

Application of an electrocoagulator with mobile electrodes to improve wastewater treatment in the poultry sector

Américo Milla Figueroa¹; Johan Aguilar Guivin,²; Agerico Pantoja Cadillo³

^{1,2,3} Universidad Nacional del Callao, Perú, amillaf@unac.edu.pe, jaguilarg@unac.edu.pe, apantojac@unac.edu.pe

Abstract– Currently, the rapid growth of the industry and poultry slaughterhouses is producing increasing quantities of byproducts and organic solid waste. The objective of this research is to determine and compare the efficiency of the conventional electrocoagulation (EC) process and the electrocoagulator with moving electrodes (EEM) in removing physicochemical parameters from poultry processing wastewater generated at the Conzac wholesale market, located in the Los Olivos district. The study was developed using a quantitative, applied approach with a pure experimental design, conducting laboratory-scale tests under controlled conditions of voltage, treatment time, and, in the case of EEM, agitation speed. The wastewater samples were initially characterized, registering high concentrations of turbidity and total suspended solids (TSS), typical of poultry effluents. The results showed that both processes were efficient in removing turbidity and TSS; However, the electrocoagulator with mobile electrodes showed significantly higher removal percentages, reaching maximum values of up to 95.6% in turbidity and 95.3% in TSS.

Keywords-- wastewater, poultry sector, electrocoagulation and mobile electrodes.

Aplicación de un electrocoagulador con electrodos móviles para mejorar el tratamiento de agua residuales del sector avícola

Américo Milla Figueroa¹; Johan Aguilar Guivin,²; Agerico Pantoja Cadillo³

^{1,2,3} Universidad Nacional del Callao, Perú, amillaf@unac.edu.pe, jaguilarg@unac.edu.pe, apantojac@unac.edu.pe

Resumen: Actualmente, el rápido crecimiento de la industria y los mataderos avícolas producen cantidades cada vez mayores de subproductos y residuos sólidos orgánicos. El objetivo de esta investigación es determinar y comparar la eficiencia del proceso de electrocoagulación convencional (EC) y del electrocoagulador con electrodos móviles (EEM) en la remoción de parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de procesamiento avícola generadas en el mercado mayorista Conzac, ubicado en el distrito de Los Olivos. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y con un diseño experimental puro, realizándose ensayos a escala de laboratorio bajo condiciones controladas de voltaje, tiempo de tratamiento y, en el caso del EEM, velocidad de agitación. Las muestras de agua residual fueron caracterizadas inicialmente, registrándose altas concentraciones de turbiedad y sólidos suspendidos totales (SST), propias de efluentes avícolas. Los resultados evidenciaron que ambos procesos resultaron eficientes en la remoción de turbiedad y SST; sin embargo, el electrocoagulador con electrodos móviles presentó porcentajes de remoción significativamente superiores, alcanzando valores máximos de hasta 95.6 % en turbiedad y 95.3 % en SST. La comparación estadística confirmó diferencias significativas entre ambos sistemas ($p < 0,05$), demostrando una mayor eficiencia del EEM frente al EC. En consecuencia, se concluye que la electrocoagulación con electrodos móviles constituye una alternativa tecnológica más eficiente para el tratamiento de aguas residuales de procesamiento avícola.

Palabras clave: aguas residuales, sector avícola, electrocoagulación y electrodos móviles.

I. INTRODUCCIÓN

El consumo de todos los tipos de carne ha aumentado a nivel mundial, sobre todo el consumo de la carne de pollo, representando aproximadamente unos 124 millones de toneladas anuales con un consumo anual de 30.17 kg. Esto se debe a su significativa cantidad de proteínas [1]. Sin embargo, su procesamiento en una planta avícola deja alrededor de 20 a 40 L de aguas residuales por ave durante las diversas etapas de sacrificio. Estas aguas residuales contienen sangre, contenido ruminal y materiales de lavado (equipos y salas), que al ser vertidas en las aguas superficiales, subterráneas y agrícolas contaminan al medio ambiente [2], ello causado por los altos valores en la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de proteínas y grasas, fibras, patógenos, productos farmacéuticos veterinarios, nitrógeno total (NT), fósforo total (TP) y sólidos suspendidos totales

(SST) [3]. Por este motivo, con la finalidad de disminuir el impacto ambiental de estas aguas residuales avícolas, se ha propuesto métodos como el tratamiento físico, químico y biológico. Sin embargo, actualmente se busca desarrollar un método más eficiente, rentable y sostenible [4], como los métodos de tratamiento anaeróbico o aeróbico que pueden funcionar en condiciones naturales, pero que ante la presencia de aceites y grasas puede inhibir considerablemente la actividad microbiana. La coagulación química también es muy eficaz para eliminar partículas finas y reducir el tiempo necesario para sedimentar los sólidos en suspensión; sin embargo, requiere el uso frecuente de reactivos químicos y, por lo tanto, genera contaminantes secundarios. Los sistemas de membranas son altamente efectivos y estables con aguas residuales de alta concentración, pero requieren mantenimiento periódico y una alta inversión de capital [5]. Como alternativas al proceso de lodos activados, en la última década se han investigado estrategias de tratamiento de aguas residuales como la electrooxidación, la electroflotación y la electrocoagulación, específicamente en el tratamiento de aguas residuales industriales. Existe un creciente interés en la investigación de la aplicación de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de mataderos avícolas [6]. Esto debido a que, se ha identificado que es un método adecuado para el tratamiento de aguas residuales de los mataderos avícolas, ya que tiene ventajas como la compatibilidad ambiental, adaptabilidad, eficiencia energética, seguridad, selectividad y facilidad de automatización [7]. Se han realizado varios estudios utilizando el proceso EC para tratar aguas residuales de mataderos, principalmente en modo discontinuo. Cruz et al. [8] compararon tres tipos de electrodos: aluminio puro (Al), hierro puro (Fe) y una combinación de Al y Fe. Descubrieron que el electrodo de Al proporcionaba una mayor eliminación de DQO, hasta un 97%, en comparación con otros electrodos. Paulista et al. [9] utilizaron un electrodo de aluminio y grafito para el tratamiento de aguas residuales de mataderos avícolas. Se logró una eliminación de DQO de alta eficiencia cuando la carga de coagulante era superior a 51 mg/L [10]. Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones no considera el uso de los electrodos móviles.

En este marco, la presente investigación se orienta a comparar la eficiencia del electrocoagulador convencional y del

electrocoagulador con electrodos móviles en la remoción de parámetros fisicoquímicos de aguas residuales de procesamiento avícola generadas en el mercado mayorista Conzac, distrito de Los Olivos, fortaleciendo el conocimiento científico y al desarrollo de soluciones tecnológicas aplicables a la gestión sostenible de aguas residuales en el sector avícola.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El enfoque metodológico de la investigación fue experimental y cuantitativo, sustentado en un conjunto sistemático de procedimientos orientados a la recolección, análisis e integración de datos numéricos, con el propósito de dar respuesta a la formulación del problema planteado. Para determinar la eficiencia del electrocoagulador convencional y del electrocoagulador de electrodos móviles en el tratamiento de aguas residuales, se realizó la variación controlada de los principales parámetros operativos, tales como el voltaje aplicado (10, 15 y 20 V), la velocidad de rotación de los electrodos (20, 40 y 60 RPM) y el tiempo de electrocoagulación (3, 6 y 9 min). En ese sentido, es importante establecer condiciones específicas de operación para cada tipo de electrocoagulador, considerando que, al variar estos parámetros de operación, ocurren variaciones en el porcentaje de eficiencia de remoción de turbiedad y de SST [11], lo que puede generar confusión al comparar la eficiencia del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles y el convencional.

- Cada ensayo consistió en tratar 8 litros de agua residual (4 por cada electrocoagulador empleado).
- Se aplicaron las combinaciones de los parámetros seleccionados en cada ensayo.
- Se registraron las condiciones específicas de cada ensayo, incluyendo voltaje, velocidad de giro y tiempo de electrocoagulación.

El trabajo de investigación se realizó en cuatro fases, como se muestra en la Figura 1.

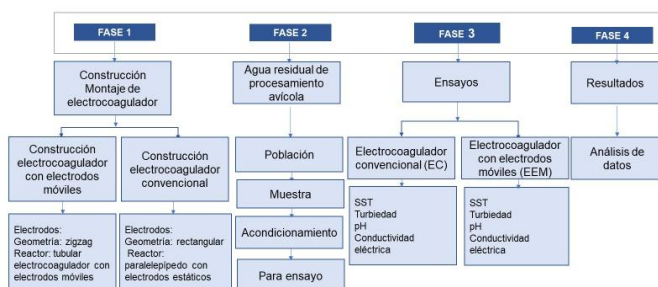


Fig. 1 Fases de la parte experimental

A. Muestras y lugar de estudio

Las muestras de agua residual provenientes del procesamiento avícola fueron recolectadas en el mercado Conzac (12°0'17"S 77°4'17"W) y, posteriormente, conservadas a una temperatura de 4 °C con la finalidad de preservar sus características fisicoquímicas [12] en un refrigerador de

laboratorio Haier Biomedical HLR-198 [13]. Luego, dichas muestras fueron trasladadas a la Universidad Nacional del Callao, específicamente al Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios (LOPU) de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ), donde se llevaron a cabo los ensayos de electrocoagulación, utilizando tanto el sistema de electrocoagulador convencional como el sistema con electrodos móviles.

B. Construcción del equipo de electrocoagulación con electrodos móviles

En esta fase fue necesario desarrollar siete (7) principales etapas (Ver Figura 2) indicadas a continuación:

Etapa 1: La construcción de los electrodos de forma longitudinal en zigzag.

Etapa 2: La construcción del tanque reactor tubular.

Etapa 3: La ubicación de los puntos de contacto para la conexión de los polos positivo (+) y negativo (-) de la fuente de poder con los electrodos del equipo de electrocoagulación.

Etapa 4: Aislamiento entre electrodos, y aislamiento entre los electrodos y el motor.

Etapa 5: Selección del motor.

Etapa 6: Diseño y preparación de la tarjeta electrónica para controlar y seleccionar las velocidades de giro del eje del motor.

Etapa 7: Selección de componentes complementarios. En esta etapa se especifican algunos componentes adicionales para el correcto funcionamiento del Módulo de electrocoagulación construido, se tuvo que definir las características de la fuente de poder que alimenta corriente a los electrodos del equipo de electrocoagulación [14].

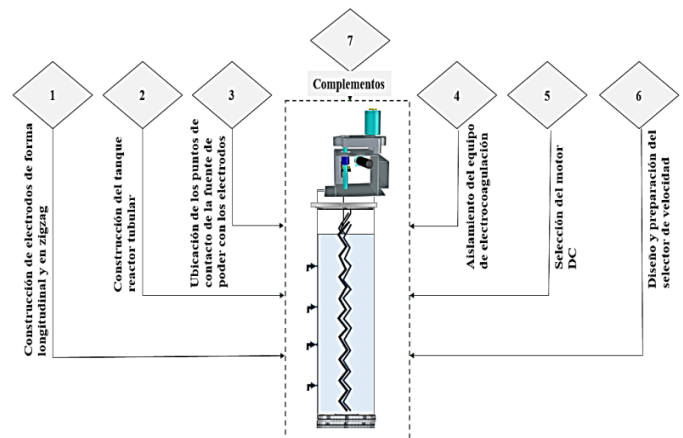


Fig. 2 Etapas para la construcción del electrocoagulador de electrodos móviles

El cuerpo del reactor es un recipiente de acrílico transparente de 5 mm de espesor con 60 cm de alto y 10 cm de diámetro, cuenta con un motor de corriente continua (DC) ASAHI SEIKO CO. LID. de 24 V y una potencia de 150 W con una velocidad de giro nominal de 140 rpm. El electrodo de aluminio tiene una longitud de 1 metro que luego del doblado se reduce a 60 cm, un ancho de 23 mm y un espesor de 3mm, lo mismo para el caso del electrodo de acero.

C. Construcción del equipo de electrocoagulación convencional:

En la Figura 3 se muestra la unidad de EC. El cuerpo del reactor es un recipiente de vidrio acrílico transparente de 4 L con dimensiones de 16.5 cm de largo, 16 cm de ancho y 24 cm de alto [15]. Las dimensiones de los electrodos fueron 1 m × 0.195 m × 3 mm. El reactor cuenta con una válvula de bola de 1/2 para la descarga del efluente tratado. Las características de la fuente de alimentación fueron un rango de variación de voltaje de 0 a 30 V y un amperaje de 0 a 100 A. Esta fuente fue utilizada para ambos electrocoaguladores [16].



Fig. 3 Proceso de electrocoagulación

III. RESULTADOS

A. Caracterización inicial del agua residual

La caracterización inicial (Tabla 1) del agua residual de procesamiento avícola se realizó por triplicado, con la finalidad de obtener valores promedio representativos que sirvieran como referencia para la evaluación de las eficiencias de remoción del proceso. Para ello, a partir de un cilindro de 60 galones (aproximadamente 220 litros), en el cual se recolectaron 180 litros de agua residual, se seleccionaron tres muestras iniciales, las mismas que fueron analizadas para determinar las características del agua residual en términos de turbiedad, sólidos suspendidos totales (SST), conductividad eléctrica y pH. Estos valores promedio permitieron establecer una línea base para el análisis comparativo de los resultados obtenidos durante el tratamiento.

TABLA I
CARACTERIZACIÓN INICIAL DE AGUA RESIDUAL DE
PROCESAMIENTO AVÍCOLA

Parámetro	Unidad	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Turbiedad	UNT	265	253	257	258.3
SST	mg/l	1863	1845	1879	1862.3
pH	*	6.71	6.78	6.85	6.78
C.E	μS/cm	495	486	479	486.6

La caracterización inicial del agua residual de procesamiento avícola del mercado Conzac evidencia una alta carga contaminante propia del proceso de lavado de aves ya desplumadas, en el cual el agua arrastra elevadas concentraciones de sangre, grasas y sólidos orgánicos. Los valores promedio de turbiedad (258.3 NTU) y de sólidos

suspendidos totales (1862.3 mg/L) reflejan una notable presencia de partículas en suspensión y materia orgánica, lo que confirma la elevada carga física del efluente. Asimismo, el pH promedio de 6.78 indica una condición ligeramente ácida a cercana a la neutralidad, compatible con la descomposición de compuestos orgánicos y la presencia de sangre. Por otro lado, la conductividad eléctrica promedio de 486.6 μS/cm sugiere la existencia de sales y compuestos iónicos disueltos en el agua residual. En conjunto, estos resultados demuestran que el efluente presenta características típicas de aguas residuales de origen avícola con alta complejidad contaminante, lo que justifica la necesidad de aplicar un tratamiento eficiente para la remoción de sólidos y contaminantes asociados.

B. Remoción de Turbiedad y SST

En la Tabla 2 se muestra que la eficiencia de remoción de turbiedad y sólidos suspendidos totales (SST) se ve influenciada por la combinación de la velocidad, el voltaje y el tiempo de tratamiento. En términos generales, se observa que, a mayor tiempo de operación, las eficiencias de remoción tienden a incrementarse de manera significativa, especialmente para los SST, lo que evidencia que un mayor periodo de contacto favorece la generación de coagulantes y la aglomeración de partículas. Asimismo, el incremento del voltaje contribuye a mejorar los porcentajes de remoción, al intensificar los procesos electroquímicos involucrados en la electrocoagulación. Destaca el tratamiento T8 (60 de velocidad, 20 V y 9 minutos), el cual presentó las mayores eficiencias tanto en turbiedad (95.6%) como en SST (95.3%), evidenciando una condición óptima de operación. Por otro lado, tratamientos con tiempos cortos y bajo voltaje, como T1 y T3, mostraron menores eficiencias, principalmente en la remoción de SST, lo que sugiere una coagulación incompleta. El tratamiento central T9 también presentó una alta remoción de turbiedad (94.0%), aunque con una eficiencia moderada en SST (78.6%).

TABLA II
REMOCIÓN DE TURBIEDAD Y SST – ELECTRODOS MÓVILES

Tratamiento	Velocidad	Voltaje	Tiempo	Turbiedad	SST
T1	20	10	3	86.1%	60.2%
T2	20	10	9	90.2%	92.6%
T3	20	20	3	85.2%	79.1%
T4	20	20	9	94.2%	92.0%
T5	60	10	3	85.6%	69.0%
T6	60	10	9	92.0%	84.4%
T7	60	20	3	91.7%	76.5%
T8	60	20	9	95.6%	95.3%
T9	40	15	6	94.0%	78.6%

En la Tabla 3 se reporta los valores de remoción utilizando el electrocoagulador convencional, en donde se detalla que la eficiencia de remoción de turbiedad y sólidos suspendidos totales (SST) depende directamente del tiempo de tratamiento y del voltaje aplicado. En los tratamientos con menor tiempo y bajo voltaje, como T1 (3 min – 10 V), se observa una baja remoción de turbiedad (17.4%), aunque con una remoción moderada de SST (67.9%). Al incrementar el voltaje a 20 V

manteniendo el mismo tiempo (T2), la remoción de turbiedad aumenta significativamente hasta 57.5%, y la de SST alcanza 81.3%, evidenciando que el voltaje cumple un rol determinante en la generación de especies coagulantes y en la aglomeración de partículas. Por su parte, el tratamiento T3 (6 min – 15 V) muestra una remoción aún baja de turbiedad (18,4%), pero una remoción considerable de SST (78.5%), lo que sugiere que la eliminación de sólidos puede ocurrir incluso sin una reducción significativa de la turbidez visible. A mayor tiempo de operación, como en T4 (9 min – 10 V), se registra una ligera mejora en la turbiedad (23.7%) y una remoción estable de SST (79.9%). Finalmente, el tratamiento T5 (9 min – 20 V) presenta las mayores eficiencias, con 70.4% de remoción de turbiedad y 92.2% de SST, confirmando que la combinación de mayor tiempo y mayor voltaje optimiza el desempeño del electrocoagulador convencional.

TABLA III
REMOCIÓN DE TURBIEDAD Y SST – E. CONVENCIONAL

Tratamiento	Tiempo	Voltaje	Turbiedad	SST
T1	3	10	17.4%	49.9%
T2	3	20	57.5%	68.7%
T3	6	15	18.4%	57.9%
T4	9	10	23.7%	60.1%
T5	9	20	70.4%	73.6%
T1	3	10	17.4%	49.9%
T2	3	20	57.5%	68.7%
T3	6	15	18.4%	57.9%
T4	9	10	23.7%	60.1%

C. Comparación entre ambos sistemas

Para la condición de 3 minutos y 10 V, el electrocoagulador convencional presentó bajas eficiencias de remoción, con 17.4% de turbiedad y 49.9% de SST. En contraste, el electrocoagulador con electrodos móviles mostró un desempeño notablemente superior: a velocidad de 20 rpm alcanzó 86.1% de remoción de turbiedad y 60.2% de SST, mientras que a velocidad de 60 rpm logró 85.6% y 69.0%, respectivamente. En la condición de 3 minutos y 20 V, el sistema convencional incrementó su desempeño (57.5% de turbiedad y 68.7% de SST); sin embargo, continuó siendo superado por el electrocoagulador con electrodos móviles. A velocidad de 20 rpm, este alcanzó 85.2% de turbiedad y 79.1% de SST, y a velocidad de 60 rpm logró 91.7% y 76.5%, respectivamente. Para la condición de 9 minutos y 10 V, el electrocoagulador convencional registró 23.7% de remoción de turbiedad y 60.1% de SST, valores que resultan claramente inferiores frente al sistema con electrodos móviles. En este caso, a velocidad de 20 rpm se obtuvieron 90.2% de turbiedad y 92.6% de SST, mientras que a velocidad de 60 rpm se alcanzaron 92.0% y 84.4%, respectivamente. Finalmente, para la condición de 9 minutos y 20 V, el electrocoagulador convencional alcanzó sus mejores resultados (70.4% de turbiedad y 73.6% de SST); no obstante, estos valores siguen siendo inferiores a los obtenidos con electrodos móviles. A velocidad de 20 rpm, se lograron 94.2% de turbiedad y 92.0% de SST, y a velocidad de 60 rpm, se obtuvieron las mayores

eficiencias del estudio, con 95.6% de turbiedad y 95.3% de SST. Esto se aprecia con mayor detalle en la Figura 4.

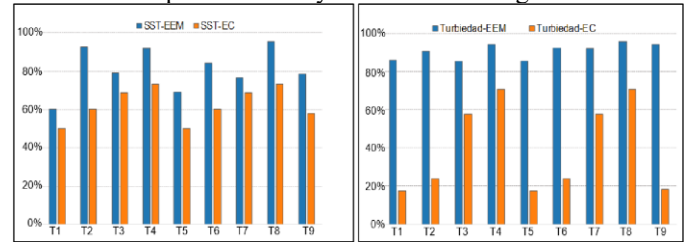


Fig. 4 Comparación de ambos sistemas en remoción de SST y turbiedad

D. Variación de pH y Conductividad Eléctrica

El análisis de la Tabla 4 evidencia que el proceso de electrocoagulación con electrodos móviles no genera variaciones bruscas en el pH ni en la conductividad eléctrica (C.E) del agua residual de procesamiento avícola, manteniéndose ambos parámetros dentro de rangos relativamente estables. El pH presenta una ligera tendencia al incremento conforme aumentan el tiempo de tratamiento y el voltaje, pasando de valores cercanos a la neutralidad ligeramente ácida (6.87 en T1) hacia condiciones más neutras o levemente alcalinas (hasta 7.51 en T4), lo cual puede atribuirse a las reacciones electroquímicas en los electrodos que favorecen la formación de especies hidroxiladas durante el proceso. Por su parte, la conductividad eléctrica muestra variaciones mínimas entre los tratamientos, con valores que oscilan entre 477.67 y 483.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que indica que el tratamiento no altera de manera significativa la concentración de sales disueltas.

TABLA IV
VARIACIÓN DE PH Y C.E – E. ELECTRODOS MÓVILES

Tratamiento	Velocidad	Voltaje	Tiempo	PH	C.E
T1	20	10	3	6.87	483.33
T2	20	10	9	7.36	481.00
T3	20	20	3	7.20	482.67
T4	20	20	9	7.51	483.67
T5	60	10	3	6.90	480.67
T6	60	10	9	7.33	477.67
T7	60	20	3	7.25	479.00
T8	60	20	9	7.49	478.33
T9	40	15	6	7.32	480.67

Para el electrocoagulador convencional, se evidencia variaciones moderadas asociadas a las condiciones operativas aplicadas (Tabla 5). En general, el pH se mantiene cercano a la neutralidad en la mayoría de los tratamientos (T1, T2, T4 y T5), con valores entre 7.3 y 7.4. No obstante, en el tratamiento T3 (6 minutos y 15 V) se observa un incremento del pH hasta 8.4, lo cual puede atribuirse a una mayor generación de iones hidroxilo durante la reacción electroquímica, efecto asociado a un mayor tiempo de operación y a la intensificación de los procesos catódicos. Por otro lado, la conductividad eléctrica presenta ligeras variaciones, con valores que oscilan entre 479.3 y 484.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, evidenciando una leve reducción en algunos tratamientos (T2 y T3), posiblemente relacionada con la

remoción de especies iónicas y la coagulación de partículas cargadas.

TABLA V
VARIACIÓN DE PH Y C.E - ELECTROCOAGULADOR CONVENCIONAL

Tratamiento	Tiempo	Voltaje	PH	C.E
T1	3	10	7.3	483.7
T2	3	20	7.3	481.7
T3	6	15	8.4	479.3
T4	9	10	7.4	484.7
T5	9	20	7.4	484.0

D. Electrocoagulador con electrodos móviles Remoción de SST:

En la Tabla 6 se aprecia el análisis de varianza para la remoción de SST, donde se presentan las principales fuentes de variación y se determina que factores influyen de manera significativa en la remoción de turbiedad.

TABLA VI
ANOVA FACTORIAL PARA REMOCIÓN SST – E. ELECTRODOS MÓVILES

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	0.343426	0.042928	23.69	0.000
Lineal	3	0.286791	0.095597	52.76	0.000
VELOCIDAD	1	0.000061	0.000061	0.03	0.857
VOLTAJE	1	0.050637	0.050637	27.95	0.000
TIEMPO	1	0.236094	0.236094	130.3	0.000
Interacciones de 2 términos	3	0.014185	0.004728	2.61	0.083
VELOCIDAD*VOLTAJE	1	0.000001	0.000001	0	0.982
VELOCIDAD*TIEMPO	1	0.004603	0.004603	2.54	0.128
VOLTAJE*TIEMPO	1	0.009581	0.009581	5.29	0.034
Interacciones de 3 términos	1	0.01953	0.01953	10.78	0.004
VELOCIDAD*VOLTAJE*TIEMPO	1	0.01953	0.01953	10.78	0.004
Curvatura	1	0.02292	0.02292	12.65	0.002
Error	18	0.032614	0.001812		
Total	26	0.376041			

El análisis de varianza para la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) mediante el electrocoagulador con electrodos móviles evidencia que el modelo global es altamente significativo ($F = 23.69$; $p = 0.000$), lo que confirma que las variables evaluadas explican de manera consistente la variabilidad en la eficiencia de remoción de SST. El efecto lineal resulta dominante y estadísticamente significativo ($p = 0.000$), destacándose el tiempo ($p = 0.000$) y el voltaje ($p = 0.000$) como los factores con mayor influencia en el proceso, siendo el tiempo presentado la mayor contribución a la variabilidad del sistema. En contraste, la velocidad no muestra un efecto significativo ($p = 0.857$), lo que indica que, de manera individual, no condiciona de forma relevante la remoción de SST. Respecto a las interacciones de segundo orden, solo la interacción voltaje–tiempo resulta significativa ($p = 0.034$), sugiriendo un efecto sinérgico entre ambas variables sobre la

eficiencia del proceso. Asimismo, la interacción de tercer orden (velocidad–voltaje–tiempo) es estadísticamente significativa ($p = 0.004$), lo que indica que la combinación simultánea de los tres factores influye en la remoción de SST. Finalmente, la significancia de la curvatura ($p = 0.002$) evidencia un comportamiento no lineal del sistema. La influencia de los factores en la remoción de la turbiedad del agua residual de procesamiento avícola se ilustra en la Figura 5.

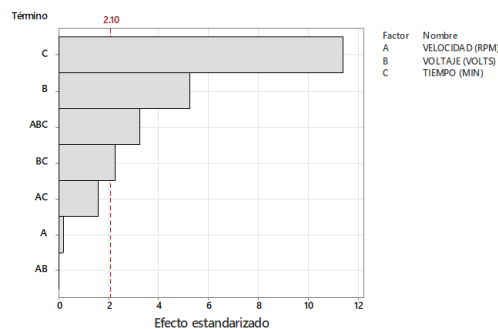


Fig. 5 Diagrama de Pareto para remoción de SST – E. Electrodos Móviles

E. Remoción de Turbiedad

En la Tabla 7 se aprecia el análisis de varianza para la remoción de turbiedad, donde se presentan las principales fuentes de variación y se determina que factores influyen de manera significativa en la remoción de turbiedad.

TABLA VII
ANOVA FACTORIAL PARA REMOCIÓN DE TURBIEDAD – E. ELECTRODOS MÓVILES

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	0.038467	0.004808	9.73	0.000
Lineal	3	0.030027	0.010009	20.26	0.000
VELOCIDAD	1	0.003095	0.003095	6.27	0.022
VOLTAJE	1	0.006173	0.006173	12.5	0.002
TIEMPO	1	0.020759	0.020759	42.02	0.000
Interacciones de 2 términos	3	0.002151	0.000717	1.45	0.261
VELOCIDAD*VOLTAJE	1	0.001642	0.001642	3.32	0.085
VELOCIDAD*TIEMPO	1	0.000313	0.000313	0.63	0.437
VOLTAJE*TIEMPO	1	0.000196	0.000196	0.4	0.537
Interacciones de 3 términos	1	0.002076	0.002076	4.2	0.055
VELOCIDAD*VOLTAJE*TIEMPO	1	0.002076	0.002076	4.2	0.055
Curvatura	1	0.004212	0.004212	8.53	0.009
Error	18	0.008892	0.000494		
Total	26	0.047359			

El análisis de varianza para la remoción de turbiedad mediante el electrocoagulador con electrodos móviles evidencia que el modelo estadístico es globalmente significativo ($F = 9.73$; $p < 0.05$), lo que indica que los factores evaluados explican de manera adecuada la variabilidad observada en la eficiencia de remoción. Dentro de los efectos lineales, se observa que la velocidad ($p = 0.022$), el voltaje ($p = 0.002$) y, principalmente, el tiempo de tratamiento ($p < 0.001$)

influyen de forma significativa en la remoción de turbiedad, siendo este último el factor con mayor contribución al modelo, tal como lo refleja su mayor valor F (42,02). Por otro lado, las interacciones de dos factores (velocidad-voltaje, velocidad-tiempo y voltaje-tiempo) no resultaron estadísticamente significativas ($p > 0,05$), lo que sugiere que el efecto de cada variable actúa de manera predominantemente independiente. La interacción de tres factores presenta un valor p cercano al nivel de significancia ($p = 0,055$), lo que indica una posible influencia conjunta marginal que podría explorarse con mayor detalle. Finalmente, la curvatura resultó significativa ($p = 0,009$), evidenciando un comportamiento no lineal del sistema. La influencia de los factores en la remoción de la turbiedad del agua residual de procesamiento avícola se ilustra en la Figura 6.

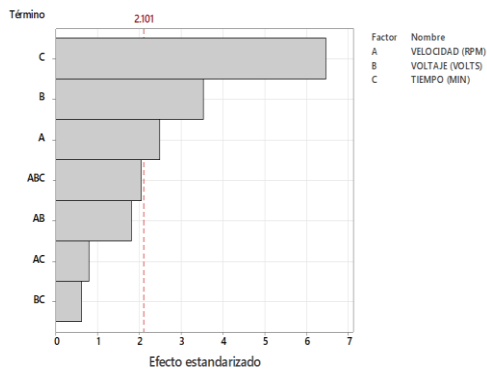


Fig. 6 Diagrama de Pareto para remoción de Turbiedad – E. Electroodos Móviles

F. Electrocoagulator convencional

Remoción de SST

En la Tabla 8 se aprecia el análisis de varianza para la remoción de SST, donde se presentan las principales fuentes de variación y se determina que factores influyen de manera significativa en la remoción de turbiedad.

TABLA VIII
ANOVA FACTORIAL PARA REMOCIÓN DE SST – E.
CONVENCIONAL

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	0.103806	0.025951	18.5	0.000
Lineal	2	0.095186	0.047593	33.94	0.000
TIEMPO	1	0.017076	0.017076	12.18	0.006
VOLTAGE	1	0.078111	0.078111	55.7	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.002119	0.002119	1.51	0.247
TIEMPO*VOLT AJE	1	0.002119	0.002119	1.51	0.247
Curvatura	1	0.0065	0.0065	4.63	0.057
Error	10	0.014024	0.001402		
Total	14	0.11783			

El análisis de varianza factorial (Tabla 8) para la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) mediante el electrocoagulator convencional indica que el modelo estadístico es globalmente significativo (Valor $p = 0.000$), lo que confirma que las variables incluidas explican de manera

adecuada la variabilidad observada en la eficiencia de remoción. Dentro de los efectos lineales, tanto el tiempo ($p = 0.006$) como el voltaje ($p = 0.000$) influyen significativamente en la remoción de SST, siendo el voltaje el factor con mayor efecto, como lo demuestra su elevado valor F (55.7). Esto evidencia que el incremento del potencial eléctrico intensifica los procesos electroquímicos de generación de coagulantes, favoreciendo la agregación y posterior remoción de los sólidos. Por otro lado, la interacción entre tiempo y voltaje no resultó estadísticamente significativa ($p = 0.247$), lo que sugiere que ambos factores actúan de manera independiente en el rango evaluado. Asimismo, el efecto de curvatura presenta un valor p ligeramente superior al nivel de significancia ($p = 0.057$), indicando una posible tendencia no lineal débil, aunque no suficientemente concluyente desde el punto de vista estadístico. La influencia de los factores en la remoción de la turbiedad del agua residual de procesamiento avícola se ilustra en la Figura 7.

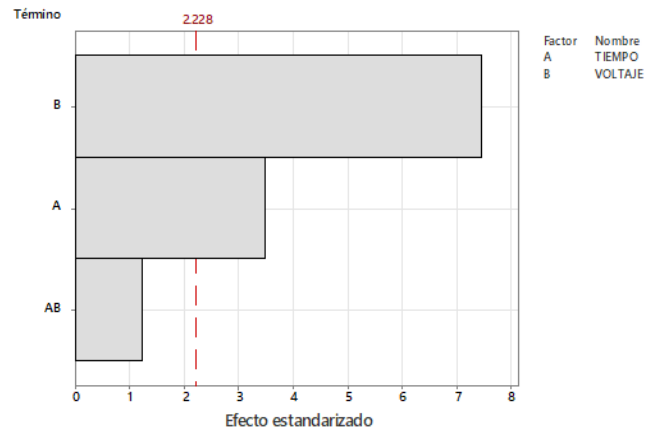


Fig. 7 Diagrama de Pareto para remoción de SST - EC

G. Remoción de Turbiedad

TABLA IX
ANOVA FACTORIAL PARA REMOCIÓN DE TURBIEDAD – E.
CONVENCIONAL

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	0.73312	0.18328	168.41	0.000
Lineal	2	0.593448	0.296724	272.65	0.000
TIEMPO	1	0.02773	0.02773	25.48	0.001
VOLTAGE	1	0.565718	0.565718	519.83	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.003249	0.003249	2.99	0.115
TIEMPO*VOLT AJE	1	0.003249	0.003249	2.99	0.115
Curvatura	1	0.136423	0.136423	125.36	0.000
Error	10	0.010883	0.001088		
Total	14	0.744002			

El análisis de varianza factorial (Tabla 9) para la remoción de turbiedad utilizando el electrocoagulator convencional evidencia que el modelo estadístico es altamente significativo ($F = 168,41$; $p < 0,001$), lo que indica de manera adecuada la variabilidad observada en la eficiencia de remoción. Dentro de

los efectos lineales, tanto el tiempo como el voltaje influyen de forma significativa en la remoción de turbiedad ($p = 0.001$ y $p < 0.001$, respectivamente), siendo el voltaje el factor con mayor contribución al modelo, como lo reflejan su elevado valor F (519,83) y su mayor suma de cuadrados ajustada. Por otro lado, la interacción tiempo-voltaje no resultó estadísticamente significativa ($p = 0,115$), lo que señala que el efecto de cada factor actúa de manera independiente sobre la remoción de turbiedad dentro del rango evaluado. Sin embargo, la curvatura del modelo es altamente significativa ($p < 0.001$), evidenciando la presencia de un comportamiento no lineal en el proceso del proceso. La influencia de los factores en la remoción de la turbiedad del agua residual de procesamiento avícola se ilustra en la Figura 8.

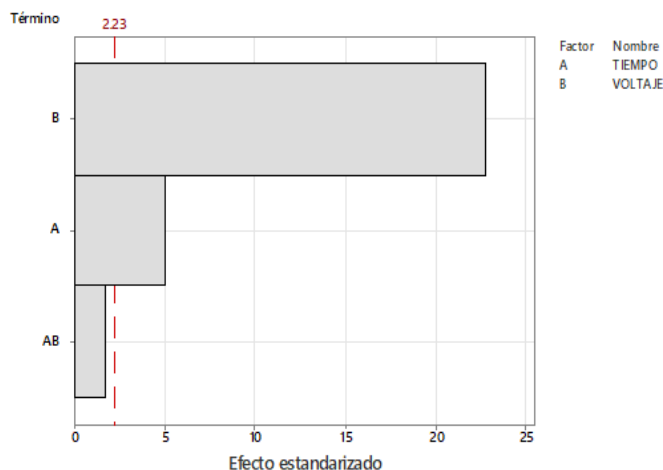


Fig. 8 Diagrama de Pareto para remoción de SST – EC

H. Comparación de ambos sistemas de electrocoagulación

Para comparar de manera estadística y sólida la eficiencia del sistema de electrocoagulación con electrodos móviles frente al sistema convencional, se adoptó la estrategia basada en la comparación bajo condiciones equivalentes de operación, la cual resulta la más robusta y adecuada para un estudio. Esta metodología consiste en seleccionar combinaciones comunes de tiempo y voltaje presentes en ambos diseños experimentales y contrastar los porcentajes de remoción de turbiedad y SST obtenidos por cada sistema, considerando en el caso de los electrodos móviles las diferentes velocidades evaluadas. De este modo, se elimina el sesgo asociado a la diferencia en la estructura de los diseños factoriales (2^3 frente a 2^2), permitiendo que la comparación se centre exclusivamente en el desempeño del tipo de electrocoagulador.

I. Remoción de SST

TABLA X
ANOVA FACTORIAL PARA REMOCIÓN DE TURBIEDAD – E. CONVENCIONAL

Fuente	N	Media.	Agrupación
Electrodos móviles	27	0.9051	A
convencional	15	0.3751	B

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo de electrocoagulador	1	0.3909	0.39087	31.66	0.000
Error	40	0.4939	0.01235		
Total	41	0.8847			

El análisis de varianza (Tabla 10) evidencia que el tipo de electrocoagulador tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción de sólidos suspendidos totales (SST). El valor F obtenido ($F = 31,66$) junto con un valor $p = 0,000$, menor al nivel de significancia de 0,05, indica que existen diferencias significativas en la eficiencia de remoción de SST entre el sistema de electrocoagulación convencional y el sistema con electrodos móviles.

TABLA XI
PRUEBA DE TUKEY – REMOCIÓN SST

Fuente	N	Media.	Agrupación
Electrodos móviles	27	0.8216	A
convencional	15	0.6203	B

Para determinar cuál de los sistemas de electrocoagulación presenta mayor eficiencia en la remoción de SST, se realizó una comparación de medias mediante la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95 % (Tabla 11). Los resultados evidencian diferencias estadísticamente significativas entre ambos sistemas. En este sentido, el electrocoagulador con electrodos móviles alcanzó un mayor porcentaje promedio de remoción de SST (media = 0,8216), mientras que el sistema convencional presentó una menor eficiencia promedio (media = 0,6203). Estos resultados confirman que el sistema con electrodos móviles es significativamente más eficiente que el electrocoagulador convencional en la remoción de sólidos suspendidos totales.

J. Remoción de Turbiedad

TABLA XII
ANOVA PARA COMPARAR TIPOS DE ELECTROCOAGULADOR – REMOCIÓN DE TURBIEDAD

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tipo de electrocoagulador	1	2.7088	2.70878	136.92	0,000
Error	40	0.7914	0.01978		
Total	41	3.5001			

El análisis de varianza (Tabla 12) evidencia que el tipo de electrocoagulador tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción de sólidos suspendidos totales (SST). El valor F obtenido ($F = 136.92$) junto con un valor $p = 0,000$, menor al nivel de significancia de 0,05, indica que existen diferencias significativas en la eficiencia de remoción de SST entre el sistema de electrocoagulación convencional y el sistema con electrodos móviles.

TABLA XIII
PRUEBA DE TUKEY – REMOCIÓN TURBIEDAD

Para determinar cuál de los sistemas de electrocoagulación presenta mayor eficiencia en la remoción de turbiedad, se realizó una comparación de medias mediante la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95 % (Tabla 13). Los resultados evidencian diferencias estadísticamente significativas entre ambos sistemas. En este sentido, el electrocoagulador con electrodos móviles alcanzó un mayor porcentaje promedio de remoción de turbiedad (media = 0.9051), mientras que el sistema convencional presentó una menor eficiencia promedio (media = 0.3751). Estos resultados confirman que el sistema con electrodos móviles es significativamente más eficiente que el electrocoagulador convencional en la remoción de turbiedad.

IV. DISCUSIONES

Los resultados concuerdan con lo reportado por Rodríguez Díaz et al. [17], quienes obtuvieron remociones de hasta 94% de turbidez y 96% de DQO en aguas residuales mixtas lácteas-cárnicas. En ambos estudios se evidencia que el incremento del tiempo de tratamiento y del número o configuración de electrodos mejora sustancialmente la eficiencia del proceso, lo que coincide con los efectos significativos del tiempo y el voltaje identificados mediante ANOVA en la presente investigación. Sin embargo, a diferencia de [17], donde se reportan incrementos importantes de pH y conductividad eléctrica, en este estudio, estos parámetros se mantuvieron relativamente estables, especialmente en el sistema con electrodos móviles. Esta diferencia puede atribuirse a la menor intensidad de corriente, menor tiempo de operación y escala de laboratorio, lo que limita la acumulación de especies iónicas y representa una ventaja operativa al reducir la necesidad de ajustes posteriores.

Los resultados del sistema convencional, con eficiencias máximas de 70.4% en turbidez y 73.6% en SST, son consistentes con estudios previos. En particular, son comparables con Poveda Ávila y Vela Camacho [18], quienes alcanzaron remociones de 82.1% de SST, diferencia atribuida a mayores tiempos de tratamiento y una optimización experimental. Asimismo, estudios como el de Vásquez Acuña [19] reportan eficiencias superiores al 94% en SST, esos datos se logran bajo condiciones más intensivas (altos voltajes, adición de electrolitos y mayores tiempos), lo que incrementa el consumo energético y los costos operativos. Esto evidencia que, aunque la electrocoagulación convencional es eficiente, su desempeño depende fuertemente de las condiciones de operación, lo que limita su viabilidad sin tratamientos complementarios.

En contraste, el sistema con electrodos móviles mostró una clara superioridad, con eficiencias superiores al 85% y máximos cercanos al 96%, lo que coincide con lo reportado por Barja, Paucar y Vilca [20], quienes alcanzaron 96,67% de remoción de turbidez. Este mejor desempeño se atribuye a la mejor interacción electrodo-fluido y a la reducción de la pasivación, lo que favorece la generación y distribución de

especies coagulantes. Dado que la evidencia sobre electrodos móviles es aún limitada, estos resultados aportan al estado del arte al demostrar que la mejora en la eficiencia puede lograrse mediante modificaciones en el diseño del sistema, sin necesidad de incrementar significativamente las condiciones operativas.

No obstante, el estudio presenta limitaciones asociados a su escala de laboratorio, lo que restringe su extrapolación a nivel industrial. Factores como la variabilidad del efluente, el consumo energético y los costos operativos no fueron evaluados en detalle, y la implementación de electrodos móviles podría implicar mayores requerimientos mecánicos y de mantenimiento. En este contexto, aunque el sistema propuesto muestra un alto potencial para el tratamiento de aguas residuales del sector avícola, se requieren estudios adicionales a escala piloto que permitan evaluar su viabilidad técnica y económica en condiciones reales.

V. CONCLUSIONES

Se concluye que el electrocoagulador con electrodos móviles presenta un desempeño significativamente superior al sistema convencional. La comparación estadística mediante ANOVA de un factor evidenció diferencias significativas tanto en la remoción de SST ($F = 31,66$; $p = 0,000$) como de turbiedad ($F = 136,92$; $p = 0,000$), resultados que fueron corroborados por la prueba de Tukey, donde el sistema con electrodos móviles mostró medias de remoción considerablemente mayores. Esto confirma que la incorporación de electrodos móviles optimiza el proceso de electrocoagulación y mejora sustancialmente la eficiencia de tratamiento.

Respecto al proceso de electrocoagulación convencional, se concluye que este sistema es técnicamente eficiente en la remoción de los principales parámetros fisicoquímicos evaluados, particularmente turbiedad y sólidos suspendidos totales. Bajo las condiciones operativas de mayor tiempo y voltaje, se alcanzaron eficiencias máximas de hasta 70,4% en turbiedad y 73,6% en SST, manteniéndose además valores de pH y conductividad eléctrica dentro de rangos aceptables. El análisis estadístico confirmó que el tiempo y el voltaje influyen de manera significativa en la eficiencia del proceso ($p < 0,05$), validando la hipótesis de eficiencia del sistema convencional.

En relación con el proceso de electrocoagulación con electrodos móviles, se concluye que este sistema es altamente eficiente en la remoción de parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales avícolas. Se registraron eficiencias superiores al 85% en todos los tratamientos, alcanzando valores máximos de 95,6% en turbiedad y 95,3% en SST, sin generar variaciones bruscas en el pH ni en la conductividad eléctrica. Los análisis inferenciales demostraron que el modelo es globalmente significativo y que el tiempo y el voltaje son los factores más influyentes ($p < 0,05$), lo que permitió rechazar el planteamiento de ineficiencia y confirmar estadísticamente la alta eficiencia del sistema con electrodos móviles.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Nacional del Callao en virtud de las lecciones aprendidas y las valiosas sugerencias y recomendaciones que nos ha proporcionado.

REFERENCIAS

- [1] T. Karchiyappan, P. Ettiyagounder, P. S. Selvaraj, D. Veeraswamy, J. Ponnusamy, and K. Ramanujam, "A review on sustainable poultry slaughterhouse wastewater management based on electrochemical technology," Apr. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.dwt.2025.101212.
- [2] A. Zarei *et al.*, "Disinfecting poultry slaughterhouse wastewater using copper electrodes in the electrocoagulation process," *Pol. J. Environ. Stud.*, vol. 27, no. 4, pp. 1907–1912, Jan. 2018, doi: 10.15244/pjoes/78150.
- [3] K. Meiramkulova *et al.*, "Evaluation of electrochemical methods for poultry slaughterhouse wastewater treatment," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 12, Jun. 2020, doi: 10.3390/su12125110.
- [4] T. Karchiyappan, P. Ettiyagounder, P. S. Selvaraj, D. Veeraswamy, J. Ponnusamy, and K. Ramanujam, "Electrochemical treatment of chicken slaughterhouse wastewater with iron electrodes," *Desalination Water Treat.*, vol. 322, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.dwt.2025.101181.
- [5] P. V. Ngoben, M. Basitere, and A. Thole, "Treatment of poultry slaughterhouse wastewater using electrocoagulation: a review," *Water Pract. Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 38–59, Jan. 2022, doi: 10.2166/wpt.2021.108.
- [6] P. V. Ngoben, L. Gutu, M. Basitere, T. Harding, and D. Ikumi, "Poultry Slaughterhouse Wastewater Treatment Using an Integrated Biological and Electrocoagulation Treatment System: Process Optimisation Using Response Surface Methodology," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 15, Aug. 2022, doi: 10.3390/su14159561.
- [7] E. Bazrafshan, F. Kord Mostafapour, M. Farzadkia, K. A. Ownagh, and A. H. Mahvi, "Slaughterhouse wastewater treatment by combined chemical coagulation and electrocoagulation process," *PLoS One*, vol. 7, no. 6, Jun. 2012, doi: 10.1371/journal.pone.0040108.
- [8] K. D. Cruz, J. T. J. Francisco, K. J. M. Mellendrez, and J. M. F. Pineda, "Electrocoagulation treatment of swine slaughterhouse wastewater: Effect of electrode material," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Sep. 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201911700020.
- [9] L. O. Paulista, P. H. Presumido, J. D. Peruço, and A. L. Novaes, "Efficiency analysis of the electrocoagulation and electroflotation treatment of poultry slaughterhouse wastewater using aluminum and graphite anodes," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, no. 20, pp. 19790–19800, Jul. 2018, doi: 10.1007/s11356-018-2184-y.
- [10] F. A. Nugroho, A. Z. Arif, G. Z. M. Sabila, and P. T. P. Aryanti, "Slaughterhouse Wastewater Treatment by Electrocoagulation Process," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1115, no. 1, p. 012037, Mar. 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1115/1/012037.
- [11] M. Ebba, P. Asaithambi, and E. Alemayehu, "Investigation on operating parameters and cost using an electrocoagulation process for wastewater treatment," *Appl. Water Sci.*, vol. 11, no. 11, Nov. 2021, doi: 10.1007/s13201-021-01517-y.
- [12] O. Sahu, "Treatment of industry wastewater using thermochemical combined processes with copper salt up to recyclable limit," *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 5, no. 2, pp. 288–300, 2016, doi: 10.1016/j.ijbsbe.2016.05.006.
- [13] G. Webster *et al.*, "Wastewater sample storage for physicochemical and microbiological analysis," *J. Virol. Methods*, vol. 332, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.jviromet.2024.115063.
- [14] A. Milla, "Equipo de electrocoagulación con electrodos móviles para el tratamiento de aguas de pozo," Universidad Nacional Federico Villareal, LIMA, 2019.
- [15] M. S. Hellal, H. S. Doma, and E. Abou-Taleb, "Techno-economic evaluation of electrocoagulation for cattle slaughterhouse wastewater treatment using aluminum electrodes in batch and continuous experiment," *Sustainable Environment Research*, vol. 33, no. 2, Dec. 2023, doi: 10.1186/s42834-023-00163-0.
- [16] W. Reátegui *et al.*, "Electrocoagulation in batch mode for the removal of the chemical oxygen demand of an effluent from slaughterhouse wastewater in lima peru: Fe and al electrodes," *Desalination Water Treat.*, vol. 202, pp. 206–218, 2020, doi: 10.5004/dwt.2020.26175.
- [17] Y. Rodríguez, M. Fuentes, Ó. Beleño, and L. Montoya, "Electrocoagulation as an alternative treatment for mixed wastewater originated in the dairy and meat processing industry," *Tecnura*, vol. 25, no. 67, pp. 26–39, Jan. 2021, doi: 10.14483/22487638.15769.
- [18] J. Poveda and O. Vela, "Eficiencia de un electrocoagulador como alternativa para el tratamiento de aguas residuales de una industria alimentaria," Universidad Santo Tomás, Villavicencio, 2021.
- [19] B. Vasquez, "APLICACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO CON ELECTRODOS DE ALUMINIO Y FIERRO PARA LA REDUCCIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL CAMAL S.A.G.E.I.S.A. EN EL AÑO 2018," Universidad Privada del Norte, Lima, 2019.
- [20] R. Barja, S. Paucar, and J. Vilca, "Eficiencia de la electrocoagulación con electrodos móviles en el tratamiento de agua residual doméstica a nivel laboratorio - 2025," Universidad Continental, Huancayo, 2025.