías y reactores integrados para comunidades pequeñas. A largo plazo, la integración con otras tecnologías permitiría degradar contaminantes orgánicos persistentes y producir agua potable directamente.

La convergencia con tecnologías de información abre posibilidades interesantes. Sensores pueden alimentar algoritmos de control que ajusten automáticamente la corriente aplicada. Un área emergente es la recuperación de recursos valiosos de los contaminantes.

Los obstáculos incluyen estandarización de diseño y mayor evidencia de desempeño a largo plazo. El escalamiento industrial presenta desafíos técnicos en distribución de corriente y manejo de grandes volúmenes, pero los avances sugieren que se pueden superar.

## Referencias

- [1] S. Boinpally, A. Kolla, J. Kainthola, R. Kodali y J. Vemuri, “A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment”, *Water Cycle*, vol. 4, págs. 26-36, 2023. DOI: [10.1016/j.watcyc.2023.01.001](https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001)

- [2] D. T. Moussa, M. H. El-Naas, M. Nasser y M. J. Al-Marri, “A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges”, *Journal of Environmental Management*, vol. 186, págs. 24-41, 2017. DOI: [10.1016/j.jenvman.2016.10.032](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.032)
- [3] M. Asselin, P. Drogui, H. Benmoussa y J.-F. Blais, “Effectiveness of electrocoagulation process in removing organic compounds from slaughterhouse wastewater using monopolar and bipolar electrolytic cells”, *Chemosphere*, vol. 72, n.º 11, págs. 1727-1733, 2008. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2008.04.067](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.067)
- [4] B. K. Korbahti, K. Artut, C. Gecgel y A. Ozer, “Electrochemical decolorization of textile dyes and removal of metal ions from textile dye and metal ion binary mixtures”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 173, n.º 3, págs. 677-688, 2011. DOI: [10.1016/j.cej.2011.02.018](https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.018)
- [5] F. Akbal y S. Camci, “Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation”, *Desalination*, vol. 269, n.º 1-3, págs. 214-222, 2011. DOI: [10.1016/j.desal.2010.11.001](https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.001)
- [6] S. Garcia-Segura, M. M. S. G. Eiband, J. V. de Melo y C. A. Martinez-Huitle, “Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 801, págs. 267-299, 2017. DOI: [10.1016/j.jelechem.2017.07.047](https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047)
- [7] V. Kuokkanen, T. Kuokkanen, J. Romo y U. Lassi, “Recent applications of electrocoagulation in treatment of water and wastewater—a review”, *Green and Sustainable Chemistry*, vol. 3, n.º 2, págs. 89-121, 2013. DOI: [10.4236/gsc.2013.32013](https://doi.org/10.4236/gsc.2013.32013)
- [8] M. M. Emamjomeh y M. Sivakumar, “Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/floatation processes”, *Journal of Environmental Management*, vol. 90, n.º 5, págs. 1663-1679, 2009. DOI: [10.1016/j.jenvman.2008.12.011](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.011)
- [9] X. Chen, G. Chen y P. L. Yue, “Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation”, *Chemical Engineering Science*, vol. 57, n.º 13, págs. 2449-2455, 2002. DOI: [10.1016/S0009-2509\(02\)00147-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00147-1)
- [10] S. Vasudevan, L. Jothinathan y G. Sozhan, “Studies on the removal of iron from drinking water by electrocoagulation—A clean process”, *Clean - Soil, Air, Water*, vol. 37, n.º 1, págs. 45-51, 2009. DOI: [10.1002/clen.200800175](https://doi.org/10.1002/clen.200800175)