

Evaluation of the Efficiency of Electrocoagulation for the Removal of Turbidity and TSS in Laboratory Greywater

Noemi Mariely Mancilla Herrera¹; Olenka Dayana Sanchez Huancuco¹; Bruno Alvarado Ojeda¹; Fabricio Joaquin López Abrill¹; Maria Elena Choquehuanga Peña¹; Jim Alexandro Cueva Estrella¹; Denis Gabriel Hurtado, Magister^{1*}

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Los Olivos, Lima - Perú, n00324030@upn.pe, n00331938@upn.pe, n00312918@upn.pe, n00328919@upn.pe, n00333525@upn.pe, n00216735@upn.pe, denis.hurtado@upn.edu.pe

Abstract– The present study aimed to optimize the removal of turbidity and total suspended solids (TSS) through an electrocoagulation (EC) process assisted by a biocoagulant derived from *Cicer arietinum*, for greywater from a chemistry laboratory. To this end, a prototype EC cell with a parallel monopolar configuration was constructed and implemented, using two aluminum electrodes as anodes and a steel electrode as the cathode, connected to the power source. The Response Surface Methodology with a Box-Behnken Design (BBD) was applied to evaluate the significant effect of the biocoagulant dose, water pH, and current intensity on the optimization of removal efficiency. The results demonstrate a maximum removal of 94,80 % for turbidity and 92,50 % for TSS. These efficiencies are achieved under optimal conditions, with a biocoagulant dose of 1000 mg/L, a pH of 5,09, and a current intensity of 0,70 A, whereas for TSS, a dose of 1000 mg/L, a pH of 6,18, and the same current intensity of 0,70 A are required.

Keywords: Electrocoagulation, biocoagulant, *Cicer arietinum*, turbidity, total suspended solids.

Evaluación de la Eficiencia de la Electrocoagulación para la Remoción de Turbidez y SST en Aguas Grises de Laboratorio

Noemi Mariely Mancilla Herrera¹; Olenka Dayana Sanchez Huancuco¹; Bruno Alvarado Ojeda¹; Fabricio Joaquin López Abrill¹; Maria Elena Choquehuanga Peña¹; Jim Alexandro Cueva Estrella¹; Denis Gabriel Hurtado, Magister^{1*}

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Los Olivos, Lima - Perú, n00324030@upn.pe, n00331938@upn.pe, n00312918@upn.pe, n00328919@upn.pe, n00333525@upn.pe, n00216735@upn.pe, denis.hurtado@upn.edu.pe

Resumen– La presente investigación se orientó a optimizar la remoción de turbidez y sólidos suspendidos totales (SST) mediante un proceso de electrocoagulación (EC) asistido con un biocoagulante derivado de *Cicer arietinum*, para aguas grises provenientes de un laboratorio de Química. Para ello, se construyó e implementó un prototipo de celda de EC con configuración monopolar en paralelo, empleando dos electrodos de aluminio como ánodos y un electrodo de acero como cátodo, conectado a la fuente de poder. Se aplicó la Metodología de Superficie de Respuesta con un Diseño Box-Behnken (BBD), para evaluar el efecto significativo de la dosis del biocoagulante, el pH del agua y la intensidad de corriente sobre la optimización de la eficiencia de remoción. Los resultados demuestran una remoción máxima de 94,80 % para la turbidez y 92,50 % para SST. Estas eficiencias se alcanzan bajo condiciones óptimas, siendo dosis del biocoagulante de 1000 mg/L, pH de 5,09 y una intensidad de corriente de 0,70 A; mientras que para los SST se requiere de una dosis de 1000 mg/L, pH de 6,18 y la misma intensidad de corriente de 0,70 A.

Palabras clave- Electrocoagulación, biocoagulante, *Cicer arietinum*, turbidez, sólidos suspendidos totales.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas ambientales a nivel académico es la emisión de aguas grises provenientes de laboratorios universitarios, particularmente de laboratorios de investigación en áreas como química y análisis ambiental. Estos efluentes son generados a partir de diversas actividades, incluyendo el lavado de manos, la limpieza de instrumentos y equipos de laboratorio con detergente, así como el enjuague de recipientes que han contenido reactivos en bajas concentraciones. En consecuencia, además de detergentes, pueden contener residuos de sustancias químicas, materia orgánica y partículas en suspensión, lo que altera las características fisicoquímicas del agua e incrementa parámetros como la turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) [1].

El vertimiento directo de estas aguas sin un tratamiento previo adecuado favorece el transporte de patógenos y generan riesgos tanto ambientales como para la salud humana. Por ello, dichos efluentes pueden considerarse una fuente importante de contaminación, ya que deterioran la calidad del agua y afectan tanto los sistemas de drenaje como los cuerpos receptores [2][3].

La turbidez se origina por la presencia de partículas en suspensión y materia orgánica, la cual puede estar asociada a la

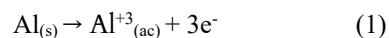
presencia de microorganismos patógenos y dificultando los procesos de desinfección cuando se encuentra en concentraciones elevadas [4]. Por su parte, los SST constituyen un indicador relevante de la carga contaminante, su presencia se asocia a los residuos generados durante las actividades de limpieza de material, manipulación de reactivos y prácticas experimentales que involucran compuestos orgánicos [5]. Diversos estudios indican que ambos parámetros son de los más predominantes en la composición de este tipo de aguas grises [6].

Ante esta problemática, es necesario implementar tecnologías de tratamiento que aseguren la adecuada calidad de estos efluentes. Según la literatura revisada, para este estudio se consideró la selección de la electrocoagulación (EC) como alternativa de tratamiento.

La EC es un proceso electroquímico que se basa en reacciones simultáneas de oxidación y reducción inducidas por corriente eléctrica. La liberación de iones metálicos durante el proceso permite desestabilizar y aglomerar los sólidos suspendidos, facilitando su separación. Debido a su eficiencia y menor dependencia de reactivos químicos, se reporta como una alternativa potencialmente más viable que la coagulación convencional, sin embargo, esta condición depende de factores como el consumo energético, material de electrodos y las condiciones de operación [7][8].

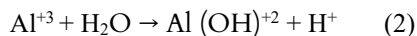
En estudios previos se evaluó el biocoagulante *Cicer arietinum* en procesos de tratamiento de efluentes, empleando la metodología de superficie de respuesta (MSR) para optimizar sus condiciones de operación. Dichos estudios reportaron altas eficiencias de remoción, con valores cercanos al 86 % en turbidez, 87 % en SST y 56 % en DQO, demostrando el potencial del garbanzo como coagulante natural para mejorar la calidad del agua [9].

En el presente estudio se emplearon electrodos de aluminio y, de acuerdo con lo reportado en las referencias [10] y [11], las reacciones que ocurren durante el proceso de EC con este tipo de electrodos son las siguientes:

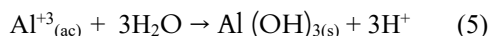


En el ánodo, el aluminio se oxida y libera iones Al^{3+} a la solución, por efecto de la corriente eléctrica, actúa como

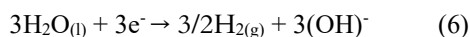
electrodo de sacrificio y genera las especies iónicas responsables de formar el coagulante [12].



Posteriormente, los iones Al^{+3} liberados reaccionan de manera progresiva con moléculas de agua mediante reacciones de hidrólisis, cuya evolución depende del pH del medio, hasta formar hidróxido de aluminio sólido $\text{Al}(\text{OH})_3$. Durante la EC, el pH del efluente suele estabilizarse, aumentando en condiciones ácidas y disminuyendo en condiciones alcalinas, comportamiento que se atribuye al equilibrio entre la generación y el consumo de especies químicas en el sistema [13].



La ecuación presentada representa la forma global de las etapas intermedias de hidrólisis descritas anteriormente.



Por otro lado, en el cátodo se generan burbujas de H_2 , que ayudan a remover los flóculos por flotación, y el OH^- complementa la formación del coagulante [10].

En conjunto, estos procesos de oxidación, reducción, coagulación y flotación contribuyen en la remoción de la turbidez y los SST en las aguas contaminadas [14].

En ese sentido el presente estudio tiene como objetivo optimizar la eficiencia del proceso de EC asistido con biocoagulante de *Cicer arietinum* para la remoción de turbidez y SST de aguas grises provenientes de un laboratorio de Química.

La justificación del estudio radica en la necesidad de explorar alternativas de tratamientos más eficientes frente al uso de coagulantes químicos convencionales, orientadas a mejorar la remoción de contaminantes en aguas grises generadas en laboratorios de investigación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Enfoque, alcance y diseño de la investigación

La presente investigación fue elaborada bajo el enfoque cuantitativo, con un alcance descriptivo y explicativo. De acuerdo con el diseño de investigación fue experimental, dado que fueron manipuladas las variables independientes de forma controlada. Se aplicó la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) mediante el diseño Box-Behnken (BBD), que permitió modelar y determinar las condiciones operativas óptimas del sistema.

B. Construcción de la celda de EC

Para la construcción de la celda de EC empleada en el estudio, se consideraron las siguientes especificaciones.

1) *Características de la celda empleada*: Se utilizó una celda de EC de acrílico, configurada como un sistema *batch*, con una capacidad de 450 mL para el tratamiento de aguas grises de laboratorio. La celda presenta una geometría rectangular y está construida de acrílico. Las dimensiones de la celda fueron de 14,5 cm de largo; 9,5 cm de ancho y con una separación interelectródica de 0,5 cm. Además, la celda contaba con una abertura superior para facilitar la toma de muestras durante el proceso.

2) *Especificaciones de los electrodos usados*: El sistema empleó tres electrodos en forma de “T”, dos ánodos de aluminio y un cátodo de acero, cada uno con dimensiones de 13 cm de largo x 9 cm de ancho y 0,3 cm de grosor. El diseño permite su sujeción directa al borde superior de la celda, conservando una alineación vertical y separación uniforme entre placas para lograr una mejor distribución del campo eléctrico durante el proceso de EC.

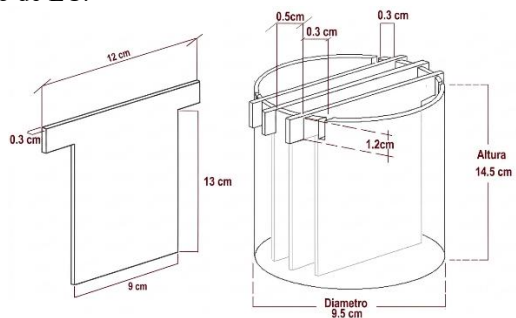


Fig. 1 Configuración geométrica y dimensiones de la celda de EC y disposición de los electrodos

3) *Suministro de corriente eléctrica empleada*: La celda fue conectada mediante una fuente de poder regulable con un rango de operación de 0,30 a 0,70 A, conectada en configuración monopolar en paralelo, mediante cables eléctricos de 1,5 mm de espesor y terminales tipo cocodrilo/caimán para facilitar su acoplamiento a los electrodos.

C. Caracterización de aguas grises

Se realizó a partir de una muestra simple recolectada del punto de acumulación, siguiendo la NTP 214.060:2016. El efluente corresponde a aguas grises de laboratorio y la muestra total de 7,5 L fue homogeneizada antes del análisis y se midieron los parámetros fisicoquímicos, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1
CARACTERIZACIÓN DEL AGUA GRIS DE LABORATORIO

Parámetro	Unidad	Resultado
pH	---	7,10
Turbidez	NTU	129,4
SST	mg/L	136
CE	μS/cm	687

D. Preparación del biocoagulante

1) Para la preparación del biocoagulante utilizado en el estudio, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1.1) Se empleó biocoagulante a base de *Cicer arietinum*, debido a su conocida capacidad coagulante, relacionado a la presencia de proteínas catiónicas y compuestos polímeros que favorecen a neutralizar cargas y crear flóculos [15].

1.2.) El biocoagulante fue adquirido como harina de *Cicer arietinum* en una tienda naturista, presentándose en forma de polvo fino. El material se empleó directamente, sin someterse a pretratamientos adicionales. Sin embargo, de acuerdo con la literatura, la elaboración de biocoagulantes a partir de semillas suele incluir etapas como lavado, secado, trituración y, en ciertos casos, tamizado, con el objetivo de lograr una distribución homogénea [16].

1.3) Se preparó una solución madre, para lo cual se pesaron 6 g del biocoagulante y se diluyó en 1 L de agua desionizada. La mezcla se homogeneizó durante aproximadamente 10 minutos mediante un agitador magnético para asegurar una adecuada dispersión.

1.4) La solución preparada fue almacenada en un refrigerador de laboratorio, en recipientes sellados con película de Parafilm, hasta su utilización, con el objetivo de evitar la degradación de sus componentes activos.

1.5) Las dosis evaluadas se prepararon a partir de la solución madre, extrayendo alícuotas de 30 mL, 53 mL y 75 mL, las cuales se mezclaron con el volumen correspondiente de aguas grises para completar 450 mL por ensayo.

E. Parte experimental

1) *Determinación de las condiciones de operación:* Para el proceso de EC se empleó un volumen fijo de 450 mL de aguas grises por corrida, correspondiente a la capacidad útil de la celda. Se consideraron como factores controlables la dosis del biocoagulante (x_1), el pH (x_2) y la intensidad de corriente (x_3), mientras que las variables de respuesta fueron la remoción de turbidez (Y_1) y la remoción de SST (Y_2). Los ensayos se llevaron a cabo a temperatura ambiente ($\approx 25^\circ\text{C}$).

2) *Diseño experimental:* Se estableció mediante MSR, usando un BBD con tres factores y tres niveles, obteniéndose 15 corridas experimentales distribuidas en 12 puntos factoriales y 3 puntos centrales. Los factores se codificaron en tres niveles: -1 (bajo), 0 (central) y +1 (alto). Los valores fueron definidos a partir de ensayos preliminares y de la revisión de literatura, identificando los rangos que permitieron evidenciar variaciones significativas en la remoción de los parámetros evaluados sin generar inestabilidad en el sistema. Con base en ello, se definieron los siguientes niveles para cada factor: para x_1 , 400–1000 mg/L con punto central de 700 mg/L; para x_2 , pH 4–8 con punto central de 6; y para x_3 , 0,30–0,70 A con punto central de 0,50 A. Los valores de los niveles de cada factor se presentan en la Tabla 2.

TABLA 2
NIVELES DE LOS FACTORES ESTUDIADOS

Factores controlables	Unidad	Notación	-1	0	+1
Dosis del coagulante	mg/L	x_1	400	700	1000
pH	-	x_2	4	6	8
Intensidad de Corriente	A	x_3	0,30	0,50	0,70

Las corridas experimentales se desarrollaron aleatoriamente conforme a la matriz del BBD.

3) *Modelamiento del proceso:* Después del análisis estadístico, se calcularon las eficiencias de remoción de turbidez y SST, ajustándose un modelo cuadrático de la MSR, expresado como:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j>1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (7)$$

4) *Ejecución experimental:* Durante cada corrida se registraron las condiciones iniciales y se aplicaron los parámetros operativos establecidos. El sistema se operó bajo agitación constante mediante un agitador magnético, con el propósito de garantizar una adecuada dispersión del biocoagulante y la homogeneidad de la mezcla. Al finalizar, las muestras fueron decantadas, recolectadas y analizadas para determinar los valores finales de turbidez y SST, registrándose los datos para su posterior análisis en Minitab.

5) *Ensayo de control:* Se llevó a cabo un ensayo de EC en ausencia del biocoagulante, manteniendo las mismas condiciones operativas correspondientes a una de las corridas del diseño experimental (1000 mg/L de dosis del biocoagulante, pH 6 e intensidad de corriente de 0,70 A) en un volumen de 450 mL, con el objetivo de evaluar el efecto individual del proceso electroquímico y compararlo con el sistema asistido con biocoagulante.

6) *Evaluación de la eficiencia del proceso de EC asistida con biocoagulante:* La eficiencia del proceso se determinó mediante el porcentaje de remoción de turbidez y SST, calculado mediante la siguiente expresión general:

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Donde: C_i y C_f corresponden a las concentraciones inicial y final del parámetro evaluado, respectivamente.

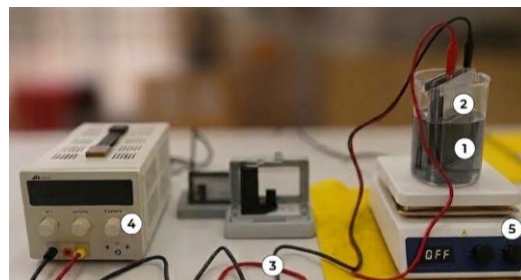


Fig. 2 Sistema de EC utilizada en cada tratamiento experimental

Donde: 1: es la muestra; 2: (1) cátodo y (2) ánodos; 3: cables con pinzas tipo caimán; 4: fuente de poder DC; 5: sistema de agitación.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Determinación de los parámetros de operación

1) *Matriz de diseño y resultados del experimento:* Para determinar los parámetros de operación en el proceso de EC asistida con biocoagulante de *Cicer arietinum*, se empleó un BBD con tres factores y tres niveles codificados, el diseño generó un total de 15 corridas experimentales, de las cuales 12 corresponden a combinaciones factoriales propias del BBD y 3 puntos centrales para estimar la variabilidad experimental.

En la Tabla 3, se resumen los porcentajes de remoción de la turbidez y SST obtenidos después de realizar el diseño de experimentos.

TABLA 3
RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS AL APLICAR EL BBD

Nº	Variables			Respuestas	
				Grado de remoción	
	x ₁	x ₂	x ₃	Y ₁	Y ₂
1	400	4	0,5	81,4	77
2	1 000	4	0,5	90,7	85
3	400	8	0,5	85	82,2
4	1 000	8	0,5	86,9	87,7
5	400	6	0,3	84,9	78,9
6	1 000	6	0,3	88,3	81,8
7	400	6	0,7	87,7	84,3
8	1 000	6	0,7	94,8	92,5
9	700	4	0,3	83,9	72,8
10	700	8	0,3	84,8	80,5
11	700	4	0,7	88,5	83,3
12	700	8	0,7	88,5	86,6
13	700	6	0,5	88,6	86,8
14	700	6	0,5	87,9	85,5
15	700	6	0,5	87,4	86,7

De los resultados mostrados en la Tabla 3, podemos observar que los porcentajes de remoción de la turbidez varían entre el 81,4 % y el 94,8 %, y para los SST varían entre el 72,8 % y el 92,5 %. Estos valores de remoción obtenidos en las 15 corridas experimentales sirvieron para determinar las condiciones óptimas de operación a través de una evaluación de la superficie de respuesta del grado de remoción de la turbidez y SST.

La mejora en la eficiencia de remoción observada puede asociarse a la interacción entre los mecanismos propios de la EC y la acción del biocoagulante. Durante el proceso, la formación in situ de $Al(OH)_3$ favorece la desestabilización de partículas mediante coagulación y su posterior atrapamiento en flóculos [17]. Asimismo, las proteínas pueden interactuar con hidróxidos metálicos mediante procesos de adsorción, en los que pueden estar involucradas interacciones electrostáticas, enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals [18]. En conjunto, estos mecanismos pueden actuar de manera complementaria, generando un posible efecto sinérgico que incrementa la eficiencia global del sistema.

2) *Evaluación de la superficie de respuesta del grado de remoción de la turbidez y SST:* Los resultados del experimento para las variables de respuesta analizadas (véase Tabla 3), fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA), a partir del cual, se pudo evaluar e identificar la significancia estadística del modelo ajustado y de cada uno de los factores del diseño factorial. Este análisis nos permitió identificar la influencia de los efectos principales y de sus interacciones sobre la eficiencia del proceso, obteniéndose los modelos finales para las respuestas Y₁ y Y₂.

A continuación, se muestran los valores del ANOVA de las respuestas de los modelos reducidos:

TABLA 4
ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA RESPUESTA Y₁ DEL MODELO REDUCIDO

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	136,673	15,1859	71,35	0,000
Lineal	3	97,642	32,5475	152,92	0,000
Dosis del biocoagulante (mg/L)	1	58,861	58,8612	276,56	0,000
pH	1	0,061	0,0612	0,29	0,615
Intensidad de corriente (A)	1	38,720	38,7200	181,93	0,000
Cuadrado	3	21,716	7,2386	34,01	0,001
Dosis del biocoagulante (mg/L)*Dosis del biocoagulante (mg/L)	1	0,263	0,2626	1,23	0,317
pH*pH	1	18,416	18,4164	86,53	0,000
Intensidad de corriente (A)*Intensidad de corriente (A)	1	1,766	1,7664	8,30	0,035
Interacción de 2 factores	3	17,315	5,7717	27,12	0,002
Dosis del biocoagulante (mg/L)*pH	1	13,690	13,6900	64,32	0,000
Dosis del biocoagulante (mg/L)*Intensidad de corriente (A)	1	3,423	3,4225	16,08	0,010
pH*Intensidad de corriente (A)	1	0,202	0,2025	0,95	0,374
Error	5	1,064	0,2128	---	---
Falta de ajuste	3	0,338	0,1125	0,31	0,821
Error puro	2	0,727	0,3633	---	---
Total	14	137,737	---	---	---

TABLA 5
ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA RESPUESTA Y₂ DEL MODELO REDUCIDO

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	324,737	36,082	60,15	0,000
Lineal	3	253,958	84,653	141,13	0,000
Dosis del biocoagulante (mg/L)	1	75,645	75,645	126,11	0,000
pH	1	44,651	44,651	74,44	0,000
Intensidad de corriente (A)	1	133,661	133,661	222,83	0,000

Cuadrado	3	57,354	19,118	31,87	0,001
Dosis del biocoagulante (mg/L)*Dosis del biocoagulante (mg/L)	1	0,043	0,043	0,07	0,799
pH*pH	1	44,373	44,373	73,98	0,000
Intensidad de corriente (A)*Intensidad de corriente (A)	1	15,770	15,770	26,29	0,004
Interacción de 2 factores	3	13,425	4,475	7,46	0,027
Dosis del biocoagulante (mg/L)*pH	1	1,562	1,562	2,60	0,167
Dosis del biocoagulante (mg/L)*Intensidad de corriente (A)	1	7,023	7,023	11,71	0,019
pH*Intensidad de corriente (A)	1	4,840	4,840	8,07	0,036
Error	5	2,999	0,600	---	---
Falta de ajuste	3	1,953	0,651	1,24	0,475
Error puro	2	1,047	0,523	---	---
Total	14	327,736	---	---	---

Al analizar los datos del ANOVA correspondientes a las respuestas Y_1 y Y_2 de los modelos reducidos, reportados en las Tablas 4 y 5, se concluyó que:

- El ANOVA del modelo cuadrático reducido para la respuesta Y_1 (Véase Tabla 4), indica que los factores: Dosis del biocoagulante (x_1) e Intensidad de corriente (x_3), fueron significativos ($p < 0,05$). Por otro lado, para los términos cuadráticos, tanto el término pH-pH (x_2^2) como el término Intensidad de corriente-Intensidad de corriente (x_3^2), tuvieron un efecto significativo. Con respecto a las interacciones de Dosis del biocoagulante-pH (x_1*x_2) y Dosis del biocoagulante-Intensidad de corriente (x_1*x_3), ambas resultaron significativas, mientras que con la interacción de pH-Intensidad de corriente (x_2*x_3) no tuvo efecto significativo ya que obtuvo un valor de 0,374.
- El ANOVA del modelo cuadrático reducido para la respuesta Y_2 (Véase Tabla 5), indica que los factores: Dosis del biocoagulante (x_1), pH (x_2) e Intensidad de corriente (x_3), fueron significativos ($p < 0,05$). Por otro lado, para los términos cuadráticos, el término tanto el término pH-pH (x_2^2) como el término Intensidad de corriente-Intensidad de corriente (x_3^2), tuvieron un efecto significativo. Con respecto a las interacciones de Dosis del biocoagulante-Intensidad de corriente (x_1*x_3) y pH-Intensidad de corriente (x_2*x_3), ambas resultaron significativas, mientras que con la interacción de Dosis del biocoagulante-pH (x_1*x_2) no tuvo efecto significativo ya que obtuvo un valor de 0,167.

De las Tablas 4 y 5 se observa que el error puro está asociado a la variabilidad experimental estimada a partir de las corridas replicadas del diseño. Asimismo, la falta de ajuste no resultó significativa en ambos casos ($p = 0,821$ para Y_1 y $p = 0,475$ para Y_2), lo que indica que no se evidencian diferencias

entre los valores experimentales y los predichos por los modelos dentro de las condiciones evaluadas.

3) *Modelos cuadráticos obtenidos para las variables de respuesta Y_1 y Y_2 :* A partir del análisis de varianza (ANOVA) y del proceso de reducción del modelo completo, se obtuvieron las ecuaciones de regresión para las variables. Estos modelos incluyen los efectos principales, términos cuadráticos e interacciones que resultaron significativos, lo que confirma su naturaleza cuadrática, característica de la MSR. Las ecuaciones se expresan en unidades no codificadas, tal como fueron generadas por el *software* Minitab:

$$Y_1 = 52,31 + 0,01569 \text{ Dosis del biocoagulante (mg/L)} + 9,183 \text{ pH} - 13,71 \text{ Intensidad de corriente (A)} + 0,000003 \text{ Dosis del biocoagulante (mg/L)} \times \text{Dosis del biocoagulante (mg/L)} - 0,5583 \text{ pH} \times \text{pH} + 17,29 \text{ Intensidad de corriente (A)} \times \text{Intensidad de corriente (A)} - 0,003083 \text{ Dosis} \times \text{pH} + 0,01542 \text{ Dosis} \times \text{Intensidad de corriente (A)} - 0,562 \text{ pH} \times \text{Intensidad de corriente (A)} \quad (8)$$

$$Y_2 = 13,43 + 0,00377 \text{ Dosis del biocoagulante (mg/L)} + 13,69 \text{ pH} + 73,1 \text{ Intensidad de corriente (A)} + 0,000001 \text{ Dosis del biocoagulante (mg/L)} \times \text{Dosis del biocoagulante (mg/L)} - 0,867 \text{ pH} \times \text{pH} - 51,7 \text{ Intensidad de corriente (A)} \times \text{Intensidad de corriente (A)} - 0,02208 \text{ Dosis del biocoagulante (mg/L)} \times \text{Intensidad de corriente (A)} - 2,750 \text{ pH} \times \text{Intensidad de corriente (A)} \quad (9)$$

4) *Resumen de los modelos cuadráticos generados:* La Tabla 6, muestra los valores de R^2 , $R^2_{(Ajustado)}$ y $R^2_{(pred)}$, para los modelos cuadráticos obtenidos en el análisis de diseño de superficie de respuesta con Minitab para las respuestas Y_1 y Y_2 .

TABLA 6
RESUMEN DEL MODELO CUADRÁTICO GENERADO PARA Y_1 e Y_2

Variable de respuesta	S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
Y_1	0,461339	99,23 %	97,84 %	94,89 %
Y_2	0,774489	99,08 %	97,44 %	89,75 %

Tomado en cuenta los valores mostrados en la tabla resumen de los modelos cuadráticos generados, se observó que:

- Al ser valores del R^2 y $R^2_{(Ajustado)}$ cercanos ($R^2 = 0,9923$ y $R^2_{(Ajustado)} = 0,9784$ para Y_1 ; y $R^2 = 0,9908$ y $R^2_{(Ajustado)} = 0,9744$ para Y_2), se evidencia un alto grado de correlación entre los valores experimentales y los estimados por los modelos. Esta cercanía entre ambos coeficientes sugiere una adecuada capacidad de ajuste de los modelos cuadráticos obtenidos [17].
- Los elevados valores de R^2 indican que una proporción importante de la variabilidad observada en los porcentajes de remoción es explicada por los modelos. Sin embargo, estos indicadores deben interpretarse de manera complementaria con el análisis de varianza, ya que por sí

solos no permiten establecer la ausencia de sobreajuste ni la significancia de todos los términos incluidos en los modelos.

5) *Optimización de respuestas:* Con los modelos cuadráticos generados para Y_1 y Y_2 y haciendo uso del optimizador de respuesta de Minitab, se identificaron los valores de los parámetros óptimos (véase Tabla 7), así como los valores predichos de remoción obtenidos mediante MSR (véase Fig. 3).

TABLA 7
PARÁMETROS ÓPTIMOS DE OPERACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUAS GRISAS DE LABORATORIO POR EC

Variable	Parámetros óptimos de operación
Dosis del biocoagulante (x_1)	1 000
pH (x_2)	5,8
Intensidad de corriente (x_3)	0,7

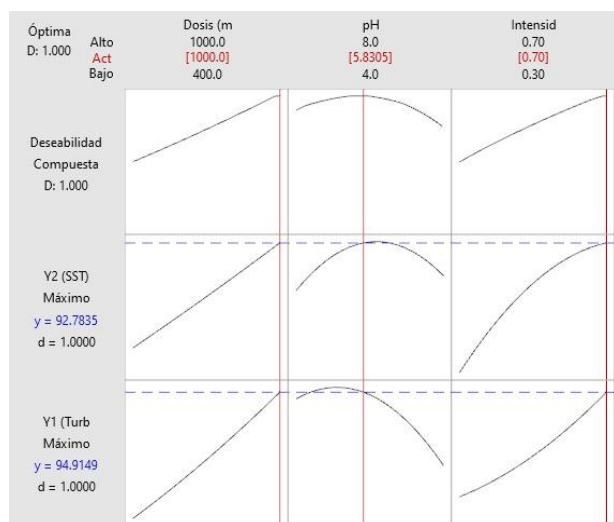


Fig. 3 Gráfica de optimización de respuesta

De la Tabla 7, se observa que las condiciones óptimas obtenidas corresponden a una dosis del biocoagulante de 1 000 mg/L, un pH de 5,8 y una intensidad de corriente de 0,7 A.

De la Fig. 2, se observa que bajo estas condiciones se obtienen valores predichos de remoción de aproximadamente 94,91 % para la turbidez (Y_1) y 92,78 % para los SST (Y_2). Asimismo, la optimización mediante la función de deseabilidad compuesta presenta valores cercanos a 1, lo que indica un alto grado de cumplimiento de los criterios establecidos.

6) *Comparación de la eficiencia de remoción en EC con y sin biocoagulante:* La Tabla 8 presenta los resultados de remoción obtenidos en el tratamiento sin uso de biocoagulante (tratamiento control), los cuales se comparan con el tratamiento asistido que alcanzó los mayores valores de remoción, con el fin de evaluar el efecto de su incorporación en el proceso de EC.

TABLA 8
EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DEL BIOCOAGULANTE EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TURBIDEZ Y SST DURANTE LA EC

Tratamiento	Variables			Remoción (%)	
	x_1	x_2	x_3	Y_1	Y_2
Tratamiento control	0	6	0,7	85,7	86,3
Tratamiento asistido con biocoagulante	1 000	6	0,7	94,8	92,5

La incorporación del biocoagulante en el proceso de EC permitió obtener mayores eficiencias de remoción en comparación con el tratamiento control, donde se registraron valores de 85,7 % para la turbidez (Y_1) y 86,3 % para los SST (Y_2), mientras que con la adición del biocoagulante se alcanzaron 94,8 % y 92,5 %, respectivamente, lo que sugiere un posible efecto sinérgico entre ambos mecanismos. Esta sinergia puede deberse a la interacción de hidróxidos metálicos con componentes orgánicos del biocoagulante: los iones Al^{3+} adsorben polisacáridos, formando complejos híbridos que mejoran la floculación por puentes duales (eléctricos y poliméricos). Estos resultados son consistentes con lo reportado en estudios recientes, donde la combinación de la EC con coagulantes naturales ha evidenciado mejoras en la remoción de contaminantes en comparación con la EC convencional [19, 20].

7) *Análisis descriptivo:* A partir del análisis descriptivo de las respuestas Y_1 y Y_2 , se identificaron sus medias y niveles de dispersión (véase Tabla 9).

TABLA 9
Estadística descriptiva de Y_1 (Turbidez) y Y_2 (SST) (N=15)

Variable	Media	Error. Est. Media	Desv. Est	Varianza	CoefVar	Máximo
Y_1	87,28	0,81	3,137	9,838	3,59	94,80
Y_2	83,44	1,25	4,84	23,41	5,80	92,50

De la Tabla 9, se observa que la máxima remoción de Y_1 alcanza el 94,80 % con una media de 87,28 %, una desviación estándar de 3,137 % y un coeficiente de variación de 3,59 %. La variabilidad registrada refleja la influencia de las condiciones operativas evaluadas en el diseño experimental. Asimismo, el coeficiente de variación indica una baja variabilidad relativa dentro del rango experimental analizado.

En el caso de Y_2 la remoción máxima es de 92,50 % con una media de 83,44 % y una desviación estándar de 4,83 %. La mayor dispersión observada respecto a Y_1 sugiere una mayor sensibilidad de esta variable frente a los cambios en las condiciones experimentales. Por lo tanto, los valores de dispersión reflejan tanto la variabilidad experimental como el efecto de las condiciones operativas evaluadas, por lo que no deben interpretarse únicamente como indicadores de estabilidad del proceso.

Los niveles de remoción alcanzados son consistentes con la literatura sobre procesos de EC asistidos con biocoagulantes. En el caso de Y_1 , las eficiencias se sitúan en el rango superior de estudios que combinan biocoagulante vegetal con EC, donde

se reportan remociones en el rango de 71,76 % a 98,01 % de turbidez [7], lo que sugiere que la integración del biocoagulante con el proceso electroquímico favorece la desestabilización y agregación de partículas coloidales, logrando mayores remociones que la coagulación convencional, en la cual se reportaron eficiencias de 70,36 % [21].

Respecto a Y₂, las eficiencias obtenidas superan los valores típicamente reportados en EC convencional, donde se alcanzan remociones de SST de hasta 88,76 % empleando electrodos de aluminio, mientras que con electrodos de hierro los valores fueron del orden de 72,03 % [22], lo cual podría ser asociado a un efecto sinérgico entre el biocoagulante, la configuración del sistema y las especies metálicas generadas in situ, contribuyendo a una mejor formación y separación de flocúlos.[23]

8) Evaluación normativa de los parámetros de calidad del efluente: A partir de la revisión de la normativa vigente, se identificaron específicamente los parámetros de SST y pH dentro de los Valores Máximos Admisibles (VMA) para descargas de aguas residuales no domésticas al sistema de alcantarillado sanitario, así como la ausencia de regulación para el parámetro de turbidez (véase Tabla 10).

TABLA 10

Parámetros establecidos en los Valores Máximas Admisibles (VMA)

Parámetro	Límite VMA	Unidad
SST	500	mg/L
pH	6 - 9	—
Turbidez	No establecido	—

En la tabla 10, se presentan los parámetros considerados en los VMA establecidos en el Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA, donde se observa que la normativa fija un valor máximo permisible de 500 mg/L para SST y un rango de pH entre 6 y 9.

Asimismo, la normativa no establece un valor para el parámetro de turbidez, por lo que este no se encuentra regulado dentro de los VMA para este tipo de descargas.

La Fig. 4 presenta el diagrama de Pareto correspondiente a los efectos principales sobre el porcentaje de remoción de turbidez. Los resultados muestran que los factores x₁ y x₃ superan el umbral de significancia, por lo que se consideran efectos principales relevantes. En cuanto a las interacciones, se observa que x₁*x₂ y x₁*x₃ también resultaron ser significativos. Finalmente, los factores cuadráticos x₂² y x₃² superaron el umbral de significancia, confirmando su contribución notable en la respuesta evaluada.

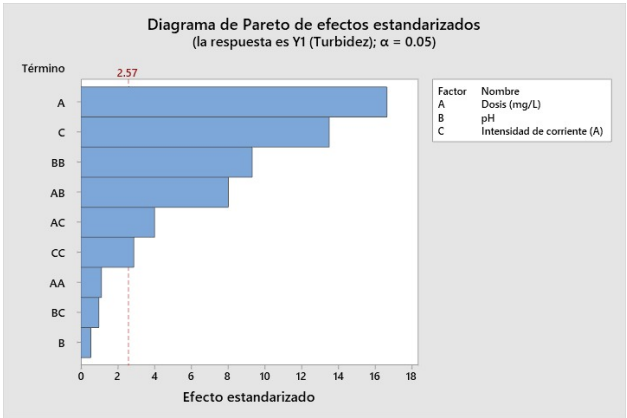


Fig. 4 Diagrama de Pareto de resultados del % de remoción de turbidez

Asimismo, en la Fig. 5 presenta el diagrama de Pareto correspondiente al porcentaje de remoción de SST. En este caso, los factores x₃, x₁ y x₂ superan el umbral de significancia. Del mismo modo, los términos cuadráticos x₂² y x₃² superan el umbral de significancia. Finalmente, se observa que las interacciones x₁*x₃ y x₂*x₃ también resultan significativas, reflejando su influencia conjunta sobre la respuesta.

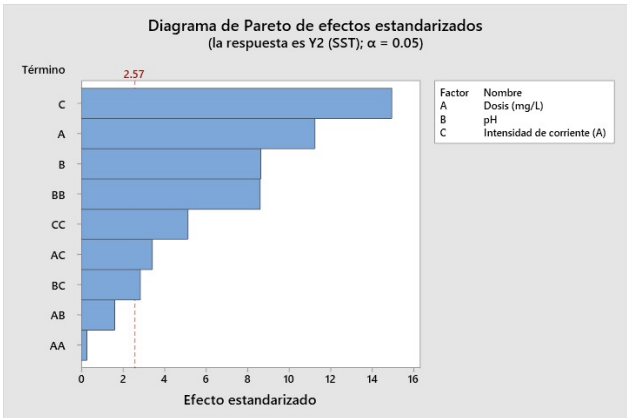


Fig. 5 Diagrama de Pareto de resultados del % de remoción de SST

En la Fig. 6 se observa la eficiencia de remoción de turbidez alcanzada por quince tratamientos diferentes (T1 a T15), donde la mayoría de los resultados se sitúan entre 81,4 % y 94,8 %. Estos valores indican un desempeño elevado de los tratamientos evaluados bajo las condiciones del estudio. El valor máximo se registra en el Tratamiento 8 (T8), con una remoción de 94,8 %, lo que sugiere un mejor rendimiento relativo dentro de la serie experimental analizada.

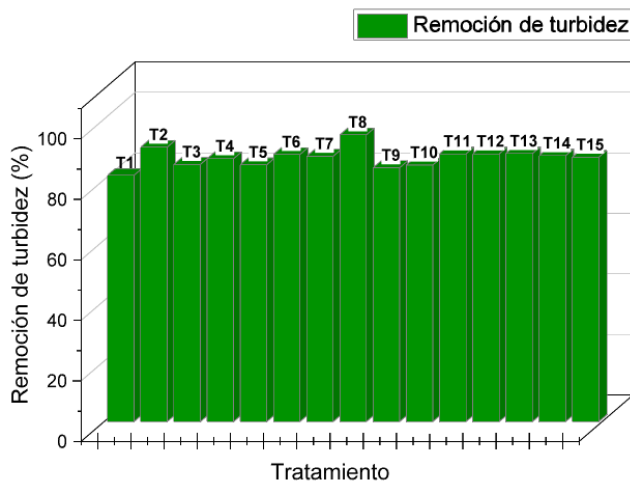


Fig. 6 Gráfico del porcentaje de remoción de turbidez

En la Fig. 7 se presenta la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) para los mismos quince tratamientos (T1 a T15), con resultados comprendidos entre 72,8 % y 92,5 %. Estos datos evidencian un desempeño favorable de los tratamientos en términos de remoción de SST en el contexto evaluado. El mayor valor corresponde al Tratamiento 8 (T8), con 92,5 %, lo que indica un rendimiento superior en comparación con los demás tratamientos bajo las condiciones experimentales consideradas.

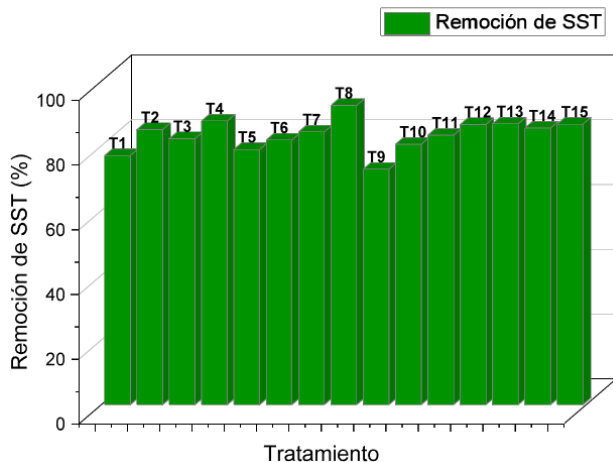


Fig. 7 Gráfico del porcentaje de remoción de SST

IV. CONCLUSIONES

El sistema de EC asistido con biocoagulante de *Cicer arietinum* demostró ser una alternativa eficiente para la remoción de turbidez y sólidos suspendidos totales (SST) en las aguas grises del laboratorio de Química. El prototipo operado en modo batch con un volumen de operación de 0,45 L y electrodos de Al conectados con una configuración monopolar

en paralelo permitió evaluar 15 tratamientos y determinar condiciones que optimizan el desempeño del proceso.

Las principales conclusiones sobre los porcentajes de remoción son las siguientes:

- Los tratamientos evaluados permitieron alcanzar remociones máximas de 94,8 % en turbidez y 92,5 % en SST, reduciendo las concentraciones iniciales de 135,14 NTU y 144,27 mg/L hasta 7,8 NTU y 12 mg/L, respectivamente, lo que indica una mejora significativa en los parámetros fisicoquímicos evaluados, específicamente la turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST).

- Las remociones obtenidas mostraron un buen ajuste al modelo estadístico basado en la MSR, con coeficientes de determinación elevados para ambas respuestas (para turbidez: $R^2 = 99,23\%$ y R^2 ajustado = $97,84\%$; para SST: $R^2 = 99,08\%$ y R^2 ajustado = $97,44\%$), lo que sugiere una alta concordancia entre los valores experimentales y los estimados por los modelos.

Las principales conclusiones sobre los factores influyentes en el proceso son las siguientes:

- La significancia de los factores varió según la variable de respuesta. En la remoción de turbidez (Y_1), la dosis y la intensidad de corriente fueron significativas, mientras que el pH no mostró efecto significativo. En la remoción de SST (Y_2), los tres factores evaluados resultaron significativos.

- Las tendencias observadas permiten identificar parámetros operativos relevantes para el proceso, los cuales podrían servir como referencia para futuras investigaciones o evaluaciones a mayor escala.

La principal conclusión sobre los valores óptimos del proceso es la siguiente:

- El análisis mediante MSR indica que para maximizar la eficiencia de aguas grises de laboratorio, los valores óptimos en conjunto son: una dosis de biocoagulante de 1000 mg/L, un pH de 5,8 y una intensidad de 0,70 A.

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Privada del Norte (UPN) por el patrocinio otorgado, así como por facilitar el acceso a las instalaciones y a los recursos necesarios para la ejecución de la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] Prasetyati, H. D., & Nurhayati, E. (2025). Laboratory wastewater treatment: Study case of Environmental Engineering Department ITS. BIO Web Of Conferences, 157, 03006. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202515703006>
- [2] Novita, E., Andriyani, I., Hartiningsih, E. S., & Pradana, H. (2022). Characterisation of Laboratory Wastewater for Planning Wastewater Treatment Plants in a University Campus in Indonesia. Ecology Environment And Conservation, S45-S50. <https://doi.org/10.53550/eec.2022.v28i04s.007>
- [3] Flores, M. M., Miranda, O. E., Castillo, N. A., Vázquez, V. Á., Mata, O. S., Bañuelos, R., & Murillo, C. E. (2024). Evaluation of the Potential of a Biocoagulant Produced from Prickly Pear Peel Waste Valorization for Wastewater Treatment. Water, 16(10), 1444. <https://doi.org/10.3390/w16101444>

- [4] Dirección General de Salud Ambiental. (2023). Parámetros organolépticos y parámetro fisicoquímico: turbidez. *Ministerio de Salud del Perú*.
- [5] Sievers, J. C., & Londong, J. (2018). Characterization of domestic graywater and graywater solids. *Water Science & Technology*, 77(5), 1196-1203. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.627>
- [6] Mohan, S., Manthapuri, V., & Chithaluri, S. (2024). Assessing factors influencing greywater characteristics around the world: a qualitative and quantitative approach with a short-review on greywater treatment technologies. *Discover Water*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00094-w>
- [7] Pacheco, H. G. J., Elguera, N. Y., Ancco, G. M., Castro, A. E., Meza, M. E. B., & Almeida, V. C. (2023). Combined coagulation-electrocoagulation process using biocoagulant from the *Opuntia ficus-indica* for treatment of cheese whey wastewater. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(4), 491. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11095-y>
- [8] Lombard-Latune, R., Lericquier, F., Oucacha, C., Pelus, L., Lacombe, G., Le Guennec, B., & Molle, P. (2020). Performance and reliability comparison of French vertical flow treatment wetlands with other decentralized wastewater treatment technologies in tropical climates. *Water Science and Technology*, 82(8), 1701-1709. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.444>
- [9] Lek, B. L. C., Peter, A. P., Chong, K. H. Q., Ragu, P., Sethu, V., Selvarajoo, A., & Arumugasamy, S. K. (2018). Treatment of palm oil mill effluent (POME) using chickpea (*Cicer arietinum*) as a natural coagulant and flocculant: Evaluation, process optimization and characterization of chickpea powder. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 6243-6255. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.09.038>
- [10] Jo, S., Kadam, R., Jang, H., Seo, D., & Park, J. (2024). Recent Advances in Wastewater Electrocoagulation Technologies: Beyond Chemical Coagulation. *Energies*, 17(23), 5863. <https://doi.org/10.3390/en17235863>
- [11] Zelada, H. M. Romero., & Vázquez, C. D. (2023). Evaluation of the Efficiency of an Electrocoagulation Cell for the Treatment of Wastewater coming from the Textile Industry. *LACCEI*, 1. <https://doi.org/10.18687/laccei2023.1.1.1530>
- [12] Mao, Y., Zhao, Y., & Cotterill, S. (2023). Examining Current and Future Applications of Electrocoagulation in Wastewater Treatment. *Water*, 15(8), 1455. <https://doi.org/10.3390/w15081455>
- [13] Kabadagli, I., Arslan-Alaton, I., Ölmez-Hanci, T., & Tünay, O. (2012). Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review. *Environmental Technology Reviews*, 1(1), 2-45. <https://doi.org/10.1080/21622515.2012.715390>
- [14] López-Guzmán, M., Flores-Hidalgo, M. A., & Reynoso-Cuevas, L. (2021). Electrocoagulation Process: An Approach to Continuous Processes, Reactors Design, Pharmaceuticals Removal, and Hybrid Systems—A Review. *Processes*, 9(10), 1831. <https://doi.org/10.3390/pr9101831>
- [15] Hassanien, A. M. M. (2021). Usage of *Cicer Arietinum* as a local and eco-friendly natural coagulant in sewage treatment and its ability to increase the formation of floc process. *Bionatura*, 6(3), 1939-1943. <https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.03.9>
- [16] Kurniawan, S. B., Abdullah, S. R. S., Imron, M. F., Ismail, N. I., & Hasan, H. A. (2023). *Preparation and characterization of plant-based biocoagulants for water and wastewater treatment: A review*. *Environmental Advances*, 13, 100423. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100423>
- [17] Al-Marri, J. S., Abouedwan, A. B., Ahmad, M. I., & Bensalah, N. (2023). Electrocoagulation using aluminum electrodes as a sustainable and economic method for the removal of kinetic hydrate inhibitor (polyvinyl pyrrolidone) from produced wastewaters. *Frontiers In Water*, 5. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1305347>
- [18] Cerofolini, L., Giuntini, S., Ravera, E., Luchinat, C., Berti, F., & Fragai, M. (2019b). Structural characterization of a protein adsorbed on aluminum hydroxide adjuvant in vaccine formulation. *Npj Vaccines*, 4(1), 20. <https://doi.org/10.1038/s41541-019-0115-7>
- [19] Elguera, N. y. M., Pulcha, S. E. S., Ballon, E. M. M., Castro, M. R. F., Ramos, L. M. M., Tohalino, V. L. A., Sarmiento, P. K. D., Almeida, V. C., & Pacheco, H. G. J. (2024). Evaluation of Biocoagulant “*Opuntia ficus-indica* and Chitosan” to Improve the Removal of Contaminants in Dairy Effluents through Electrocoagulation. *Journal Of Chemistry*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/6351954>
- [20] Lulesa, T. G. A., Beyene, D., Ebba, M., & Kenea, G. (2022). Water Treatment Using Natural Coagulant and Electrocoagulation Process: A Comparison Study. *International Journal Of Analytical Chemistry*, 2022, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2022/4640927>
- [21] Baatache, O., Benalia, A., Derbal, K., Khalfaoui, A., & Pizzi, A. (2025). Optimized Coagulation Flocculation of Drinking Water Using Pine cone-Based Bio-Coagulants: A Comparative Study of Different Extracts. *Water*, 17(12), 1793. <https://doi.org/10.3390/w17121793>
- [22] Anuf, A. R., Ramaraj, K., Sivasankarapillai, V. S., Dhanusuraman, R., Maran, J. P., Rajeshkumar, G., Rahdar, A., & Diez-Pascual, A. M. (2022). Optimization of electrocoagulation process for treatment of rice mill effluent using response surface methodology *Journal of Water Process Engineering*, 49, 103074. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103074>
- [23] Garomsa, F. S., Berhanu, Y. M., Desta, W. M., & Bidira, F. (2024). Indigenous bio-coagulant assisted electrocoagulation process for the removal of contaminants from brewery wastewater: Performance evaluation and response surface methodology optimization. *Heliyon*, 10(22), e40394. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40394>