



UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO TÉCNICO

Tema:

CÁLCULO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTROFLOCULADOR A ESCALA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS.

Trabajo de titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental

Autores:

JHELEN ALEJANDRA CARDENAS ACOSTA.

ERICK MAURICIO DELGADO MERA.

Tutor:

ING. XAVIER ANCHUNDIA MUENTES Mg.

MANTA, 2025 (2)

DECLARACION AUTORES

Declaramos que este trabajo es original, de nuestra autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

Jhelen Cardenas

Cardenas Acosta Jhelen Alejandra

C.I: 1316711306

Erick Delgado

Delgado Mera Erick Mauricio

C.I: 1312201401

 Uleam UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1
		Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ciencias de la Vida y Tecnologías de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante DELGADO MERA ERICK MAURICIO, legalmente matriculados en la carrera de Ingeniería Ambiental, periodo académico 2025-2026, cumpliendo el total de 400 horas, cuyo tema del proyecto es "CÁLCULO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTROFLOCULADOR A ESCALA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS".

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 19 de enero de 2026.

Lo certifico,

Ing. Xavier Enrique Anchundia Muentes Mg.G.A.

Docente Tutor

Área: Ingeniería Ambiental

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1
		Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ciencias de la Vida y Tecnologías de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría de la estudiante CARDENAS ACOSTA JHELEN ALEJANDRA, legalmente matriculada en la carrera de Ingeniería Ambiental, período académico 2025-2026, cumpliendo el total de 400 horas, cuyo tema del proyecto es "CÁLCULO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTROFLOCULADOR A ESCALA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS".

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 19 de enero de 2026.

Lo certifico,

Ing. Xavier Enrique Anchundia Muentes Mg.G.A.

Docente Tutor

Área: Ingeniería Ambiental

AGRADECIMIENTOS

JHELEN CARDENAS

A mi familia gracias por estar en cada etapa de mi vida, por su amor y por siempre confiar en que lo lograría. De manera especial, a mi tía Cristina, María y mi tío Enrique que siempre me han cuidado, protegido y guiado como una hija más, cada paso que he dado ha tenido su apoyo detrás y cada logro lleva un pedacito de ustedes.

A mi tío Darwin quien ya no está presente, por cuidarme, por amarme y por siempre alegrar la vida de toda la familia con alguna ocurrencia que salía, y aunque hoy no estes físicamente tus recuerdos vivirán siempre en mi corazón.

A mi padre le agradezco el hecho de regalarme una segunda madre tan maravillosa, por darme a alguien que me ha amado como una hija más. Y a ti querida Marlene, gracias por siempre apoyarme y por brindarme tu amor tan puro y sincero, por ser esa luz en mi vida que me acerco más a Dios.

A Jhordan, gracias por el apoyo constante, por cuidarme y acompañarme con amor en este proceso, tu presencia siempre atenta y generosa ha significado más de lo que las palabras pueden expresar.

A mis suegros, y a la familia que han formado, la cual hoy por hoy considero como mi segunda familia, gracias porque han sido como ángeles que me envió mi Chloe, porque cuando no pude estar presente le dieron la despedida más bonita a mi princesa, gracias por amarla desde el primer día de su existencia y por hoy por hoy quererme y cuidarme a mí, mi gratitud y cariño por siempre.

A mi tutor de tesis, por su guía, su paciencia y apoyo brindado durante la realización de esta tesis, haciendo de este proceso una experiencia enriquecedora de conocimientos valiosos.

A mis profesores, en especial al profesor Ángel Pérez, que fue un pilar fundamental en todo este camino, gracias por sus sabios conocimientos y por habernos guiado y apoyado siempre.

ERICK DELGADO

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme concedido la oportunidad de cursar esta carrera, a través de la cual he adquirido valiosos conocimientos y ha fortalecido mi formación académica y profesional.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis padres, por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por su acompañamiento permanente, sus consejos y su guía en la toma de decisiones importantes a lo largo de mi vida.

De manera especial, agradezco a mi tutor, el Ing. Xavier Anchundia, por su destacada labor de orientación, amplia experiencia, compromiso y dedicación, así como por sus acertadas recomendaciones, las cuales contribuyeron de forma determinante al desarrollo, fortalecimiento y culminación del presente trabajo de titulación.

Asimismo, extiendo mi gratitud a todos los docentes que aportaron con sus conocimientos y experiencias al fortalecimiento de este proyecto. De forma particular, al Ing. Ángel Pérez, no solo por su excelencia académica, sino también por su calidad humana, así como por compartir sus conocimientos en el área de electricidad, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo y construcción del prototipo final.

De igual manera, agradezco a mi grupo ADAFE, quienes durante toda la carrera no solo fueron compañeros, sino verdaderos amigos. Siempre nos apoyamos mutuamente; cuando alguno tenía dificultades para comprender algún tema, entre todos buscábamos la manera de explicarlo de forma más sencilla para que nadie se quedara atrás. Valoro profundamente el esfuerzo compartido y el compromiso que demostramos en cada etapa de la carrera. Si la vida me diera la oportunidad de vivir nuevamente mi etapa universitaria, no dudaría en volver a establecer estas mismas amistades.

Finalmente, quiero agradecer de manera especial a la persona que conocí desde el curso de nivelación, con quien he mantenido una amistad duradera y un apoyo constante a lo largo de la carrera, y que hoy es mi compañera de tesis. Su compromiso y dedicación fueron muy importantes para poder realizar y finalizar este trabajo.

.

DEDICATORIA

JHELEN CARDENAS

A Dios el creador de todas las cosas, por sostenerme siempre y por hacerme una mujer fuerte y resiliente, gracias señor porque a lo largo del camino me has enseñado que todo en la vida tiene un propósito y que el tiempo de Dios es perfecto.

Dedicado al cielo, al angelito más lindo que puede haber, a ti hija, mi princesa Chloe, te dedico cada logro y éxito porque eres tú la que me inspiras a seguir día a día, me esforzaré siempre por ser la mejor, y aunque por circunstancias de la vida no podemos estar juntas en este momento, sé que desde el cielo estas celebrando conmigo, te amo mi bebé y te llevo siempre en mi corazón.

A mi madre, por amarme desde el primer instante de mi existencia, por tu amor y apoyo incondicional, por el sacrificio silencioso que hiciste cada día para que yo pueda estudiar, por enseñarme que el que persevera alcanza, gracias por siempre impulsarme a ser mejor cada día.

A mi padre, no hay palabras suficientes para decirte lo agradecida que estoy, por el trabajo incansable, por enseñarme con tu vivo ejemplo que la disciplina y la responsabilidad son caminos que me llevarán al éxito, porque a pesar de que el camino fue duro, no dejaste de confiar en que tu princesa lo lograría y estuviste siempre apoyándome, esto es por y para ustedes, espero se sientan afortunados de ser mis padres como yo me siento de ser su hija.

A mi papi Manolo, por tu amor tan puro y sincero, por haber siempre confiado en que lo lograría porque tú anhelabas verme graduada, mi viejito hoy puedo decirte con orgullo que se cumplió tu anhelo.

A mis hermanos que son lo más lindo que mi madre y mi padre me pudieron regalar, porque a través de su cariño, su amor y sus ocurrencias hacen que mis días sean mejores, son el mejor regalo que Dios pudo darme.

A mi compañero de vida, mi gordito, gracias por todo tu cariño, por tu comprensión, por tu compañía y el amor brindado cada día, por haberme sostenido con amor en el momento más difícil de mi vida, por siempre apoyarme a cumplir mis sueños y por aportar alegría a mi vida, porque cuando sentí que no podía estuviste ahí dándome aliento, este logro también es tuyo amor.

ERICK DELGADO

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la oportunidad de llegar hasta este momento tan importante de mi vida.

A mis padres, por su amor incondicional y su apoyo constante a lo largo de toda mi vida. Gracias por estar siempre a mi lado, por sus consejos, su paciencia y por enseñarme a no rendirme ante las dificultades. Por creer en mí incluso en los momentos en los que yo mismo dudé e impulsarme a seguir adelante. Este logro no solo me pertenece a mí, sino que también es de ustedes.

A mi hermana, quien con su ejemplo me ha demostrado que el esfuerzo, la dedicación y las lágrimas valen la pena cuando se persigue un sueño. Su perseverancia, fortaleza y compromiso han sido una fuente constante de inspiración, enseñándome que, a pesar de las dificultades, siempre es posible levantarse y alcanzar incluso los sueños más difíciles.

A mi abuelita, quien, aunque hoy ya no se encuentra físicamente presente, sé cuánto le habría alegrado verme convertido en profesional. Su recuerdo y sus enseñanzas me acompañan siempre.

INDICE GENERAL

CONTENIDO	PAG
DECLARACION AUTORES	ii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	iii
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vii
INDICE GENERAL	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	1
SUMARY.....	2
CAPITULO I.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. MARCO TEÓRICO	4
1.1.1. Aguas Residuales urbanas	4
1.1.2. Enfermedades causadas por aguas residuales.	5
1.1.3. Elementos dañinos de las aguas residuales.	5
1.1.4. Tratamiento de aguas residuales.....	6
1.1.5. Electrofloclador.....	7
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	13
1.4. OBJETIVOS.....	14
1.4.1. Objetivo General.....	14
1.4.2. Objetivos específicos	14
CAPITULO II.....	15
2. METODOLOGÍA	15
2.1. UBICACIÓN DEL ELECTROFLOCLADOR.....	15
2.2. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.	16
2.2.1. Investigación bibliográfica.....	16
2.2.2. Diseño del electrofloclador.....	17
2.2.3. Electrodo.....	17
2.2.4. Cálculo del consumo del electrodo	18
2.2.5. Construcción del electrofloclador	19
2.3. MUESTRAS	20
2.3.1. Cálculo de las diluciones.....	21
2.4. PROCESOS DE CALIBRACIÓN.....	21

2.5.	MODIFICACIÓN DE LA CELDA.....	21
2.6.	Evaluación de la eficiencia del prototipo	23
2.7.	Determinación del porcentaje de clarificación.....	23
2.7.1.	Cálculo del porcentaje de clarificación	24
2.8.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	27
CAPITULO III.....		28
3. RESULTADOS.....		28
3.1.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ELECTROFLOCULADOR.	28
3.1.1.	Consumo del electrodo.....	29
3.2.	CALIBRACIÓN.....	30
3.2.1.	Selección de la fuente de energía.....	30
3.3.	CELDA	31
3.4.	EFICIENCIA DEL ELECTROFLOCULADOR	31
3.5.	PORCENTAJE DE CLARIFICACIÓN	33
3.5.1.	Muestras con clarificación alcanzada.....	33
3.5.2.	Muestras con clarificación limitada	35
3.6.	PROBABILIDAD T (UNA COLA).....	37
3.6.1.	Café.....	37
3.6.2.	Agua residual.....	38
CAPITULO IV		39
4. DISCUSIÓN.....		39
CAPITULO V		42
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		42
5.1.	CONCLUSIONES	42
5.2.	RECOMENDACIONES.....	43
6. BIBLIOGRAFIA.....		45
7. ANEXOS.....		48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tiempo de depuración aplicado a las diferentes muestras analizadas	23
Tabla 2. Muestra 0, agua residual (sin tratamiento)	24
Tabla 3. Muestra 1, agua residual (5 minutos de tratamiento).....	24
Tabla 4. Muestra 2, agua residual (10 minutos de tratamiento).....	25
Tabla 5. Muestra 3, agua residual (15 minutos de tratamiento).....	25
Tabla 6. Muestra 4, agua residual (20 minutos de tratamiento).....	26
Tabla 7. Muestra 5, agua residual (25 minutos de tratamiento).....	26
Tabla 8. Cantidad y medidas del electrodo de aluminio	28
Tabla 9. Calibración del prototipo para la selección de la fuente de energía	30
Tabla 10. Condiciones de tratamiento y observaciones de las muestras evaluadas	32
Tabla 11. Comparación estadística entres los tiempos de la muestra de café mediante prueba t de una cola	37
Tabla 12. Comparación estadística entres los tiempos de la muestra de agua residual mediante prueba t de una cola.	38
Tabla 13. Muestra 0 sin tratamiento.	54
Tabla 14. Muestra 1 agua potable (5 minutos de tratamiento).	54
Tabla 15. Muestra 2 agua potable (10 minutos de tratamiento).	55
Tabla 16. Muestra 3 agua potable (15 minutos de tratamiento).	55
Tabla 17. Muestra 4 agua potable (20 minutos de tratamiento).	56
Tabla 18. Muestra 5 agua potable (25 minutos de tratamiento).	56
Tabla 19. Muestra 6 agua potable (30 minutos de tratamiento).	57
Tabla 20. Resultados del tratamiento del agua potable	57
Tabla 21. Muestra 0 sin tratamiento.	57
Tabla 22. Muestra 1 de la dilución de café con agua potable (5 minutos de tratamiento).	58
Tabla 23. Muestra 2 de la dilución de café con agua potable (10 minutos de tratamiento). ..	58
Tabla 24. Muestra 3 de la dilución de café con agua potable (15 minutos de tratamiento). ..	59
Tabla 25. Muestra 4 de la dilución de café con agua potable (20 minutos de tratamiento). ..	59
Tabla 26. Muestra 5 de la dilución de café con agua potable (25 minutos de tratamiento). ..	60
Tabla 27. Resultados del tratamiento de agua con dilución de café	60
Tabla 28. Muestra 0 sin tratamiento.	60
Tabla 29. Muestra 1 de la dilución de Power Rojo con agua potable (5 minutos de tratamiento).....	61
Tabla 30. Muestra 2 de la dilución de Power Rojo con agua potable (10 minutos de tratamiento).....	61

Tabla 31. Muestra 3 de la dilución de Power Rojo con agua potable (15 minutos de tratamiento).....	62
Tabla 32. Muestra 4 de la dilución de Power Rojo con agua potable (20 minutos de tratamiento).....	62
Tabla 33. Muestra 5 de la dilución de Power Rojo con agua potable (25 minutos de tratamiento).....	63
Tabla 34. Resultados del tratamiento del agua residual de la comuna Los Bajos Pechiche, Cantón Montecristi	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del electrofloculador en la ULEAM.....	15
Figura 2. Diagrama inicial del electrofloculador	17
Figura 3. Recolección de muestras de aguas residuales en la comuna Los bajos Pechiche	20
Figura 4. Cono Imhoff.....	22
Figura 5. Esquema del proceso de decantación de forma inversa	22
Figura 6. Dimensiones técnicas del electrodo.....	28
Figura 7. Versión final del electrofloculador	29
Figura 8. Variación del porcentaje de clarificación de la dilución de café con agua potable en función del tiempo de depuración	33
Figura 9. Variación del porcentaje de clarificación del agua residual en función del tiempo de depuración.....	34
Figura 10. Variación del porcentaje de clarificación del agua potable en función del tiempo de depuración.....	35
Figura 11. Variación del porcentaje de clarificación de la dilución de Power rojo con agua potable en función del tiempo de depuración.....	36

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo calcular, diseñar y construir un electrofloculador a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales urbanas. La problemática estudiada se relaciona con la limitada disponibilidad de sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas. La metodología incluyó una revisión bibliográfica sobre el proceso de electrofloculación y estudios previos desarrollados en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. Posteriormente, se realizó el diseño y construcción del prototipo utilizando electrodos de aluminio en configuración monopolar en paralelo, con una capacidad de tratamiento de 40 litros por muestra. Una vez construido el prototipo, se comenzó con las pruebas preliminares para determinar la fuente de energía, en donde se seleccionó la batería de vehículo como la opción más eficiente para garantizar un funcionamiento continuo. Además, se evaluó el desempeño del electrofloculador mediante ensayos experimentales con cuatro tipos de muestras: agua potable, agua potable con dilución de café, agua potable con dilución de power y agua residual urbana de la comuna Los Bajos Afuera, cantón Montecristi. La eficiencia del sistema se determinó mediante mediciones espectrofotométricas de absorbancia en siete longitudes de onda para cada muestra, seguidamente, se llevó a cabo el cálculo del porcentaje de clarificación, complementado con un análisis estadístico mediante la prueba t de una cola. Los resultados obtenidos evidenciaron que el electrofloculador construido tiene una alta capacidad de clarificación del agua residual urbana, con un 88% de clarificación a los 25 minutos de tratamientos. Asimismo, en la dilución del café se obtuvo un 79% de clarificación, confirmando la efectividad del sistema con muestras con alta carga orgánica. Por otro lado, tenemos las muestras del power y agua potable las cuales mostraron resultados totalmente diferentes, debido a que no se pudo evidenciar una clarificación, lo que demuestra que el proceso de electrofloculación necesita más tiempo de depuración para este tipo de muestra con baja concentración de contaminantes o con colorantes altamente solubles. Se concluye que el electrofloculador construido es una herramienta técnica viable y funcional para fines educativos.

SUMARY

The research aimed to calculate, design, and construct a pilot-scale electroflocculator for the treatment of urban wastewater. The problem studied relates to the limited availability of urban wastewater treatment systems. The methodology included a literature review on the electroflocculation process and previous studies conducted at the University Laica Eloy Alfaro of Manabí. Subsequently, the prototype was designed and constructed using aluminum electrodes in a parallel monopolar configuration, with a treatment capacity of 40 liters per sample. Once the prototype was built, preliminary tests were conducted to determine the power source, selecting a vehicle battery as the most efficient option to ensure continuous operation. The electroflocculator's performance was then evaluated through experimental trials with four types of samples: drinking water, drinking water with coffee dilution, drinking water with power powder dilution, and urban wastewater from the Los Bajos Afuera community in the Montecristi canton. The system's efficiency was determined through spectrophotometric absorbance measurements at seven wavelengths for each sample. Subsequently, the percentage of clarification was calculated and complemented with a statistical analysis using a one-tailed t-test. The results showed that the constructed electroflocculator has a high clarification capacity for urban wastewater, achieving 88% clarification after 25 minutes of treatment. Similarly, a 79% clarification was obtained in the coffee dilution, confirming the system's effectiveness with samples containing high organic loads. On the other hand, the power and drinking water samples showed entirely different results, as no clarification was observed. This demonstrates that the electroflocculation process requires a longer purification time for these types of samples with low concentrations of contaminants or highly soluble dyes. It is concluded that the constructed electroflocculator is a viable and functional technical tool for educational purposes.

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

Según ONU-Hábitat y OMS (2021), a nivel mundial, estima que el 56 % de las aguas residuales tuvieron su debido tratamiento de forma efectiva, a partir de datos recolectados de 128 países que representan al 80% de la población mundial. Sin embargo, se detectaron grandes diferencias entre las regiones en la cantidad de aguas residuales que se tratan de forma segura, que va desde el 25% hasta el 80%, lo cual demuestra que el progreso sigue siendo desigual a nivel mundial.

En numerosas ciudades alrededor del mundo, los sistemas encargados del tratamiento adecuado de las aguas residuales, tanto domésticas como industriales, suelen ser insuficientes o ineficaces (Egusquiza, 2023). Como consecuencia, estas aguas contaminadas terminan siendo vertidas en los cuerpos de agua más cercanos, lo que afecta la calidad del agua y perjudica tanto la salud pública como los ecosistemas acuáticos, por lo tanto, termina generando problemas ambientales complejos que pueden resultar difíciles de solucionar si no se adoptan soluciones efectivas y sostenibles.

Según Mejía *et al.* (2006), señalan que la electrofloculación es una tecnología limpia y emergente, conocida desde principios del siglo XX, que representa una alternativa ambientalmente sustentable para el tratamiento de aguas residuales urbanas. Aunque su uso aún es poco común en este ámbito, destaca por no requerir agentes químicos, ya que utiliza corriente directa aplicada a través de electrodos sumergidos en el agua residual, esto permite una depuración eficiente y amigable con el medio ambiente (Díaz *et al.* 2021).

Es importante destacar que previamente ya se han realizado dos estudios utilizando electrofloculadores, en donde se determinó la eficiencia del tratamiento tomando parámetros diferentes, empleando aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento provenientes del caudal de Manta, estos estudios evidenciaron las ventajas de esta técnica, por lo que es necesario construir un modelo que tome parte integral de un tren de tratamiento, con el fin de optimizar los resultados.

1.1. MARCO TEÓRICO

1.1.1. Aguas Residuales urbanas

En las últimas décadas el mundo ha venido mostrando preocupación y está tratando de resolver los problemas relacionados con la disposición de los efluentes líquidos provenientes del uso doméstico, comercial e industrial de las aguas de abastecimiento. La mayoría de esas aguas es descargada en los ríos, lagos, mares, en los suelos a cielo abierto o en el subsuelo, a través de los llamados pozos sépticos y rellenos sanitarios. La primera prioridad que demanda una comunidad es el suministro del agua, con calidad adecuada y cantidad suficiente. Ya logrado este objetivo, surge otro no menos importante que consiste en la adecuada eliminación de las aguas ya utilizadas que se convierten en potenciales vehículos de muchas enfermedades y trastorno del medioambiente (Reynolds, 2002).

Las aguas de desecho dispuestas en una corriente superficial (lagos, ríos, mar) sin ningún tratamiento, ocasionan graves inconvenientes de contaminación que afectan la flora y la fauna. Estas aguas residuales, antes de ser vertidas en las masas receptoras, deben recibir un tratamiento adecuado, capaz de modificar sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas, para evitar que su disposición cause los problemas antes mencionados. El grado de tratamiento requerido en cada caso para las aguas residuales deberá responder a las condiciones que acusen los receptores en los cuales se haya producido su vertimiento (Rodríguez, 2017).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser diseñadas, construidas y operadas con el objetivo de convertir el líquido cloacal proveniente del uso de las aguas de abastecimiento, en un efluente final aceptable, y para disponer adecuadamente de los sólidos ofensivos que necesariamente son separados durante el proceso. Esto obliga a satisfacer ciertas normas o reglas capaces de garantizar la preservación de las aguas tratadas al límite de que su uso posterior no sea descartado (Rodríguez, 2017).

1.1.2. Enfermedades causadas por aguas residuales.

Se sabe que las aguas residuales albergan microorganismos que causan enfermedades (patógenos), incluyendo virus, protozoos y bacteria, los organismos patogénicos pueden originarse en los individuos infectados o en animales domésticos o salvajes, de los cuales pueden o no presentar señales de enfermedad; la diarrea y la gastroenteritis se encuentran entre las tres principales causas de muerte en el mundo y en la región latinoamericana (Sáenz, 2023).

El agua no segura para beber y la contaminación a través del desecho inadecuado de aguas negras son responsables por la gran mayoría de estas muertes. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud, sólo en Brasil, 20 niños mueren cada día debido a la falta de sistemas de aguas negras. Este es un problema que está directamente relacionado con la presencia de enfermedades infecciosas tales como el cólera, hepatitis, disentería, gastroenteritis y muchas otras (Sáenz, 2023).

1.1.3. Elementos dañinos de las aguas residuales.

- **Malos olores:** Consecuencia de las sustancias extrañas que contiene y los compuestos provenientes de estas materias, con el desdoblamiento anaeróbico de sus complejos orgánicos que generan gases resultados de la descomposición.
- **Acción tóxica:** Que muchos de los compuestos minerales y orgánicos que contienen esas aguas residuales provoca sobre la flora y la fauna natural de los cuerpos receptores y sobre los consumidores que utilizan estas aguas.
- **Potencialidad infectiva:** Contenida en las aguas receptoras y que permite transmitir enfermedades y se convierten en peligro para las comunidades expuestas. El riego de plantas alimenticias con estas aguas ha motivado epidemias de amebiasis, y su vertido al mar contaminación en criaderos de ostras y de peces.
- **Modificación de la apariencia física:** La modificación estética en áreas recreativas donde se descargan efluentes contaminados.
- **Polución térmica:** Generada por ciertos residuos líquidos industriales que poseen altas temperaturas.

1.1.4. Tratamiento de aguas residuales.

A lo largo del tiempo, el océano se ha convertido en el principal vertedero de una gran parte de los residuos generados por actividades domésticas e industriales. Esta situación ha deteriorado significativamente su calidad ambiental, poniendo en riesgo tanto la salud de los ecosistemas marinos como la de la humanidad. Entre los factores de degradación ambiental que actualmente reciben gran atención por parte de los gobiernos y la comunidad científica, destacan la contaminación y los riesgos asociados a los vertidos de aguas residuales. Estos vertidos contienen elevados niveles de microorganismos patógenos, materia orgánica y microplásticos, en adelante, MPs (partículas plásticas menores de 5 mm), entre otros contaminantes (WWF, 2022).

La meta del tratamiento de aguas residuales nunca ha sido producir un producto estéril, sin especies microbianas, sino reducir el nivel de microorganismos dañinos a niveles más seguros de exposición, donde el agua es comúnmente reciclada para el riego o usos industriales. Al escoger la tecnología apropiada de tratamiento, deben considerarse cierto número de factores, incluyendo la cantidad y composición de la corriente de residuos, los estándares del efluente, opciones indicadas de uso y desecho, opciones de pretratamiento industrial; y, factibilidad de funcionamiento.

Muchas opciones de tratamiento pueden ayudar a reducir los efectos de contaminación ambiental, la eficacia del tratamiento debe ser balanceada con el costo, la aplicación práctica y el cumplimiento con los métodos que han sido escogidos para la implementación (Reynolds, 2002).

El reúso de aguas residuales es una opción válida para el desecho, donde el medio ambiente puede filtrar efectivamente las corrientes de residuos moderadamente tratados. La minimización del ingreso de residuos peligrosos generados por procesos industriales (como, metales pesados) a las plantas municipales de tratamiento, es algo clave para reducir los efectos tóxicos de estos efluentes, muchos de los cuales no pueden ser eliminados a través de procesos convencionales de tratamiento. En general, las aguas residuales consisten de dos componentes, un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo (UNAM, 2024).

Los pasos básicos para el tratamiento de aguas residuales incluyen:

1. Pretratamiento: remoción física de objetos grandes.
2. Deposición primaria: sedimentación por gravedad de las partículas sólidas y contaminantes adheridos.
3. Tratamiento secundario: digestión biológica usando lodos activados o filtros de goteo que fomentan el crecimiento de microorganismos
4. Tratamiento terciario: tratamiento químico (por ejemplo, precipitación, desinfección). También puede utilizarse para realzar los pasos del tratamiento primario.

1.1.5. Electrofloclador.

Es una tecnología limpia emergente, fue patentada por Elmore en 1904, ha sido ejercida desde 1906 en Estados Unidos, en los últimos 10 años diferentes estudios afirman que se han realizado mejoras que logran eficiencias progresivas, las aplicaciones de este sistema son industriales y poseen alta competitividad en distintos procesos de descontaminación de aguas con resultados exitosos, alcanzando a proteger, conservar y recuperar el recurso hídrico. Se aplica principalmente en clarificación de aguas residuales y con fines de potabilización, remoción de contaminantes que provengan de efluentes industriales, aguas de fluoruro para consumo humano, o materia orgánica soluble (Beltrán, 2015).

Esta tecnología se emplea principalmente en la clarificación de aguas residuales, la remoción de contaminantes provenientes de efluentes industriales, el tratamiento de aguas con altos contenidos de fluoruro para consumo humano y la eliminación de materia orgánica soluble, por su gran versatilidad se convierte en una alternativa eficaz para diferentes tipos de matrices hídricas, tanto en sistemas de potabilización como en procesos de depuración ambiental.

El fundamento principal de la electrofloculación se basa en el proceso de electrólisis, el cual consiste en la aplicación de corriente eléctrica para inducir reacciones químicas que permiten la descomposición de compuestos. El proceso se desarrolla dentro de una solución electrolítica que facilita la transferencia de iones entre electrodos, en este sistema los iones con carga positiva se desplazan hacia el cátodo, donde son reducidos, mientras que los iones con carga negativa migran hacia el

ánodo, donde se oxidan, para que el dispositivo opere correctamente se necesita de una fuente externa de energía eléctrica que provoque las reacciones electroquímicas (Boinpally *et al.*, 2023).

Estas reacciones resultan del movimiento de electrones entre los electrodos metálicos y los compuestos presentes en el efluente, dando lugar a procesos de reducción en el cátodo (donde los protones del agua se transforman en hidrógeno) y de oxidación en el ánodo (que genera iones metálicos y oxígeno, este último derivado de la hidrólisis del agua). Como resultado, los contaminantes se transforman en compuestos hidrófobos lo que da lugar a que floten o precipiten, facilitando así su eliminación mediante un método secundario de separación (Morales y Acosta 2010).

En la actualidad, la electrofloculación se considera una tecnología avanzada para la eliminación de sólidos suspendidos totales (TSS), metales pesados, grasa, aceites y agentes patógenos, además que su funcionamiento integra principios de la electroquímica, la coagulación y la flotación, lo que permite alcanzar altos niveles de eficiencia en la purificación del agua, considerándose una alternativa ambientalmente responsable, ya que no requiere de reactivos químicos y utiliza electrodos metálicos de bajo costo, abundantes en la naturaleza y con baja toxicidad, como el hierro y el aluminio (Boinpally *et al.*, 2023).

Condorchem (2025), señala que un tratamiento de aguas residuales mediante electrofloculación consta de las siguientes etapas:

- Neutralización de cargas eléctricas de los coloides, facilitada por los cationes metálicos generados en el ánodo, se da la adsorción de contaminantes sobre los flóculos de hidróxidos metálicos formados *in situ*, que actúan como agentes coagulantes.
- Precipitación de los contaminantes juntos con los productos de corrosión de los electrodos, principalmente hierro o aluminio, según el material del ánodo.
- Separación por flotación, promovida por el arrastre de los flóculos mediante las microburbujas de hidrógeno y oxígeno generadas en el cátodo y el ánodo, respectivamente.

- Oxidación y/o reducción de sustancias disueltas, gracias a las reacciones redox que ocurren en el entorno electroquímico. Por otro lado, se produce la oxidación química que permite transformar los metales y contaminantes en especies no tóxicas y degrada la DQO/DBO de forma sensible.

Adicionalmente el mismo autor nos señala que a la hora de diseñar una instalación de electrofloculación, es imprescindible tener en cuenta a los siguientes factores básicos:

- Tipo de electrodo: aluminio, hierro o aleaciones.
- Configuración de electrodos: monopolar, bipolar, en serie o paralelo.
- Distancia entre electrodos: influye en la resistencia eléctrica.
- Densidad de corriente: oscila entre 5 y 50 mA/cm².
- pH inicial: afecta a la formación de especies metálicas activas.
- Conductividad del agua: puede requerir adición de electrolitos (NaCl, Na₂SO₄).
- El tiempo de retención es otro factor que es variable en cada caso.

Para el funcionamiento del electrofloculador (Mejía *et al.*, 2006) indican que el mismo consta de varios procesos que son los siguientes:

a) Ingreso del agua residual

El agua residual urbana o industrial es conducida hacia el reactor de electrofloculación, en esta etapa no ocurre tratamiento alguno, pero es fundamental que el caudal sea controlado y constante para garantizar un tiempo de retención adecuado dentro del sistemas.

b) Aplicación de corriente eléctrica

Se aplica corriente eléctrica continua o alterna entre los electrodos instalados dentro del reactor, esta energía eléctrica es el motor del proceso, ya que induce las reacciones electroquímicas necesarias para la generación del coagulante y la separación de contaminantes.

c) Disolución del ánodo

El ánodo, fabricado comúnmente de hierro o aluminio, se oxida al paso de la corriente eléctrica, como resultado el metal se disuelve liberando iones metálicos al agua:

Fe^{2+}/Fe^{3+} en electrodos de hierro

Al^{3+} en electrodos de aluminio

El electrodo se lo denomina “de sacrificio” porque se consume progresivamente durante el proceso.

d) Formación del coagulante in situ

Los iones metálicos liberados reaccionan con el agua formando hidróxidos metálicos insolubles ($Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$ o $Al(OH)_3$); estos compuestos actúan como coagulantes, pero a diferencia de la coagulación química tradicional, se generan directamente dentro del reactor, sin adición de reactivos externos.

e) Desestabilización de contaminantes

Los hidróxidos metálicos neutralizan las cargas eléctricas de los contaminantes presentes en el agua, tales como sólidos suspendidos, coloides, grasas, aceites, colorantes y metales disueltos, al perder su estabilidad eléctrica las partículas dejan de repelerse entre sí.

f) Formación de flóculos

Las partículas desestabilizadas comienzan a unirse entre sí y con los hidróxidos metálicos, formando flóculos de mayor tamaño y peso, estos tienen una estructura más compacta y con menor contenido de agua que los generados en la coagulación química convencional.

g) Generación de burbujas de gas

En el cátodo ocurre la reducción del agua, produciendo gas hidrógeno (H_2), y en el ánodo se puede generar oxígeno (O_2), estas reacciones producen microburbujas finas y uniformes dentro del reactor.

h) Electroflotación de los flóculos

Las microburbujas se adhieren a los flóculos, reduciendo su densidad aparente y provocando su ascenso hacia la superficie del agua, este fenómeno es conocido como electroflotación y facilita la separación física de los contaminantes.

- Los flóculos pueden flotar y acumularse en la superficie.
- Sedimentar hacia el fondo del reactor.
- En ambos casos, los contaminantes quedan separados del agua tratada.

i) Retiro y manejo de lodos

Los flóculos acumulados se retiran como lodos, los cuales contienen los contaminantes atrapados, estos lodos son generalmente más densos y de menor volumen que los producidos en tratamientos químicos, lo que facilita su manejo, deshidratación y disposición final.

j) Salida del agua tratada

Finalmente, el agua clarificada sale del reactor con una reducción significativa de turbidez, DQO, DBO, metales pesados, grasas, aceites y color; dependiendo del objetivo del tratamiento, el agua puede ser descargada o reutilizada.

Según CorpQuality (2025), describe que la electrofloculación ofrece varias ventajas y beneficios entre ellos:

- Elimina eficazmente las bacterias, esporas, virus, parásitos y sólidos en suspensión, metales pesados y algas, en la producción de agua potable.
- El sistema no requiere el uso de productos químicos tóxicos en el uso normal, donde hay ajuste del pH del agua ácida o alcalina extrema puede ser necesaria.
- Puede tratar una amplia gama de contaminantes, más que cualquier otro sistema de tratamiento, lo que mejora la relación costo-beneficio.
- Bajo costo por litro de agua producida en comparación con otros sistemas de tratamiento.
- La cantidad de residuos es mínima, normalmente alrededor de 5% se produce inicialmente cuando se quita la “suspensión” floculada.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se estima que en 2020 el 44% de todas las aguas residuales domésticas del mundo no se trataron de forma segura antes de ser vertidas al ambiente, estas cifras proceden de datos de 128 países, donde se halla el 80% de la población mundial (ONU, 2021).

Según el Banco Mundial (Reynolds, 2002), más de 300 millones de habitantes de ciudades en Latinoamérica producen 225.000 toneladas de residuos sólidos al día, y se estima que menos del 5% de las aguas residuales reciben tratamiento.

Peña *et al.* (2018) indicaron que Ecuador tiene un número limitado de ciudades con sistemas de tratamiento de aguas residuales, solo el 62% de los 215 municipios del país tratan el agua residual, mientras que el resto no utiliza ningún tipo de tratamiento, las aguas que se generan en entornos urbanos actualmente es un asunto crítico en la gestión ambiental, ya que no cuentan con un tratamiento adecuado lo que conlleva a la necesidad de implementar tecnologías para su tratamiento.

En el ámbito académico y experimental, existe una limitada disponibilidad de sistemas que permitan analizar el funcionamiento de tecnologías alternativas para el tratamiento de aguas residuales urbanas, lo cual restringe la evaluación técnica de estos procesos bajo condiciones controladas. Así mismo, se evidencia la carencia de un sistema de electrofloculación a escala piloto que posibilite el estudio de su desempeño en este tipo de aguas.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La electrofloculación se ha consolidado como una tecnología emergente dentro de los procesos de tratamiento de aguas residuales, al integrar principios de electroquímica, coagulación y flotación para la remoción de contaminantes presentes en diferentes matrices hídricas, su aplicación permite la generación in situ de agentes coagulantes mediante el uso de electrodos metálicos, lo que reduce la necesidad de reactivos químicos externos y facilita la separación de sólidos suspendidos, color y materia orgánica, constituyéndose en una alternativa de interés para estudios académicos y experimentales a escala piloto.

Consecuentemente, los trabajos de titulación deben orientarse a brindar estudios, elaborar instrumentos, revisar y determinar técnicas y tecnologías que constituyan herramientas válidas para el análisis, la identificación de problemas por resolver y la propuesta de soluciones prácticas, ajustadas a las realidades existentes en la comunidad para la cual fue concebida esta institución de educación superior, la cual debe ser capaz de generar los medios necesarios para desarrollar nuevas técnicas y tecnologías frente a dichas realidades.

Es por ello que la construcción de un electrofloculador a escala es una opción práctica para reforzar la formación técnica de los estudiantes, este dispositivo utiliza energía eléctrica para favorecer la floculación, facilitando así la separación de partículas suspendidas y la reducción de la turbidez del agua de una manera innovadora u eficiente, su diseño y construcción permitirá a los estudiantes adquirir competencias técnicas en el uso de tecnologías para el tratamiento de aguas, brindándoles una preparación más sólida para afrontar desafíos ambientales y también a incentivarlos a promover el uso de tecnologías limpias que en este caso no requieren del uso de reactivos químicos.

Además, su uso no se restringirá solo al sector educativo, sino que también podrá ser utilizado en el diseño de proyectos comunitarios de saneamiento, ayudando así a mejorar la calidad del agua y beneficiando a la salud de la población.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Calcular, diseñar y construir un electrofloculador a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales con fines educativos.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Identificar los datos teóricos necesarios para el cálculo y diseño del electrofloculador a escala.
2. Determinar con base en la revisión bibliográfica, el diseño de electrofloculador que ofrezca mayor viabilidad y eficiencia para su construcción a escala piloto.
3. Ejecutar la construcción del prototipo a escala piloto con base en el diseño seleccionado.

CAPITULO II

2. METODOLOGÍA

2.1. UBICACIÓN DEL ELECTROFLOCULADOR

El electrofloculador a escala se instaló en el laboratorio de calidad del agua, ubicado en el edificio de Agropecuaria de la ULEAM. Debido a la poca disponibilidad de espacio en el laboratorio, se optó por un diseño del sistema que permitiera un fácil ensamblaje y desmontaje, facilitando así las practicas con este equipo cunado fuese necesario.

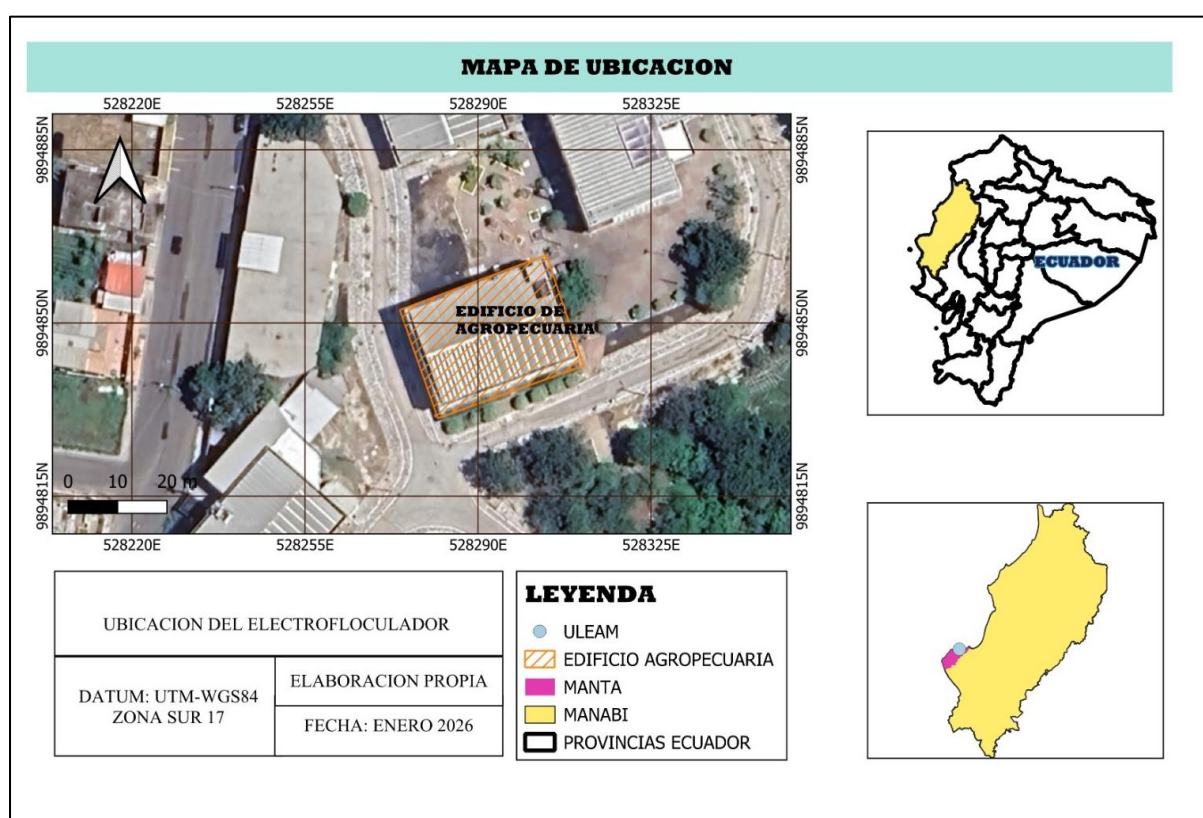


Figura 1. Ubicación del electrofloculador en la ULEAM.

2.2. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.

2.2.1. Investigación bibliográfica.

Se llevó a cabo una recopilación bibliográfica de procesos de cálculo, materiales, construcción y funcionamiento respecto al uso del electrofloculador para el tratamiento de aguas residuales, lo cuales se desarrollaron en la carrera de Ingeniería Ambiental de la ULEAM. A partir de esta revisión, se determinó la existencia de dos estudios previos. Entre ellos, destaca el trabajo del Ingeniero Kevin Villamarín, titulado: *“Depuración de las aguas residuales del centro de faenamiento de la ciudad de Manta mediante el sistema de electrofloculación, 2019”*. Dicha investigación servirá como guía principal para el cálculo, diseño y construcción del presente prototipo.

Villamarín, en el año 2019 elaboró un estudio en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, que consistió en el tratamiento de aguas residuales generadas en el centro de faenamiento de la ciudad de Manta mediante la aplicación del electrofloculador, para ello diseñó y construyó el electrofloculador para poder ser utilizados en el laboratorio, además se consideraron los criterios técnicos para la disposición de los electrodos, el tipo de fuente de energía y las condiciones de operación del sistema.

Para la elaboración se seleccionaron placas de aluminio como material de los electrodos, al presentar un comportamiento óptimo en la remoción de contaminantes, para su funcionamiento correcto, los electrodos de aluminio fueron dispuestos en paralelo favoreciendo a la distribución uniforme de los iones metálicos que se generan durante el proceso de electrofloculación.

Para la fuente de alimentación utilizaron corriente continua, con un voltaje de 110 V y una intensidad de 12 A, garantizando un suministro eléctrico estable durante el funcionamiento del electrofloculador; durante la etapa de calibración se tomaron en cuenta diferentes configuraciones de los cables de conexión, determinando que el uso de cables de mayor calibre reducía la resistencia eléctrica y mejoraba la operación del equipo.

Los resultados evidenciaron que el sistema de electrofloculación que elaboró permitió la remoción significativamente de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos presentes en el agua residual, demostrando que el diseño que se le haga al electrofloculador influye directamente en la eficiencia del proceso de tratamiento.

2.2.2. Diseño del electroflotador.

Una vez concluida la recopilación de información, se analizó la funcionalidad del electroflotador desarrollado por (Villamarín, 2019), lo cual permitió determinar los lineamientos técnicos para el diseño y construcción de un electroflotador con características similares. A continuación, se presenta el diagrama principal del electroflotador.

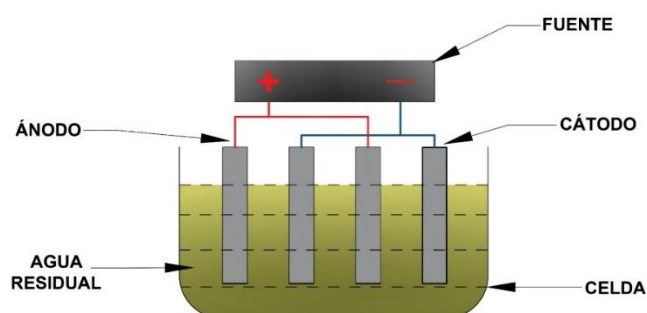


Figura 2. Diagrama inicial del electroflotador

Fuente: Delgado & Cardenas, 2025

La configuración del electroflotador se basa en electrodos monopares conectados en paralelo en donde todos los ánodos van a ir conectados entre sí, y de igual forma los cátodos. Este tipo conexión favorece a que no haya pérdida de voltaje al momento de operar el equipo.

2.2.3. Electrodo

Para la fabricación de los electrodos, el material seleccionado fue el aluminio debido a sus características favorables en sistemas de electrofloculación y a su eficacia en la reducción de la turbidez y color de aguas residuales. Además, se utilizó una geometría de placas planas, con el fin de que el sistema tenga una distribución uniforme de corriente eléctrica en toda la superficie que comprende el electrodo.

2.2.4. Cálculo del consumo del electrodo

El consumo de los electrodos se calculó con el objetivo de estimar la pérdida de masa del aluminio durante el proceso de electrofloculación. Se aplicó la Ley de Faraday, la cual determina la relación entre la cantidad de material disuelto con la energía aplicada y el tiempo de operación del prototipo.

El cálculo de la pérdida de masa del electrodo se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$m = \frac{Di \times t \times ma}{Val \times F}$$

Donde,

m. Masa de aluminio consumida,

Di. Densidad de corriente aplicada,

I. Corriente → 12 A

t. Tiempo de operación → 30 días x 24 h/día x 3600 s/h = 2592000 s

ma. masa molar del aluminio → 26,981g/mol

Val. Valencia del material → 3

F. Constante de Faraday → 96500 c/mol

a. Area del electrodo → 175 cm²

e. Espesor del electrodo → 0.1 cm

$$Di = \frac{I}{a} = 0.069 \text{ A/cm}^2$$

$$m = \frac{0,068 \times 259200 \times 26,98}{3 \times 96500}$$

$$m = \frac{4796001.9}{289500}$$

$$m = 16,56 \text{ g}$$

A continuación, se calculó de la vida útil del electrodo en años, mediante la siguiente expresión matemática:

$$\text{duración (años)} = \frac{m_{TE}}{\text{consumo mensual}}$$

m_{TE} Masa total del electrodo

V . Volumen del electrodo $\rightarrow 17.5 \text{ cm}^3$

p . Densidad del aluminio $\rightarrow 2,7 \text{ g/cm}^3$

$$m_{TE} = p \times V$$

$$m_{TE} = 2,7 \times 17,5 = 47,25 \text{ g}$$

$$\text{duración (mes)} = \frac{47,25 \text{ g}}{16.56 \text{ g/mes}}$$

$$\text{duración (mes)} = 2.85 \text{ meses}$$

$$2.85 \text{ meses} \times \frac{1 \text{ año}}{12 \text{ meses}} = 0,24 \text{ años}$$

2.2.5. Construcción del electrofloculador

Se tomó como referencia la metodología de configuración del electrofloculador elaborada por Villamarin (2019), adaptada a las condiciones del presente estudio, en donde se decidió duplicar las dimensiones del prototipo, es decir, el doble del tamaño ya que se trabajó con un volumen de 40 litros respectivos para cada muestra durante las pruebas experimentales. Para su construcción se utilizaron los siguientes materiales:

- Placas de aluminio con dimensiones específicas.
- Pinzas tipo lagarto para batería.
- Cable de batería N°8
- Cable de siete hilos N°8.
- Terminales de compresión de 6mm y 8mm.
- Tornillos y tuercas de 1/2 mm.
- Tornillo de sujeción de mayor longitud.
- Manguera de 1/2 pulgadas.
- Manguera de 5/8.

2.3. MUESTRAS

Para comprobar la eficiencia del electrofloculador a escala, se utilizaron cuatro tipos de muestras, con el fin de analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes calidades de aguas. A continuación, las muestras utilizadas:

- 40 litros de agua potable
- 40 litros de agua potable con 2 litros de Power sabor a frutos rojos.
- 40 litros de agua potable con 80g de café
- 40 litros de agua residual

La muestra de agua residual fue recolectada de un tanque Imhoff ubicado en el cantón Montecristi, comuna Los Bajos Pechiche.

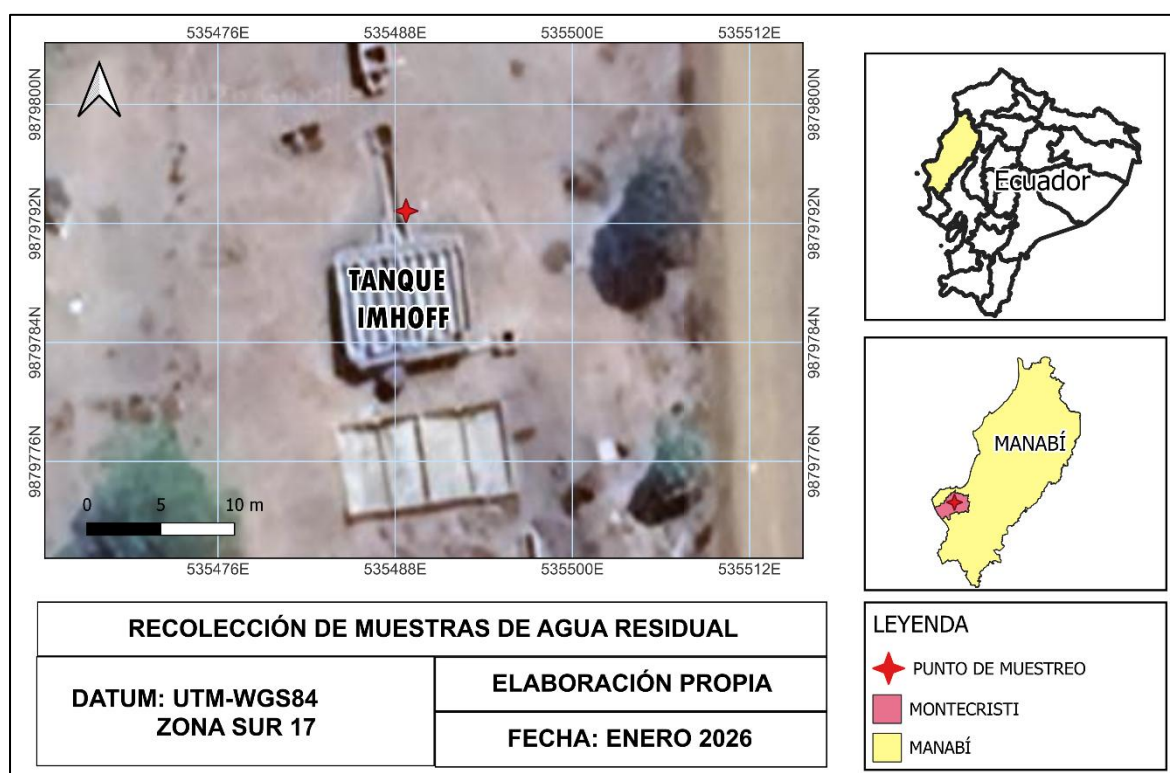


Figura 3. Recolección de muestras de aguas residuales en la comuna Los bajos Pechiche

2.3.1. Cálculo de las diluciones

Cálculo de Dilución de Power sabor a frutos rojos en agua potable

- 40 litros de agua
- 2 litros Power sabor a frutos rojos

$$Volumen\ total = 40 + 2 = 42\ L$$

$$\%dilución = \frac{2}{42} \times 100 = 4.76 \approx 5\%$$

Cálculo de la dilución de una mezcla de café en agua potable

- 40 litros de agua
- 80g de café

$$Concentración = \frac{80g}{40\ L} = 2\ g/L$$

$$\%de\ dilución = \frac{80g}{40000\ ml} \times 100 = 0.20\%$$

2.4. PROCESOS DE CALIBRACIÓN

Durante el proceso de calibración del prototipo se evaluó su funcionamiento y se determinó la fuente de energía más adecuada para su operación. Para ello, se efectuaron pruebas preliminares utilizando diferentes fuentes de alimentación de energía (inversor, cargador de batería y batería de carro) con un tiempo de duración de 25 minutos. Posteriormente se procedió a registrar las observaciones correspondientes de cada prueba, con el fin de comprar resultados obtenidos y seleccionar la mejor alternativa de desempeño.

2.5. MODIFICACIÓN DE LA CELDA

Se realizaron mediciones en las pruebas preliminares con una regla al finalizar cada uno de los ensayos, lo cual permitió determinar la altura de salida del agua dentro de la celda de tratamiento, permitiendo establecer la ubicación apropiada para la retención de los flóculos y asegurando una correcta salida del agua clarificada hacia la siguiente etapa de tratamiento.

Para este análisis, se empleó como referencia el principio de decantación del cono Imhoff, este instrumento cuenta con una escala graduada que permite calcular la cantidad de sólidos suspendidos en un litro de agua tras un tiempo de reposo.

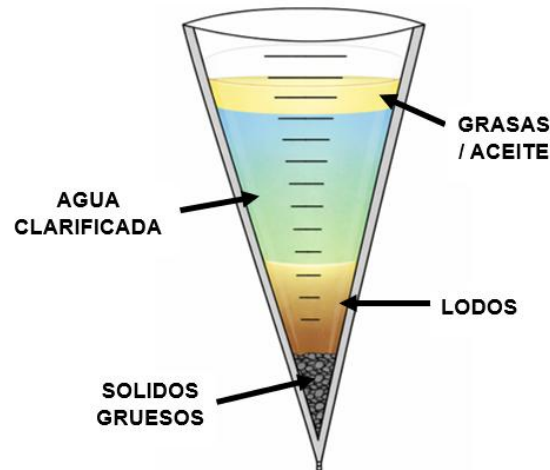


Figura 4. Cono Imhoff

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

Sin embargo, para este estudio dicho principio se utilizó de manera inversa; es decir, se midieron las alturas correspondientes del agua clarificada al finalizar cada uno de los ensayos del proceso de electrofloculación.

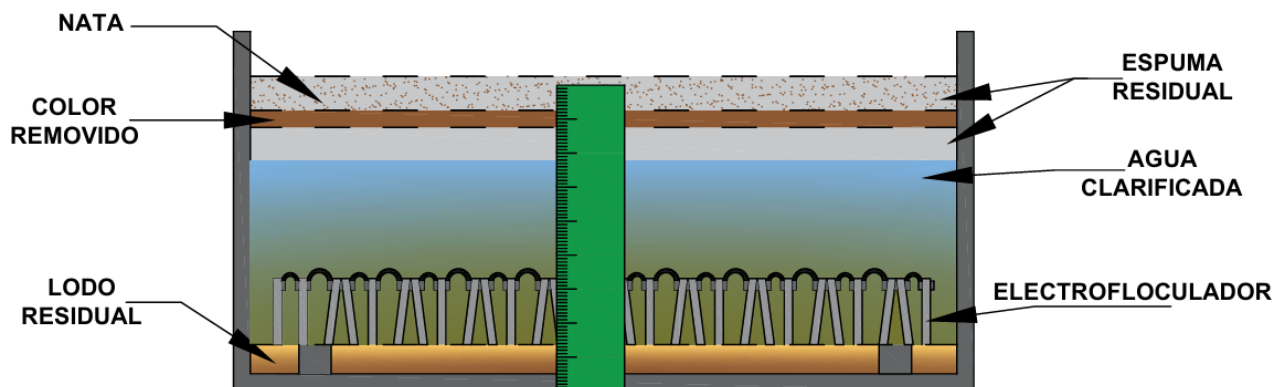


Figura 5. Esquema del proceso de decantación de forma inversa

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

2.6. Evaluación de la eficiencia del prototipo

Una vez calibrado el sistema, se efectuaron pruebas con diferentes disoluciones preparadas, donde se tomaron muestras cada 5 minutos con un tiempo total de depuración de 25 minutos, con el objetivo de evaluar la eficiencia del electrofloculador en la clarificación del agua. Además, se registraron las observaciones correspondientes a cada prueba, a fin de comprobar el desempeño del equipo.

Tabla 1. Tiempo de depuración aplicado a las diferentes muestras analizadas

MUESTRAS	TIEMPO DE TRATAMIENTO
Agua potable.	25 min
Dilución de 0.20% de café en 40 litros de agua potable	25 min
Dilución de 5% de Power sabor a frutos rojos en 40 litros de agua potable.	25 min
40 litros agua residual de la comuna Los Bajos Pechiche.	25 min

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

2.7. Determinación del porcentaje de clarificación

Se realizaron mediciones espectrofotométricas de absorbancia antes y durante el proceso de electrofloculación para cada una de las muestras analizadas. Primero se obtuvo el valor de absorbancia inicial ($\bar{A}_{inicial}$), correspondiente a la muestra sin tratamiento, mediante mediciones en siete longitudes de onda del espectro visible (400, 450, 500, 550, 600, 650 y 700 nm). Posteriormente, iniciado el proceso de electrofloculación se tomaron muestras cada 5 minutos, hasta completar un tiempo total de 25 minutos. El valor de absorbancia final ($\bar{A}_{final}$), correspondió al promedio de las siete lecturas obtenidas en cada intervalo de muestreo.

$$\%clarificación = \frac{\bar{A}_{inicial} - \bar{A}_{final}}{\bar{A}_{inicial}} \times 100$$

2.7.1. Cálculo del porcentaje de clarificación

- Agua residual recolectada de la comuna Los Bajos Pechiche, Cantón Montecristi

Tabla 2. Muestra 0, agua residual (sin tratamiento)

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	1,995
450	1,639
500	1,46
550	1,315
600	1,2
650	1,106
700	1,02
A inicial	1,391

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

Tabla 3. Muestra 1, agua residual (5 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,706
450	0,606
500	0,522
550	0,47
600	0,437
650	0,402
700	0,362
A Final	0,501

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{1,391 - 0,501}{1,391} \times 100 = 64\%$$

Tabla 4. Muestra 2, agua residual (10 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,549
450	0,473
500	0,408
550	0,372
600	0,342
650	0,321
700	0,294
A Final	0,394

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{1,391 - 0,394}{1,391} \times 100 = 72\%$$

Tabla 5. Muestra 3, agua residual (15 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,375
450	0,314
500	0,27
550	0,245
600	0,233
650	0,213
700	0,199
A Final	0,264

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{1,391 - 0,264}{1,391} \times 100 = 81\%$$

Tabla 6. Muestra 4, agua residual (20 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,29
450	0,249
500	0,214
550	0,194
600	0,182
650	0,171
700	0,162
A Final	0,209

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{1,391 - 0,209}{1,391} \times 100 = 85\%$$

Tabla 7. Muestra 5, agua residual (25 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,238
450	0,207
500	0,164
550	0,152
600	0,115
650	0,131
700	0,12
A Final	0,161

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{1,391 - 0,161}{1,391} \times 100 = 88\%$$

2.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizó mediante la comparación de las pendientes obtenidas del porcentaje de clarificación en relación con el tiempo de tratamiento. Estas pendientes fueron normalizadas dividiéndolas entre el número de longitudes de ondas evaluadas que en este caso serían 7 (400, 450, 500, 550, 600, 650, 700). Posteriormente se dividió entre 100, con el fin de obtener valores enteros y facilitar la comparación de los resultados. A partir de estos datos se calculó las incertidumbres y los grados de libertad ($n - 1$). Finalmente, la diferencia entre las pendientes se evaluó mediante una prueba estadística de una sola cola.

CAPITULO III

3. RESULTADOS

3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ELECTROFLOCULADOR.

El electrofloculador construido permitió operar con un volumen de 40L por muestra, cumpliendo con las condiciones de diseño establecida en la metodología. El diseño final estuvo conformado como se puede observar en la Tabla 1, por 29 placas de aluminio, cuyas dimensiones fueron establecidas en función del diseño del reactor y del área de contacto requerida para el proceso.

Tabla 8. Cantidad y medidas del electrodo de aluminio

Cantidad (u)	Medidas (cm)	
	Largo	35
29	Ancho	5
	Espesor	0.1

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

Posteriormente, se ilustran las dimensiones técnicas del electrodo de aluminio consideradas para la construcción del electrofloculador:

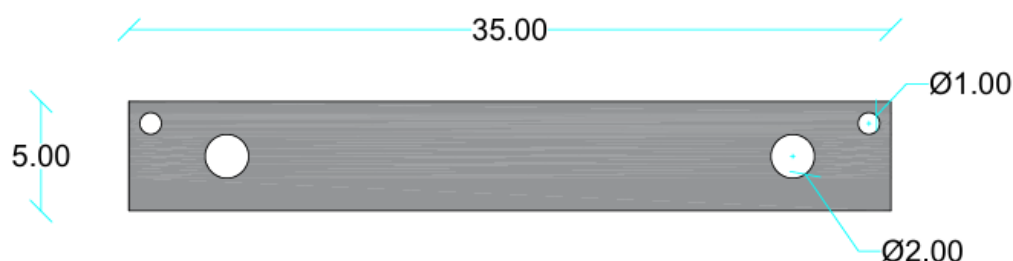


Figura 6. Dimensiones técnicas del electrodo

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

Las dimensiones de los electrodos y su disposición garantizaron un funcionamiento continuo y estable durante la ejecución de los ensayos, sin evidenciarse fallas estructurales, desprendimientos de material ni interrupciones eléctricas durante los periodos de operación evaluados.

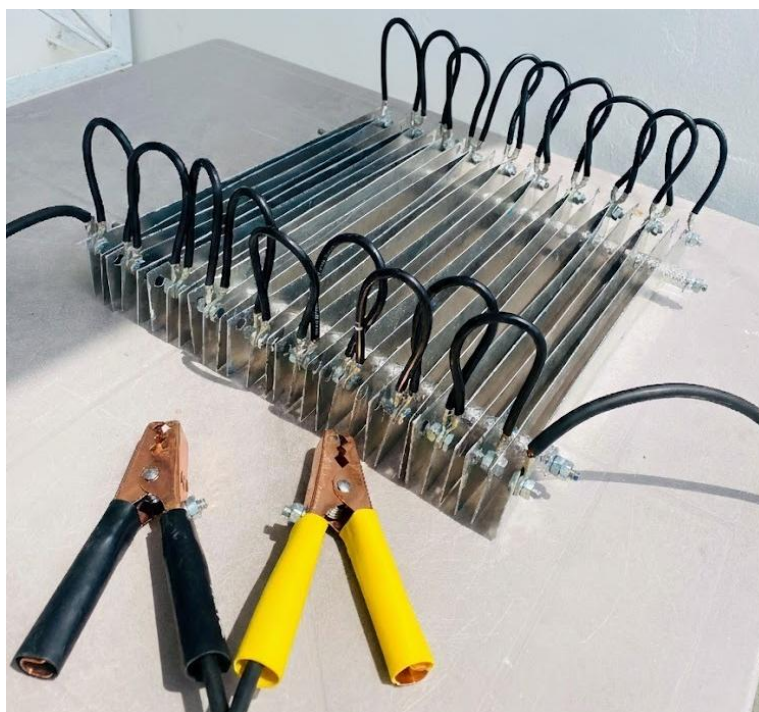


Figura 7. Versión final del electrofloclador

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

3.1.1. Consumo del electrodo

Al trabajar el electrofloclador con una corriente continua de 12 A, el electrodo de aluminio tuvo un consumo aproximado de 16,56 g/mes, esto sucede porque el aluminio se va disolviendo poco a poco durante el proceso, liberando iones Al^{+3} que permiten la formación de flóculos, removiendo así los contaminantes que hay dentro del agua.

En base al consumo, se estimó que la vida útil del electrodo es de alrededor de 2.85 meses (0.24 años), evidenciando que el material requiere ser reemplazado una vez que ya se ha desgastado para que siga teniendo un buen funcionamiento el sistema, los resultados evidenciaron que el consumo del electrodo aumenta con la corriente aplicada y el tiempo de operación, es por ello que estos factores deben considerarse en el diseño y funcionamiento del electrofloclador para asegurar un desempeño adecuado y una reposición oportuna del material.

3.2. CALIBRACIÓN

3.2.1. Selección de la fuente de energía

Durante la etapa de calibración se evaluó el desempeño del electroflotador utilizando diferentes fuentes de energía, en un tiempo de 25 minutos. Los resultados obtenidos mostraron diferencias significativas en el comportamiento operativo del sistema según la fuente empleada.

El mejor resultado que se observó fue con la batería de carro, ya que este pudo llegar a cumplir con el tiempo total de depuración sin interrupciones, evidenciándose las expectativas esperadas ya que al cumplir con el tiempo se pudo ver el agua tratada más clarificada y una formación considerada de flóculos, siendo seleccionada como la fuente de energía para los ensayos posteriores.

Tabla 9. Calibración del prototipo para la selección de la fuente de energía

PROCESO	TIEMPO DE TRATAMIENTO	OBSERVACIONES
PRUEBA Y CALIBRACIÓN CON INVERSOR N.A DVP- 1212	5 min	A los 5 minutos de operación, el inversor comenzó a sobrecalentarse y posteriormente dejó de funcionar, debido a que el electroflotador generó una resistencia elevada, lo que provocó la quema de un fusible del inversor.
PRUEBA Y CALIBRACIÓN CON CARGADOR DE BATERÍA CENTURY CB-50	10 min	En este caso, el equipo logró funcionar durante aproximadamente 10 minutos; sin embargo, se percibió un olor a quemado, por lo que no fue posible completar la prueba.
PRUEBA Y CALIBRACIÓN CON BATERÍA DE CARRO	25 min	Logro cumplir con el tiempo de depuración y se obtuvieron buenos resultados.

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

3.3. CELDA

Los resultados obtenidos tras la modificación de la celda mostraron que la instalación de la llave de salida a una altura de 6,5 cm fue adecuada para la recolección del agua clarificada, a esta altura se logró extraer el efluente correspondiente a la zona de mayor claridad, sin arrastre de flóculos ni interferencia con los sólidos sedimentados en el fondo de la celda.

Las mediciones finales evidenciaron una separación definida entre la fase sólida y el agua clarificada, lo que permitió confirmar que la ubicación de la salida garantizó la retención de los flóculos generados durante el proceso de electrofloculación y una adecuada calidad del agua recolectada para el análisis, asegurando así resultados confiables en la toma de muestras.

Al modificar la celda a la altura de 6,5 cm para colocar la llave que nos permitió recolectar el agua clarificada para la toma de muestras, obtuvimos que la altura fue la indicada pues nos permitió obtener la parte correcta del agua clarificada para una buena obtención de resultados.

3.4. EFICIENCIA DEL ELECTROFLOCULADOR

La eficiencia del electrofloculador se evaluó a partir de la observación del comportamiento de las diferentes muestras sometidas al proceso de tratamiento, los mejores resultados se obtuvieron en el agua residual y en la dilución de café con agua potable, donde se evidenció desde los primeros minutos la formación de flóculos y una progresiva clarificación del agua.

Por otro lado, en las muestras de agua potable y en la dilución de Power con sabor a frutos rojos, se observó la formación de flóculos y un cambio de tonalidad del agua, aunque sin una clarificación evidente.

Tabla 10. Condiciones de tratamiento y observaciones de las muestras evaluadas

MUESTRAS	TIEMPO DE TRATAMIENTO	OBSERVACIONES
Agua potable.	25 min	Desde que comenzó el tratamiento se pudo notar un cambio considerable en la turbidez del agua, posteriormente tomo color blanquecino y se generó una capa considerable de nata. Este tono, obviamente al ser de características uniformes, impide el paso de luz.
Dilución de 0.20% de café en 40 litros de agua potable.	25 min	A partir de los 13 minutos se observó la clarificación progresiva del agua, así como la formación de flóculos, acompañados de la presencia de una capa de espuma color café en la superficie.
Dilución del 5% de Power sabor a frutos rojos en 40 litros de agua potable.	25 min	No se observó una clarificación del agua, ya que se evidencio la aparición de un color blanquecino en la muestra, generado por la formación de flóculos durante el tratamiento. Situación similar a la del agua potable, habiéndose notado un proceso de clarificación en una exposición de tiempo superior.
40 litros agua residual de la comuna Los Bajos Pechiche.	25 min	El cambio se pudo apreciar desde el inicio del tratamiento, a los 5 minutos se observó una variación en el color del agua y conforme paso el tiempo se pudo evidenciar una mayor formación de flóculos y una capa superior de espuma o nata de elementos separados.

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

3.5. PORCENTAJE DE CLARIFICACIÓN

3.5.1. Muestras con clarificación alcanzada

- **Dilución de 0.20% de café con 40 litros de agua potable**

Los resultados obtenidos para la dilución de café mostraron un incremento progresivo del porcentaje de clarificación conforme avanzó el tiempo de tratamiento, durante los primeros 10 minutos, los valores registrados fueron inferiores al 3%, mientras que a partir de los 15 minutos se evidenció un aumento considerable del porcentaje de clarificación.

Al finalizar el tiempo total del tratamiento de 25 minutos, se alcanzó un porcentaje de clarificación del 79%, lo que indica una remoción significativa del color presente en la muestra, la evolución temporal del proceso se presenta en la figura 8, donde se observa una tendencia creciente del porcentaje de clarificación.

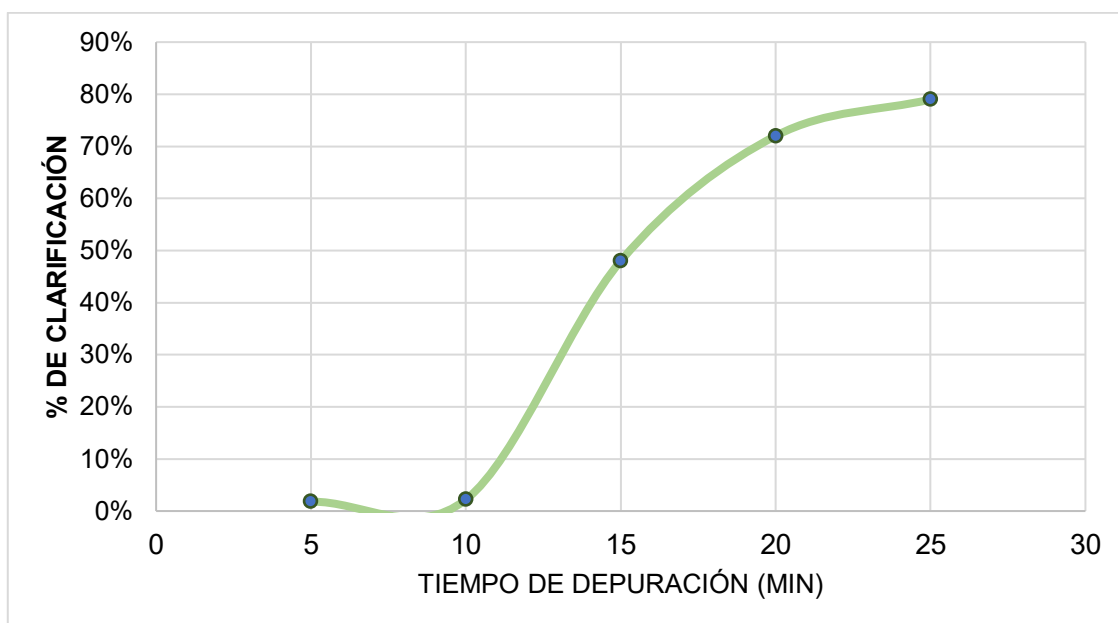


Figura 8. Variación del porcentaje de clarificación de la dilución de café con agua potable en función del tiempo de depuración

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

- **Agua residual**

El tratamiento con agua residual presentó los resultados más favorables del estudio, desde los primeros cinco minutos de operación se registró una disminución notable del color, alcanzando un porcentaje de clarificación del 64%.

El mismo continuó incrementándose de manera progresiva durante el tiempo de tratamiento, alcanzando un valor máximo del 88% al finalizar los 25 minutos, estos resultados evidencian una alta eficiencia del electrofloculador para remover el color de aguas residuales urbanas.

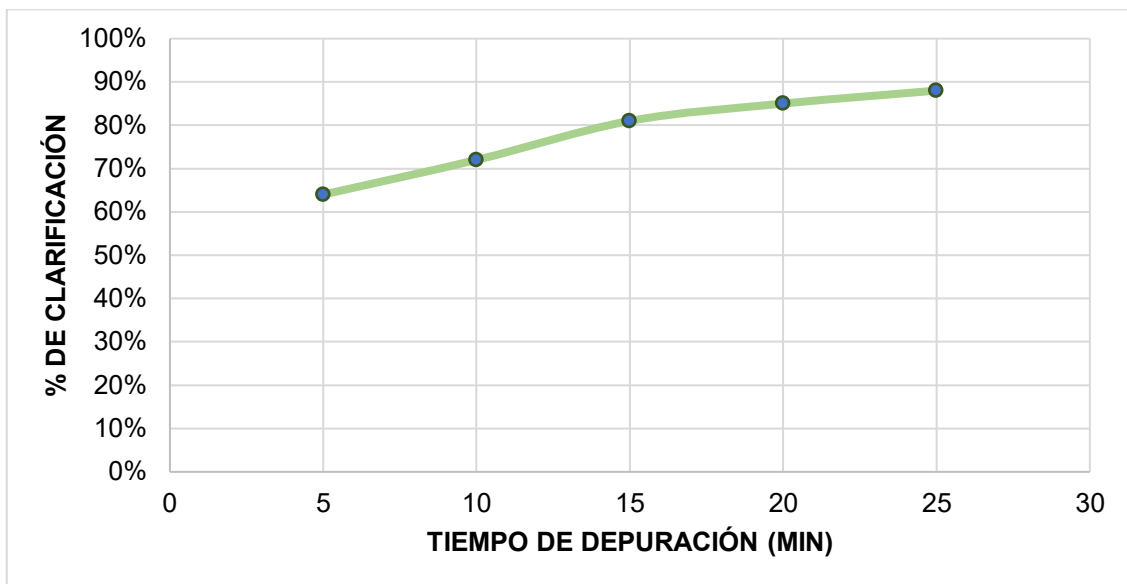


Figura 9. Variación del porcentaje de clarificación del agua residual en función del tiempo de depuración

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

3.5.2. Muestras con clarificación limitada

- **Agua potable**

En caso del agua potable, los resultados no fueron favorables en comparación con las otras muestras analizadas. A los 5 minutos de tratamiento se obtuvo un porcentaje de clarificación del 3%, sin embargo, a partir de los 10 minutos hasta los 25 minutos, se pudo evidenciar un marcado descenso en la claridad del agua, llegando hasta un valor de -2135%.

Debido a que no se observó clarificación del agua a los 20 minutos, se decidió extender el tiempo de tratamiento a 5 minutos adicionales, llegando entonces a los 30 minutos de depuración, en donde se pudo registrar un ligero aumento en la clarificación, obteniendo un valor de -1683%. Lo cual indica la necesidad de un mayor tiempo de exposición para lograr fines esperados.

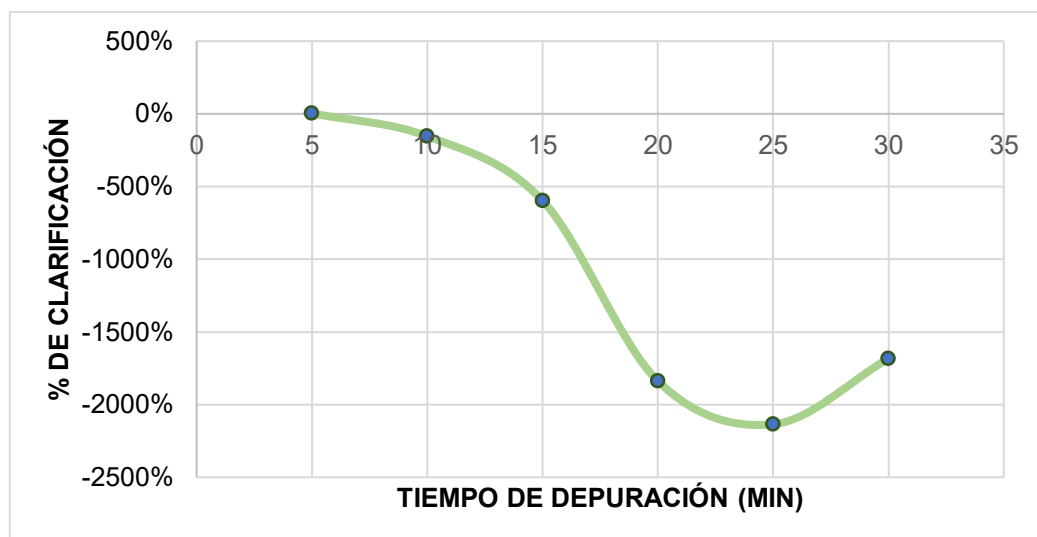


Figura 10. Variación del porcentaje de clarificación del agua potable en función del tiempo de depuración

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

- **Dilución de 5% de power sabor a frutos rojos en 40 litros de agua potable**

En la dilución de power sabor a frutos rojos, los resultados obtenidos mostraron un comportamiento no uniforme del porcentaje de clarificación a lo largo del tiempo, si bien en los primeros minutos se registraron valores elevados de un 65%, luego fueron disminuyendo progresivamente conforme avanzó el tratamiento, llegando a valores bajos hasta un -330%.

Debido a que no se visualizó clarificación, se decidió extender el tiempo de tratamiento en 10 minutos adicionales, llegando entonces a los 35 minutos de depuración, en donde se pudo registrar un ligero aumento en la clarificación, obteniendo un valor de -319%. Condición similar a lo descrito en el ítem anterior.



Figura 11. Variación del porcentaje de clarificación de la dilución de Power rojo con agua potable en función del tiempo de depuración

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

3.6. PROBABILIDAD T (UNA COLA)

3.6.1. Café

Nótese que en la Tabla 11 se observa, que las mayorías de las comparaciones realizadas muestran que hay diferencias estadísticamente significativas entre sí, debido a que el porcentaje de probabilidad t es $<5\%$; lo que indica que no son similares desde el punto de vista de estadístico. La única excepción corresponde a la comparación entre las muestras tratadas durante 5 y 10 minutos, la cual presenta una probabilidad t (una cola) del 31,29% siendo $>5\%$, lo cual indica que ambas muestras son estadísticamente similares.

Tabla 11. Comparación estadística entres los tiempos de la muestra de café mediante prueba t de una cola

Comparación de muestras	Probabilidad t (1 cola)
5 min - 10 min	31,29%
5 min - 15 min	0,00%
5 min - 20 min	0,00%
5 min - 25 min	0,00%
10 min - 15 min	0,00%
10 min - 20 min	0,00%
10 min - 25 min	0,00%
15 min - 20 min	0,00%
15 min - 25 min	0,00%
20 min - 25 min	0,00%

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

3.6.2. Agua residual

Como se visualiza en la Tabla 12, los valores de probabilidad t (una cola) inferiores al 5% corresponden a las comparaciones entre las muestras de 5 min – 15 min (0,83%), 5 min – 25 min (0,32%), y 10 min – 25 min (4,21%). Estos valores indican que las muestras no son estadísticamente similares, es decir, existen diferencias significativas entre los datos analizados.

Por el otro lado, aquellos valores con un valor de t (una cola) superior al 5% corresponden a las comparaciones entre las muestras de 5 min – 10 min (7,16%), 10 min – 15 min (12,02%), 10 min – 20 min (8,57%), 15 min – 20 min (35,20%), 15 min – 25 min (24,87%) y 20 min – 25 min (39,92%). Estos resultados indican que ambas muestras estadísticamente son similares, es decir, no existen diferencias significativas entre los datos analizados.

Tabla 12. Comparación estadística entre los tiempos de la muestra de agua residual mediante prueba t de una cola.

Comparación de muestras	Probabilidad t (1 cola)
5 min - 10 min	7,16%
5 min - 15 min	0,83%
5 min - 20 min	1,02%
5 min - 25 min	0,32%
10 min - 15 min	12,02%
10 min - 20 min	8,57%
10 min - 25 min	4,21%
15 min - 20 min	35,20%
15 min - 25 min	24,87%
20 min - 25 min	39,92%

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

CAPITULO IV

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la investigación evidencian que la eficiencia del proceso de electrofloculación va a depender del tipo de agua tratada, carga del contaminante presente y del tiempo de tratamiento aplicado, además el comportamiento observado en las 4 tipos de muestras que fueron analizadas concuerda con lo reportado en estudios previos sobre esta tecnología, los cuales destacan que la electrofloculación presenta mejores resultados en muestras con mayor concentración de sólidos suspendidos y materia orgánica.

En el caso del agua residual urbana, se llegó a un porcentaje de clarificación máximo del 88% a los 25 minutos de tratamiento, lo que demuestra una alta eficiencia del electrofloculador a escala piloto; este resultado es consistente con lo reportado por (Mejía *et al.* 2006), quienes indican que la electrofloculación tiene un desempeño favorable en aguas residuales debido a la abundancia de contaminantes que facilitan la neutralización de cargas y la formación de flóculos. De manera similar, Morales y Acosta (2010) señalan que la presencia de sólidos suspendidos y coloides favorece la agregación de partículas y su posterior separación por flotación o sedimentación.

El incremento progresivo del porcentaje de clarificación conforme aumentó el tiempo de tratamiento evidencia que el proceso electroquímico requiere de un período mínimo para alcanzar su máxima eficiencia, concordando con lo descrito por (Boinpally *et al.*, 2023), quienes señalan que tiempos de retención mayores permiten una mayor generación de hidróxidos metálicos y una mejor interacción entre los contaminantes y los coagulantes formados in situ. Así mismo, el análisis estadístico realizado mediante la prueba t de una cola mostró que, a partir de ciertos intervalos de tiempo, las diferencias entre muestras no fueron estadísticamente significativas, lo que indica una estabilización del proceso de clarificación.

En la dilución de café con agua potable, los resultados mostraron un comportamiento similar al del agua residual, aunque con una eficiencia inicial más baja, durante los primeros 10 minutos, los porcentajes de clarificación fueron inferiores al 3%, sin embargo, a partir de los 15 minutos se observó un incremento considerable, alcanzando un 79% de clarificación al finalizar los 25 minutos. Este comportamiento puede explicarse por la naturaleza orgánica del colorante presente en el café, el cual

puede ser removido eficazmente mediante procesos de coagulación y floculación, tal como ha sido reportado en estudios previos sobre la remoción de color en aguas con compuestos orgánicos (Mejía *et al.* 2006; Morales y Acosta 2010).

Caso contrario se vio en la muestra de agua potable, los resultados no fueron favorables, observándose valores negativos de clarificación conforme aumento el tiempo de tratamiento. Este fenómeno ha sido reportado en la literatura, donde se indica que la electrofloculación no resulta eficiente en aguas con baja concentración de contaminantes, ya que la generación de hidróxidos metálicos puede incrementar la turbidez del agua en lugar de reducirla (Beltrán, 2015). La ausencia de suficientes partículas para ser removidas provoca que los flóculos formados permanezcan en suspensión, afectando negativamente la claridad del agua tratada. Esto se da por la generación de especies coloidales y microburbujas que son producidas durante las reacciones electroquímicas, las cuales se mantuvieron suspendidas en el volumen de la muestra utilizada.

Un comportamiento similar se observó en la dilución de Power sabor a frutos rojos, donde, a pesar de la formación de flóculos, no se logró una clarificación sostenida del agua. Esto puede atribuirse a la presencia de colorante altamente solubles, los cuales presenta una mayor estabilidad química y no son fácilmente removidos mediante procesos de electrofloculación, tal como señalan (Díaz *et al.* 2021). Estos resultados confirman que la efectividad de la electrofloculación depende en gran medida de la naturaleza del contaminante presente en el agua.

Adicionalmente la modificación de la celda de tratamiento, mediante la instalación de salida del agua clarificada a una altura de 6,5 cm, resultó determinante para la obtención de muestras representativas, ya que permitió recolectar el efluente correspondiente a la zona de mayor claridad sin arrastre de flóculos, ni sólidos sedimentados, este ajuste operativo ayudó a mejorar la confiabilidad de los resultados obtenidos durante los ensayos experimentales.

En conjunto, los resultados obtenidos y su contrastación con estudios previos permiten confirmar que la electrofloculación constituye una tecnología eficiente y adecuada para la clarificación de aguas residuales urbanas y agua con elevada carga orgánica. No obstante, el proceso presenta limitaciones cuando se aplica a matrices con baja concentración de contaminantes o con la presencia de colorantes altamente solubles, estos hallazgos respaldan el uso del electrofloculador construido como una herramienta experimental y educativa, así como su potencial integración dentro de un tren de tratamiento de aguas residuales a escala piloto.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió calcular, diseñar y construir un electrofloculador a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales urbanas, cumpliendo con el objetivo general planteado y demostrando la viabilidad técnica del sistema con fines educativos experimentales, el prototipo construido operó de manera estable con un volumen de 40 litros por muestra, sin presentar fallas estructurales ni interrupciones eléctricas en los ensayos realizados.

El uso de electrodos de aluminio en configuración monopolar en paralelo resultó adecuado para el proceso de electrofloculación, permitiendo una distribución uniforme de corriente eléctrica y favoreciendo la generación de flóculos. El consumo del electrodo fue de aproximadamente 16,56 g/mes, lo que evidenció que el electrodo de aluminio, se consume de manera progresiva durante el proceso de electrofloculación, siendo este desgaste parte esencial del funcionamiento del sistema. Durante la etapa de calibración, se determinó que la batería de vehículo fue la fuente de energía más eficiente y segura para la operación continua de este electrofloculador a escala, ya que permitió completar el tiempo total de tratamiento sin sobrecalentamientos ni fallas a diferencia del inversor y del cargador de batería evaluados. Como se evidencia en el estudio de Villamarín (2019), una fuente estable de energía o un transformador eficiente es lo adecuado para el proceso.

La modificación de la celda de tratamiento, mediante la instalación de la salida de agua clarificada a una altura de 6,5 cm, fue un factor clave para la obtención de muestras representativas, ya que permitió recolectar el efluente con mayor claridad sin arrastre de flóculos ni sólidos sedimentados, garantizando la confiabilidad de los resultados. En cuanto a la eficiencia del sistema, los mejores resultados se obtuvieron en el tratamiento de agua residual urbana y en la dilución de café con agua potable, alcanzándose porcentajes de clarificación del 88% y 79% respectivamente, lo que demuestra una alta capacidad del electrofloculador para la remoción de color y turbidez en matrices con mayor carga contaminante.

Por el contrario, en las muestras de agua potable y en dilución de Power sabor a frutos rojos se observó una clarificación limitada, lo que indica que la electrofloculación no resulta eficiente para aguas con baja concentración de contaminantes o con presencia de colorantes solubles, evidenciando que la efectividad del proceso depende significativamente, de la composición del agua a tratar.

Finalmente, los resultados obtenidos confirman que la electrofloculación es una tecnología limpia, eficiente y adaptable, con alto potencial para ser integrada como parte de un tren de tratamiento de aguas residuales, además de ser una herramienta valiosa para que los estudiantes de la carrera de Ingeniería Ambiental puedan realizar prácticas experimentales más apegadas a la realidad.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar el uso del electrofloculador construido como equipo de prácticas en los laboratorios de la carrera de Ingeniería Ambiental, con el fin de fortalecer la formación técnica de los estudiantes en tecnología de tratamiento de aguas residuales.
- Se sugiere utilizar una fuente de corriente continua estable y regulable, en lugar de baterías de vehículo, debido a que estas últimas limitan los ensayos consecutivos al tener que cargarse.
- Para futuros estudios, se sugiere evaluar otros parámetros de calidad del agua, tales como turbidez, DBO, DQO, sólidos suspendidos y coliformes para poder tener una evaluación más integral de la eficiencia del sistema. Así como en las prácticas que se efectuarán con el equipo.
- Se recomienda realizar un nuevo estudio enfocado en el tratamiento de agua potable y bebidas con colorantes, utilizando diferentes longitudes de onda para la medición de la absorbancia, mayor tiempo de exposición y una fuente de energía continua estable y regulable, con el propósito de comprender mejor el comportamiento de la clarificación y los cambios de color durante el proceso de electrofloculación.

- Finalmente, se recomienda promover el desarrollo de proyectos similares, de modo que los estudiantes de Ingeniería Ambiental tengan a su disposición más herramientas para que puedan realizar prácticas con distintos tipos de tratamiento de aguas residuales, lo que les permitirá aplicar sus conocimientos teóricos aprendidos en clases y contribuir a su formación como profesionales cada vez más competentes.

6. BIBLIOGRAFIA

- Beltrán González, KE. 2015. Diseño conceptual y construcción de un electrofloculador controlado por LabVIEW. Tesis para optar al título de Ingeniería Ambiental. Universidad Santo Tomás (CO). 76p. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/302357083_DISENO_Y_CONSTRUCCION_DE_UN_ELECTROCOAGULADOR_CONTROLADO_POR_LABVIEW/citation/download. Consultado el 14 de ene. 2026.
- Condorchem Envitech. 2025. Electrocoagulación en aguas residuales: funcionamiento y aplicaciones. Condorchem Envitech (blog). Disponible en: [Electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales | Condorchem Enviro Solutions](#) Consultado el 14 de ene. 2026.
- CorpQuality Services. 2025. Electrofloculación: la revolución eléctrica en el tratamiento de aguas residuales. CorpQuality Services (blog). Disponible en: [Corporación Quality Services - Electrofloculación: La revolución eléctrica en el tratamiento de aguas residuales](#). Consultado el 14 de ene. 2026.
- Egusquiza Córdova, MA. 2023. Tratamiento de aguas residuales domésticas. Trabajo de suficiencia profesional. Lima (PE), Universidad Nacional de Ingeniería. 96p.
- Genesis Water Tech. 2024. Un punto de inflexión sostenible: electrocoagulación en el tratamiento de aguas industriales. Genesis Water Tech (blog). Publicado el 23 de febrero de 2024. Disponible en: <https://es.genesiswatertech.com/blog-post/sustainable-game-changer-electrocoagulation-in-industrial-water-treatment/> Consultado el 14 de ene. 2026.
- Morales Posada, NB; Acosta Niño, GE. 2010. Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánica. Ciencia e Ingeniería Neogranadina 20(1):33-44. DOI: <https://doi.org/10.18359/rcin.282>.
- Naciones Unidas. 2023. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: alianzas y cooperación por el agua. Datos, cifras y ejemplos de acción. París, UNESCO; ONU-Agua. 16 p.
- ONU-Hábitat; OMS. 2021. Progres son Wastewater Treatment – 2021 Iupdate. Disponible en: https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/10/sdg6_indicator_report_631_progress-on-wastewater-treatment_2021_es.pdf. Consultado el 12 may. 2025.

- Peña, S; Mayorga, J; Montoya, R. 2018. Propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Yaguachi (Ecuador). *Ciencia e Ingeniería* 39(2):161-168.
- Restrepo Mejía, AP; Arango Ruiz, A; Garcés Giraldo, LF. 2006. La electrofloculación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción + Limpia* 1(2):58-77.
- Reynolds, KA.2002. Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica: identificación del problema. *Agua Latinoamérica*. Septiembre-octubre:1-4.
- Rodríguez Díaz, YJ; Fuentes Guevara, MD; Beleño Díaz, OD; Montoya Armenta, LH. 2021. Electrofloculación como alternativa de tratamiento de aguas residuales mixtas originadas en la industria del procesamiento de lácteos y cárnicos. *Tecnura* 25(67):26-39. DOI: 10.14483/22487638.15769.
- Rodríguez Pimentel, H. 2017. Las aguas residuales y sus efectos contaminantes. *Agua (blog)*. Publicado el 13 de marzo de 2017. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>. Consultado el 11 de mayo de 2025.
- Sáenz-Arias, S.; Garcés-Ordóñez, O.; Córdoba-Meza, T.; Blandón, L.; Espinoza-Díaz, L.F.; Vivas-Aguas, L.J.; Canals, M.2023. Contaminación por vertidos de aguas residuales: una revisión de las interacciones microorganismos- microplásticos y sus posibles riesgos ambientales en aguas costeras colombianas. *Ecosistemas* 32(1):2489. DOI: 10.7818/ECOS.2489.
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); Asociación Nacional de Entidades de Agua y Saneamiento de México (ANEAS). 2024. Estrategias para la implementación del reúso de aguas residuales tratadas con fines de uso y consumo humano. Ciudad de México (MX), UNAM, Instituto de Ingeniería; ANEAS. 204 p.
- WWF Ecuador. 2022. Contaminación por plásticos: el terreno problema de los océanos. WWF Ecuador (sitio web). Publicado el 8 de junio de 2022. Disponible en: <https://www.wwf.org.ec/?375810/Que-tan-grave-es-la-contaminacion-por-plasticos>. Consultado el 12 de may. 2025.
- Villamarín Mendoza, KA. 2019. Depuración de las aguas residuales del centro de faenamiento de la ciudad de Manta (COGA MANTA S.A.), mediante el sistema de electrofloculación. Tesis Ing. Manta, Ecuador, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. 49 p.

Boinpally, S; Kolla, A; Kainthola, J; Koali, R; Vermuri, J. 2023. Astate-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. *Water Cycle* 4:26-36. DOI: 10.1016/j.watcyc.2023-01.001.

7. ANEXOS

ANEXO 1. Materiales para la construcción del electrofloculador



Materiales utilizados para la construcción del electrofloculador

ANEXO 2. Ensamblaje de los materiales del electrofloculador



Construcción de la base del electrofloculador

ANEXO 3. Pruebas de calibración con diferentes fuentes de energía



Pruebas preliminares para la selección de la fuente de energía

ANEXO 4. Muestra de Dilución de una mezcla de 80g de café



Mezcla de 80 gramos de café con 40 litros de agua potable antes de comenzar el tratamiento.

ANEXO 5. Muestra de Dilución de 2L de Power sabor a frutos rojos



Mezcla de 2 litros de Power sabor a frutos rojos con 40 litros de agua potable antes de comenzar el tratamiento.

ANEXO 6. Recolección de agua residual del Tanque Imhoff de la comuna Los Bajos Pechiche, Cantón Montecristi



Vista al cantón Montecristi para la recolección de muestras de agua residual

ANEXO 7. Muestra de 40 litros de agua residual



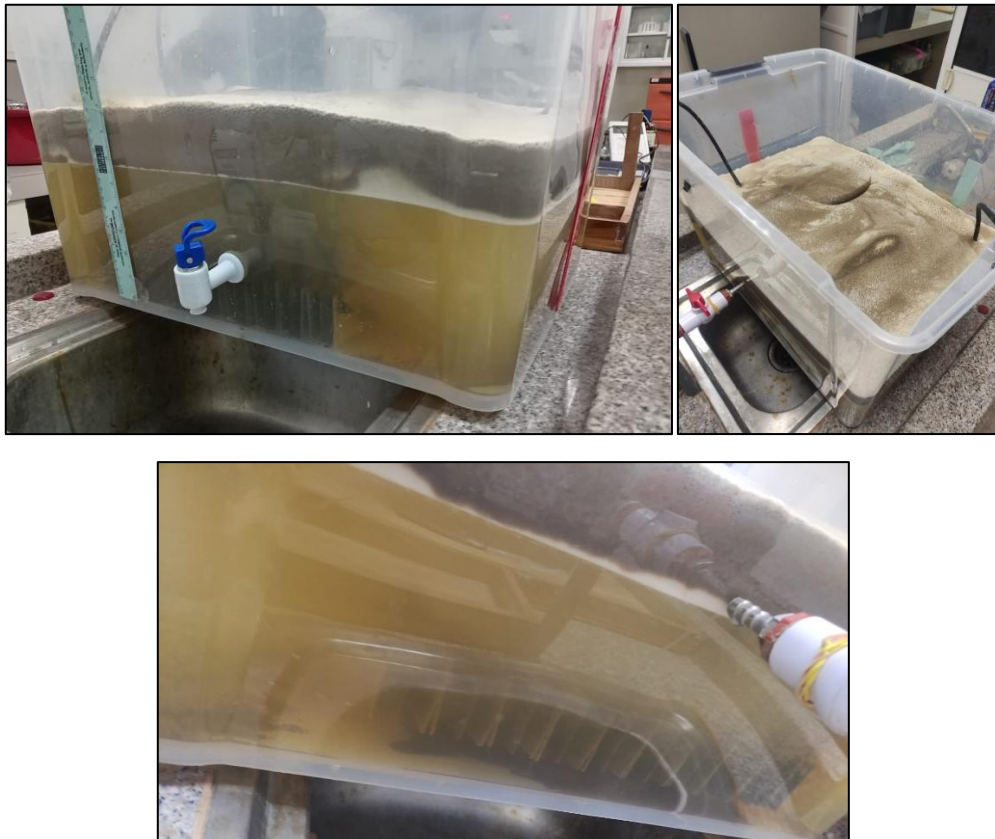
Colocación de la muestra de los 40 litros de agua residual en la celda de tratamiento

ANEXO 8. Muestra de 40 litros de agua potable



Colocación de la muestra de los 40 litros de agua potable en la celda de tratamiento

ANEXO 9. Resultados del proceso de electrofloculación en la muestra de dilución de café



Resultados fotográficos de la eficiencia del electrofloculador en la remoción del color de la dilución del café al 0.20%

ANEXO 10. Resultados del proceso de electrofloculación en la muestra de dilución de Power



Resultados fotográficos de la eficiencia del electrofloculador en la remoción del color de la dilución del Power al 5%

ANEXO 11. Resultados del proceso de electrofloculación en la muestra de agua residual



Resultados fotográficos de la eficiencia del electrofloculador en la remoción del color del agua residual.

ANEXO 12. Resultados del proceso de electrofloculación en la muestra de agua potable



Resultados fotográficos del proceso de electrofloculación en la remoción del color del agua potable.

ANEXO 12. Cálculo del porcentaje de clarificación del agua potable

Tabla 13. Muestra 0 sin tratamiento.

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,026
450	0,016
500	0,01
550	0,007
600	0,002
650	0,001
700	0,001
A inicial	0,009

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

Tabla 14. Muestra 1 agua potable (5 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,026
450	0,016
500	0,01
550	0,007
600	0,002
650	0,001
700	-0,001
A final	0,009

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{0,009 - 0,008}{0,009} \times 100 = 3\%$$

Tabla 15. Muestra 2 agua potable (10 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,048
450	0,029
500	0,02
550	0,014
600	0,008
650	0,04
700	0,001
A final	0,023

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{0,009 - 0,023}{0,009} \times 100 = -154\%$$

Tabla 16. Muestra 3 agua potable (15 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,108
450	0,092
500	0,071
550	0,057
600	0,045
650	0,037
700	0,029
A final	0,063

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{0,009 - 0,063}{0,009} \times 100 = -597\%$$

Tabla 17. Muestra 4 agua potable (20 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,307
450	0,238
500	0,191
550	0,157
600	0,129
650	0,108
700	0,091
A final	0,174

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{0,009 - 0,174}{0,009} \times 100 = -1838\%$$

Tabla 18. Muestra 5 agua potable (25 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,351
450	0,275
500	0,221
550	0,18
600	0,149
650	0,126
700	0,106
A final	0,201

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{0,009 - 0,201}{0,009} \times 100 = -2135\%$$

Tabla 19. Muestra 6 agua potable (30 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,28
450	0,217
500	0,174
550	0,14
600	0,12
650	0,103
700	0,089
A Final	0,160

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{0,009 - 0,160}{0,009} \times 100 = -1683\%$$

Tabla 20. Resultados del tratamiento del agua potable

Tiempo de depuración (min)	% de clarificación
5	3%
10	-154%
15	-597%
20	-1838%
25	-2135%
30	-1683%

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025**ANEXO 13.** Cálculo del porcentaje de clarificación de la dilución de café al 0,20 %**Tabla 21.** Muestra 0 sin tratamiento.

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	1
450	1
500	1
550	1
600	1,783
650	1,462
700	1,188
A inicial	1,205

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

Tabla 22. Muestra 1 de la dilución de café con agua potable (5 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	1
450	1
500	1
550	1
600	1,718
650	1,413
700	1,153
A final	1,183

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{1,205 - 1,183}{1,205} \times 100 = 1,8\%$$

Tabla 23. Muestra 2 de la dilución de café con agua potable (10 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	1
450	1
500	1,688
550	1,374
600	1,128
650	1,131
700	0,929
A final	1,179

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{1,205 - 1,179}{1,205} \times 100 = 2,2\%$$

Tabla 24. Muestra 3 de la dilución de café con agua potable (15 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	1
450	0,969
500	0,696
550	0,546
600	0,456
650	0,375
700	0,313
A final	0,622

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{1,205 - 0,622}{1,205} \times 100 = 48\%$$

Tabla 25. Muestra 4 de la dilución de café con agua potable (20 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,999
450	0,43
500	0,28
550	0,21
600	0,168
650	0,139
700	0,116
A final	0,335

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{1,205 - 0,335}{1,205} \times 100 = 72\%$$

Tabla 26. Muestra 5 de la dilución de café con agua potable (25 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,866
450	0,309
500	0,187
550	0,136
600	0,109
650	0,091
700	0,077
A final	0,254

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{1,205 - 0,254}{1,205} \times 100 = 79\%$$

Tabla 27. Resultados del tratamiento de agua con dilución de café

Tiempo de depuración	% de clarificación
5 min	1,8%
10 min	2,2%
15 min	48%
20 min	72%
25 min	79%

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

ANEXO 14. Cálculo del porcentaje de clarificación de la dilución del power al 5%

Tabla 28. Muestra 0 sin tratamiento.

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,335
450	0,278
500	0,323
550	0,238
600	0,15
650	0,135
700	0,123
A inicial	0,226

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

Tabla 29. Muestra 1 de la dilución de Power Rojo con agua potable (5 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,113
450	0,104
500	0,183
550	0,105
600	0,023
650	0,013
700	0,016
A Final	0,080

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{0,226 - 0,254}{0,226} \times 100 = 64\%$$

Tabla 30. Muestra 2 de la dilución de Power Rojo con agua potable (10 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,213
450	0,176
500	0,253
550	0,152
600	0,063
650	0,049
700	0,041
A Final	0,135

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{0,226 - 0,135}{0,226} \times 100 = 40\%$$

Tabla 31. Muestra 3 de la dilución de Power Rojo con agua potable (15 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,576
450	0,462
500	0,453
550	0,325
600	0,209
650	0,172
700	0,143
A Final	0,334

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{0,226 - 0,334}{0,226} \times 100 = -48\%$$

Tabla 32. Muestra 4 de la dilución de Power Rojo con agua potable (20 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	0,858
450	0,689
500	0,628
550	0,469
600	0,335
650	0,278
700	0,233
A Final	0,499

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{0,226 - 0,449}{0,226} \times 100 = -121\%$$

Tabla 33. Muestra 5 de la dilución de Power Rojo con agua potable (25 minutos de tratamiento).

Longitud de onda (nm)	Absorbancia (A)
400	1,127
450	1,233
500	1,137
550	0,95
600	0,803
650	0,725
700	0,325
A Final	0,900

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

$$\%clarificación = \frac{0,226 - 0,900}{0,226} \times 100 = -298\%$$

ANEXO 14. Resultados del porcentaje de clarificación del agua residual

Tabla 34. Resultados del tratamiento del agua residual de la comuna Los Bajos Pechiche, Cantón Montecristi

Tiempo de depuración (min)	% de clarificación
5 min	64%
10 min	72%
15 min	81%
20 min	85%
25 min	88%

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025

Manual de uso del Electrofloclador

OBJETIVO

Guiar paso a paso al usuario en el uso correcto del electrofloclador a escala piloto, desde la preparación del equipo hasta la finalización del proceso, garantizando una operación segura, eficiente y reproducible durante el tratamiento de aguas residuales urbanas con fines educativos y experimentales.

Lista de control de requisitos

Antes de iniciar el uso, identifique los siguientes elementos	Medidas de seguridad obligatorias antes de operar el equipo
Celda de electrofloculación.	Usar guantes.
Electrodos de aluminio tipo placa.	Usar bata de laboratorio.
Pinzas tipo lagarto.	Usar zapatos cerrados.
Fuente de corriente continua.	La batería debe estar en una superficie de madera seca y estable.
Espectrofotómetro.	No manipular los electrodos con el sistema energizado.

Procedimiento de uso paso a paso

PASO 1: Preparación del equipo



Coloca los electrodos dentro de la celda y verificar que estén limpios, bien sujetos y separados de forma uniforme, también se debe pegar reglas en la celda por la parte de afuera para medir los centímetros de la nata.

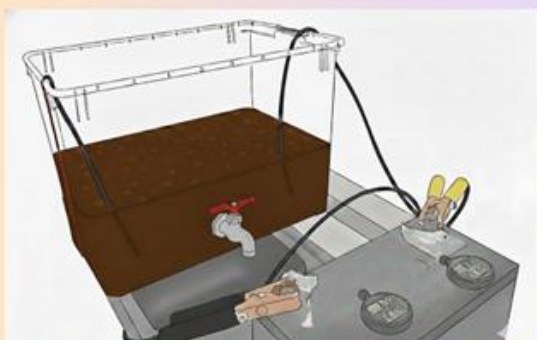
PASO 2: Preparación del agua a tratar



Medir el volumen de agua a tratar (40L), si se trata de una muestra preparada (café, bebida colorante), asegurarse de que esté correctamente homogenizada en el tanque y luego abrir la llave para el llenado de la celda.

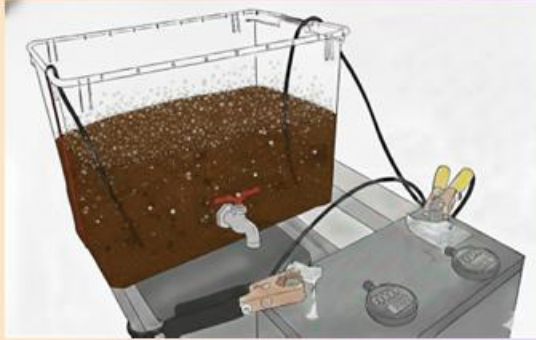
Se debe asegurar que todos los electrodos estén sumergidos y revisar que el agua no sobrepase la salida del reactor.

PASO 3: Encendido del sistema



Los lagartos positivo y negativo tienen que estar conectados a la fuente de energía (batería de carro), al mismo tiempo se debe iniciar el cronómetro para comenzar con el proceso.

PASO 4: Operación del electrofloculador



Mantener el sistema en funcionamiento durante 25 minutos, durante el proceso observar:

- Formación de burbujas de gas
- Aparición progresiva de flóculos
- Cambio visual en la turbidez del agua

PASO 5: Toma de muestra



Para realizar los respectivos análisis se debe tomar una muestra en un cubeto de vidrio de 45 x 12,5 mm y la muestra se toma cada 5 minutos hasta completar los 25 minutos.

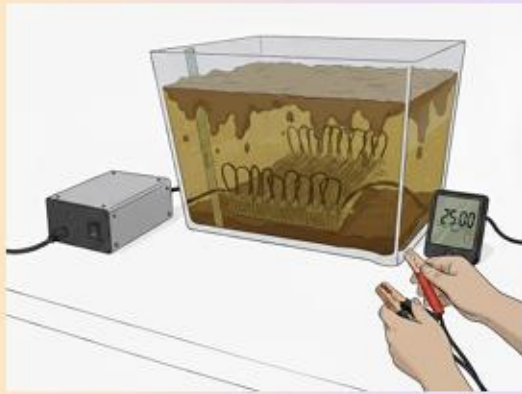
PASO 6: Toma de datos en el espectrofotómetro



Se utiliza el espectrofotómetro y se toma muestra desde el principio sin ningún tipo de tratamiento y después cada 5 min hasta llegar a los 25 minutos en cada medición se lo calibra a las diferentes longitudes de onda, en el caso específico de las aguas residuales se utilizará las siguientes: 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, en cada muestra se lo calibra con una muestra de agua destilada utilizada como blanco y así sucesivamente hasta que se terminen todas las mediciones.

Se debe tener en cuenta que el cubeto debe siempre estar por la parte que esta mas clara para que salga el análisis correcto.

PASO 6: Finalización del proceso



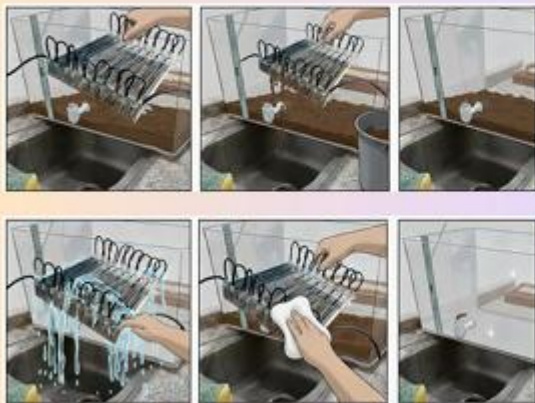
Apagar la fuente de corriente continua y desconectar con cuidado los lagartos luego esperar entre 3 y 5 minutos para permitir la completa separación de los flocúlos.

PASO 7: Retiro del agua tratada



Abrir el sistema de salida del reactor, se debe extraer cuidadosamente el agua clarificada y evitar arrastrar flocúlos justo con el agua tratada.

PASO 8: Limpieza del equipo



Para realizar una correcta limpieza se debe tener en cuenta los siguientes pasos:

- Retirar los electrodos del reactor.
- Lavar con agua limpia.
- Eliminar residuos adheridos con cepillo suave.
- Secar los electrodos antes de guardarlos.
- Limpiar el reactor y dejarlos listo para el siguiente uso.

Fuente: Cardenas & Delgado, 2025